VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ METODY OHÝBÁNÍ TRUBEK A PROFILŮ

Modern methods of tubes and profiles bending

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE **ONDŘEJ ZOUHAR**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **ING. EVA ŠMEHLÍKOVÁ, PH.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Zouhar

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:

Moderní metody ohýbání trubek a profilů

v anglickém jazyce:

Modern methods of tube- and profiles bending

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření přehledu moderních metod ohýbání trubek a profilů v oblasti technologie tváření. V práci by měly být uvedeny metody využívající moderních strojů, nástrojů a materiálů. Dále popis těchto metod, moderní výrobní postupy a příklady vyráběných součástí.

Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu v oblasti tváření a vytvoření přehledu současných výrobních metod. Stručný popis nejnovějších metod a výrobních postupů a uvedení jejich předností. Vše by mělo být doplněno názornou obrázkovou dokumentací.

Seznam odborné literatury:

DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

PROCHÁZKA, Jiří, et al. Technologi slévání, tváření a svařování. 3. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1990. s. 343. ISBN 80-01-00345-0.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.

ABSTRAKT

ZOUHAR Ondřej: Moderní metody ohýbání trubek a profilů.

Projekt vypracovaný v rámci bakalářského studia předkládá průzkum v oblasti moderních metod ohýbání trubek a profilů. Na základě literárních podkladů týkajících se ohýbání trubek a profilů byl vytvořen soupis, který má shrnout všechny dnes používané moderní technologie v této oblasti. Práce zabírá v teoretické části časový horizont od nejstarších metod ohýbání až po dnešní metody. V teoretické části jsou uvedeny nejmodernější stroje používané při ohýbání trubek a profilů.

Klíčová slova: ohýbání trubek, ohýbání profilů

ABSTRACT

ZOUHAR Ondřej: Modern methods of tubes - and profiles bending.

The project elaborated in the framework of Bachelor's study presents a survey of modern methods in the field of bending tubes and profiles. On the basis of literary evidence relating to the bending of tubes and profiles the list was created to summarize all the currently used modern technology in this field. The work covers the theoretical part of the time horizont of the oldest methods of bending to the present methods. In the theoretical part are given the most modern machines used to bend tubes and profiles.

Keywords: tubes bending, profiles bending

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZOUHAR Ondřej: *Moderní metody ohýbání trubek a profilů*. Brno, 2009. 37 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 19.5.2009

……
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Evě Šmehlíkové, Ph.D., vedoucí mé bakalářské práce, za odborné vedení, cenné připomínky a rady týkající se zpracování této práce.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

1. ÚVOD 11
2. TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ 12
2.1 TEORIE OHÝBÁNÍ 12
2.1.1 Napjatostní stav při ohybu 12
2.1.2 Neutrální plocha 13
2.2 STANOVENÍ DÉLKY POLOTOVARU 14
2.3 POLOMĚRY OHYBU 14
2.3.1 Minimální poloměr ohybu 14
2.3.2 Maximální poloměr ohybu 15
2.4 ODPRUŽENÍ MATERIÁLU 15
2.5 OHÝBACÍ SÍLA 17
2.6 OHÝBÁNÍ TRUBEK 18
2.6.1 Ruční ohýbání trubek v přípravku 18
2.6.2 Ohýbání trubek navíjením 18
2.6.3 Ohýbání trubek s ohřevem 20
2.6.4 Ohýbání trubek osovou tlakovou silou s ohřevem 20
2.6.5 Protlačování trubek 20
2.7 VADY PŘI OHÝBÁNÍ TRUBEK 21
2.7.1 Ztenčení tloušťky stěny trubky 21
2.7.2 Značné zploštění kruhového průřezu 22
2.7.3 Další druhy defektů 22
2.8 VÝPLNĚ TRUBEK 22
2.8.1 Druhy výplní 23
2.9 OHÝBÁNÍ PROFILŮ 23
3. STROJE PRO OHÝBÁNÍ 25
3.1 STROJE PRO OHÝBÁNÍ TRUBEK A PROFILŮ 25
3.1.1 Ohýbačka trubek XOTL 60 25
3.1.2 Ohýbačka trubek CB 25 26
3.1.3 Ohýbačka trubek UNISON 100 27
3.1.4 Ohýbačka trubek BLM Dynamic D8 27
3.1.5 Ohýbačka trubek E-POWER 110 29
3.1.6 Stroj k tváření trubek PHV 76/12T 30
3.1.7 Zakružovačka profilů HPK 160 31
4. ZÁVĚR 33
Seznam použitých zdrojů 34
Seznam použitých symbolů a zkratek 36

1. ÚVOD

Ohýbání trubek a profilů patří v dnešní době k nezanedbatelným technologickým procesům, jehož základy sáhají až o několik desetiletí zpět. Ohnutého profilu nebo trubky nemusíme dosáhnout pouze ohýbáním. Mezi často používané technologie pro výrobu ohybků patří také protlačování nebo zakružování.

Ohýbané trubky a profily jsou nedílnou součástí průmyslu, dalo by se říct, že snad všech průmyslů, které si člověk zrovna vybaví. Můžeme se s nimi setkat v průmyslu automobilovém, leteckém, chemickém, potravinářském, petrochemickém, bývají součástmi nejrůznějších strojů a zařízení.

Ohýbané profily mají totiž jisté výhody, kvůli kterým jsou konstruktéry tak hojně používány. Ohybky mohou v sériové a velkosériové výrobě nahradit svařované polotovary a tím dojde ke značnému ušetření materiálu, časovým úsporám. Tyto úspory se pak zcela jistě projeví na zlepšení ekonomické bilance daného výrobku.

Důležitým faktorem při ohýbání trubek je jejich estetický vzhled. Trubky totiž nachází své uplatnění nejen v průmyslu, ale používají se také na výrobu různých interiérových a exteriérových doplňků, ať už to jsou různá madla, zábradlí, brány. U těchto výrobků je vzhled jedním z hlavních faktorů. Profily a trubky se pak opatřují nejrůznějšími povrchovými úpravami (lakování, niklování, chromování, pozinkování), které mají za úkol zlepšit celkový design trubek.

Obr.1 Příklady výrobků z trubek

2. TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ

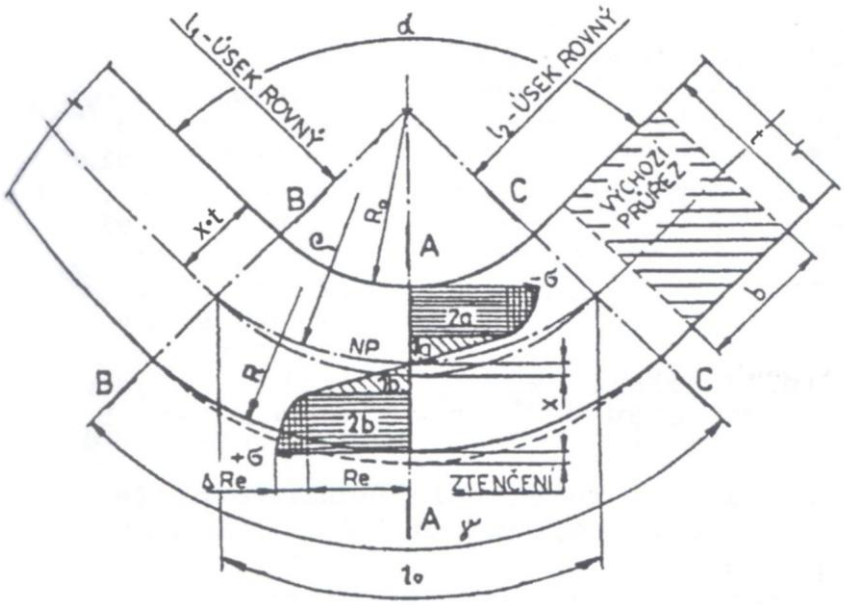
Ohýbání je ve strojírenství velmi často používaná technologická operace, při níž se materiál napětím vzniklým od působící ohybové síly buď ohýbá nebo rovná, tzn. že se mění křivost součástí, jejichž polotovarem je plech, tyč, drát, trubka nebo profil. Protože během ohýbání nedochází k nikterak velké změně průřezu, tak ohýbání patří do skupiny tváření plošného.

2.1 TEORIE OHÝBÁNÍ [1], [2], [4]

Ohýbání se většinou provádí pomocí ohýbacích nástrojů a strojů zastudena, tj. za teplot výrazně nižších než je teplota rekrystalizace ($T \leq 0{,}3 \cdot T_{TAV}$). Ohýbání zatepla, které probíhá při teplotě vyšší než je teplota rekrystalizace, se praktikuje tehdy, jestliže polotovar má velký průřez, vyšší pevnost a je tvrdý nebo křehký.

2.1.1 Napjatostní stav při ohybu [1], [2], [4]

Při ohýbání dochází v materiálu v místě ohybu k nehomogenní lokální pružně - plastické deformaci. Na tuto deformaci má vliv kvalita a tloušťka materiálu v místě ohybu, orientace ohybu vzhledem ke směru válcování, poloměr ohybu a velikost ohybových momentů. Přetvoření probíhá v místě maximálního ohybového momentu. U ohýbání rozeznáváme dva druhy ohybu, a sice ohyb vnějšími momenty a ohyb lokálními silami.



Obr.2 Schéma ohýbání [1]

Při ohýbání se zmenšuje poloměr zakřivení až na jeho minimální hodnotu, která leží na hranici mezní hodnoty deformace za studena, naopak při rovnání se poloměr zakřivení zvětšuje. Rozhodujícím parametrem ohýbání jsou tahová napětí, jejichž kritické hodnoty jsou vždy menší než pevnost materiálu v tahu.

2.1.2 Neutrální plocha [1], [2]

Charakteristickým znakem ohýbání je změna tvaru tzv. neutrální plochy. Napětí, jenž leží na neutrální ploše, mění skokově svoji velikost a dochází ke změně tlakového napětí na tahové. Důsledek změny velikosti a průběhu napětí je deformace v příčném průřezu.

Neutrální plocha je vrstva, která je bez napětí a bez deformace a její poloha je důležitá pro stanovení výchozího rozměru polotovaru. U velkých poloměrů ohybu, tj. $R_O \geq 12 \cdot t$, leží neutrální plocha uprostřed tloušťky t a její poloha se počítá ze vztahu:

$$\rho = R_O + \frac{t}{2} \tag{2.1}$$

kde: ρ – poloměr neutrální plochy [mm]
R_O – poloměr ohybu [mm]
t – tloušťka materiálu [mm]

U malých poloměrů ohybu, tj. $R_O \leq 6$ se poloměr určuje s uvažováním deformace průřezu dle vztahu:

$$\rho = \left(R_O + \frac{t}{2} \right) \cdot z_z \cdot z_r \tag{2.2}$$

kde: ρ – poloměr neutrální plochy [mm]
R_O – poloměr ohybu [mm]
t – tloušťka materiálu [mm]
$z_z = \frac{t_1}{t}$ – součinitel ztenčení [mm]
$z_r = \frac{b_1}{b}$ – součinitel rozšíření původního průřezu [mm]
b – šířka výchozího materiálu [mm]
t – tloušťka výchozího materiálu [mm]
b_1 – šířka materiálu po ohnutí [mm]
t_1 – tloušťka materiálu po ohnutí [mm]

Jestliže se zmenšuje poloměr ohybu, tak se vlivem působení napětí a deformace průřezu posouvá neutrální plocha směrem ke stlačovaným vláknům (přesunuje se tedy ze středu materiálu k vnitřnímu povrchu ohýbaného polotovaru) a poloměr neutrální plochy se vypočte podle vztahu:

$$\rho = R_O + x \cdot t \tag{2.3}$$

kde: ρ – poloměr neutrální plochy [mm]
R_O – poloměr ohybu [mm]
x – součinitel posunutí neutrální osy [-]
t – tloušťka materiálu [mm]

2.2 STANOVENÍ DÉLKY POLOTOVARU [1], [2]

Délka polotovaru ohýbané součásti je složena ze součtu délek rovných úseků daného výrobku a délek neutrálních ploch v místě ohybu. Délka neutrální plochy se dá vypočítat ze vztahu:

$$l_n = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot \left(R_O + x \cdot t\right) \tag{2.4}$$

kde: l_n – délka neutrální plochy [mm]
π – Ludolfovo číslo [-]
φ – úhel ohnutého úseku [°]
R_O – poloměr ohybu [mm]
x – součinitel posunutí neutrální plochy [-]
t – tloušťka materiálu [mm]

Celková délka se pak vypočte jako:

$$l_c = l_1 + l_2 + l_3 + ... + l_n + l_{01} + l_{02} + l_{03} + ... l_{0(n-1)} \tag{2.5}$$

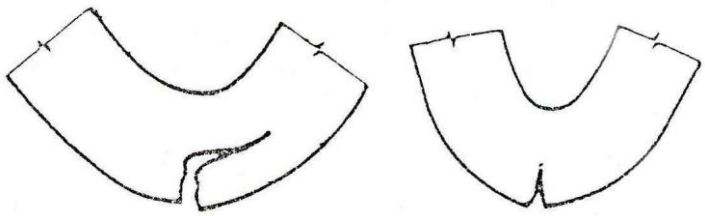
kde: l_c – celková délka polotovaru [mm]
l_{1-3} – délky rovných úseků [mm]
l_n, $l_{01-0(n-1)}$ – délky neutrálních ploch [mm]

2.3 POLOMĚRY OHYBU

2.3.1 Minimální poloměr ohybu [1], [2], [4]

Minimální poloměr ohybu závisí na plastičnosti, anizotropii a kvalitě povrchu ohýbaného materiálu, způsobu ohýbání, úhlu ohybu, šířce a tloušťce ohýbaného materiálu. Hodnoty minimálních poloměrů jsou také závislé na výchozím stavu materiálu a na způsobu ohybu. Způsob ohybu může být buďto napříč anebo podél vláken. Lepší varianta je ohýbání ve směru napříč vláken.

U málo plastických materiálů dochází při ohybu díky intenzivnímu deformačnímu zpevnění ke vzniku trhlin, proto se tyto materiály před ohýbáním žíhají. Vyžíhané materiály mají hodnotu minimálního poloměru ohybu menší, než materiály stejné tloušťky, které jsou zpracovávány zastudena.



Obr.3 Porušení při ohýbání [2]

Materiál	Minimální poloměr ohybu [mm]
dural	$R_{min} = (3 \div 6) \cdot t$
měkká ocel	$R_{min} = (0{,}4 \div 0{,}8) \cdot t$
měkká mosaz	$R_{min} = (0{,}3 \div 0{,}4) \cdot t$
hliník	$R_{min} = 0{,}35 \cdot t$
měkká měď	$R_{min} = 0{,}25 \cdot t$

Tab.1 Orientační hodnoty minimálního poloměru ohybu [1], [4]

Pozn. Hodnoty uvedené v Tab.1 byly určeny pro případ, kdy je osa ohybu kolmá na směr vláken materiálu. Jestliže je osa ohybu podél vláken materiálu, tak se automaticky zvětšuje minimální poloměr ohybu na dvojnásobek.

2.3.2 Maximální poloměr ohybu [1], [2]

Maximální poloměr ohybu je dán podmínkou, podle které musí dojít v krajních vláknech tahové strany k nevratné - trvalé plastické deformaci. Podmínka je vyjádřena rovnicí:

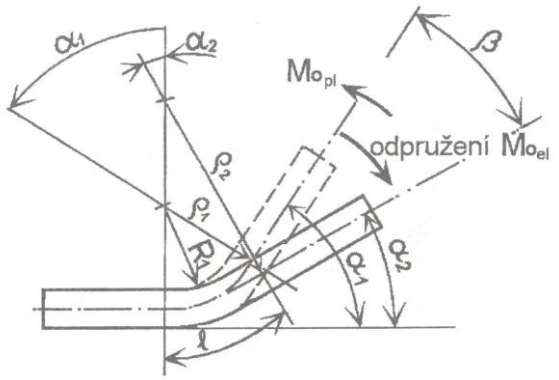
$$R_{max} = \frac{t}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \tag{2.6}$$

kde: R_{max} – maximální poloměr ohybu [mm]
t – tloušťka ohýbaného materiálu [mm]
E – modul pružnosti v tahu [MPa]
R_e – mez kluzu materiálu [MPa]

V případě, že by tato podmínka nebyla splněna, tak by došlo k vratnému pružnému (elastickému) ději a ohýbaný materiál by se po odtížení narovnal.

2.4 ODPRUŽENÍ MATERIÁLU [1], [2], [4]

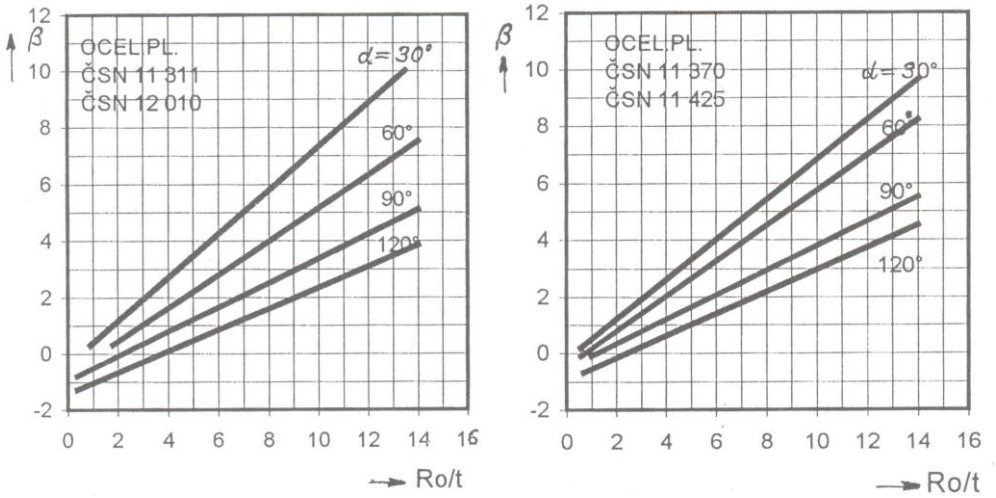
Ohýbání zastudena je doprovázeno pružnými deformacemi. Přestane-li na materiál působit deformační síla, tak dochází k zániku těchto pružných deformací, což po odtížení způsobí odpružení materiálu. Důsledkem odpružení je změna rozměru a tvaru dílce, který neodpovídá rozměrům ohýbacího nástroje. Při řešení ohýbacích nástrojů je tedy důležité počítat s odpružením.



Obr.4 Odpružení při ohýbání [4]

Pozn. Součást je ohnuta na úhel α_1 a po odtížení dojde k odpružení materiálu na úhel α_2.

Velikost odpružení závisí na mechanických vlastnostech a tloušťce ohýbaného materiálu, poměru poloměru ohybu na tloušťce materiálu, velikosti ohýbaného úhlu, konstrukci ohýbadla a způsobu provedení ohybu, tj. V-ohyb nebo U-ohyb. Velikost odpružení se zjišťuje výpočtem (2.7 a 2.8), což je přesnější, nebo z diagramů, které vycházejí z praktických zkoušek. Tyto diagramy jsou zpracovány pro ocel, hliník, měď a jejich slitiny.



Obr.5 Odpružení pro různé úhly a materiály [2]

$$\beta = arctg\left(0{,}375 \cdot \frac{l_V}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E}\right) \qquad (2.7)$$

$$\beta = arctg\left(0{,}75 \cdot \frac{l_U}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E}\right) \qquad (2.8)$$

kde: β – úhel odpružení materiálu [°]

l_V – vzdálenost mezi opěrami ohybnice [mm]

k – součinitel určující polohu neutrální plochy v závislosti na poměru $\frac{R_O}{t}$ [-]

t – tloušťka ohýbaného materiálu [mm]

R_e – mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa]

E – modul pružnosti v tahu [MPa]

l_U – vzdálenost mezi vnějším poloměrem ohybnice a vnitřním poloměrem součásti ohýbané do U, $l_U = R_m + R_O + 1{,}2 \cdot t$ [mm]

R_m – poloměr zaoblení ohybnice [mm]

R_O – poloměr ohybu [mm]

Pozn. Vztah (2.7) je platný pro ohyb do V, vztah (2.8) je pro ohyb do U.

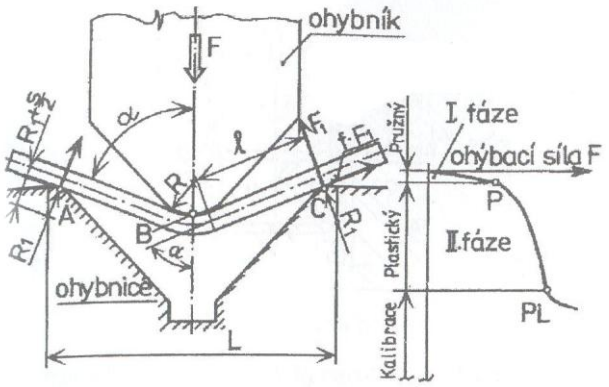
Odpružení je možné předejít různými konstrukčními úpravami. Nejpoužívanější je podbroušení ohybníku a vytvoření tzv. záporné vůle, jejíž velikost se pohybuje v rozsahu (0,8÷0,9) násobku tloušťky ohýbaného materiálu, dále zaoblení dolní části ohýbadla, popř. další úpravy ohybníku.

U součástí, které mají velký poloměr ohybu (R_O/t>20), se dosahuje velkého odpružení a tudíž se neurčuje úhel odpružení, ale změna poloměru R_1 (poloměr před odpružením) na poloměr R_2 (poloměr po odpružení).

2.5 OHÝBACÍ SÍLA [2], [4]

Při zhotovování ohybu V považujeme ohýbaný polotovar za nosník na dvou podporách. Podpory jsou od sebe vzdáleny o vzdálenost L a osamělá síla působí v polovině této vzdálenosti. Ohybový moment (2.9), jehož velikost je v I. fázi závislá na vzdálenosti L, vyvolá v místě ohybu napětí, které je na mezi pružnosti rovno kritickému napětí. Toto napětí působí v krajních tahově namáhaných vláknech.

V II. fázi dochází k nárůstu ohýbací síly až na hodnotu, při které dojde k dosednutí ohýbané součásti na stěny ohybnice. Zároveň se plastický ohyb rozšiřuje směrem k neutrální ose. Po druhé fázi může ještě následovat kalibrace, která zvýší celkovou ohýbací sílu o sílu kalibrační (2.11). Během ohýbání se vyskytuje jeden nepříznivý faktor, a sice tření, které dále navyšuje hodnotu celkové ohýbací síly (2.12).



Obr.6 Ohýbání osamělou silou [4]

Ohybový moment:

$$M_O = \frac{F_O \cdot L}{4} \tag{2.9}$$

kde: M_O – ohybový moment [N·m]
F_O – ohýbací síla [N]
L – vzdálenost podpor ohýbadla [m]

Ohýbací síla:

$$F_O = \frac{2 \cdot (1{,}3 + 0{,}8 \cdot \varepsilon) \cdot b \cdot t^2 \cdot R_e}{3 \cdot L} \tag{2.10}$$

kde: F_O – ohýbací síla [N]
b – šířka materiálu [mm]
t – tloušťka materiálu [mm]
R_e – napětí na mezi plastické deformace [MPa]
L – vzdálenost podpor ohýbadla [mm]
ε – mezní poměrné přetvoření krajních tahových vláken [-]

Kalibrační síla:

$$F_k = S \cdot p \qquad (2.11)$$

kde: F_k – kalibrační síla [N]
S – kalibrovaná plocha polotovaru v průmětu kolmém na pohyb ohybníku [mm^2]
p – měrný tlak pro kalibrování (p= 30÷150MPa) [MPa]

Celková ohýbací síla:

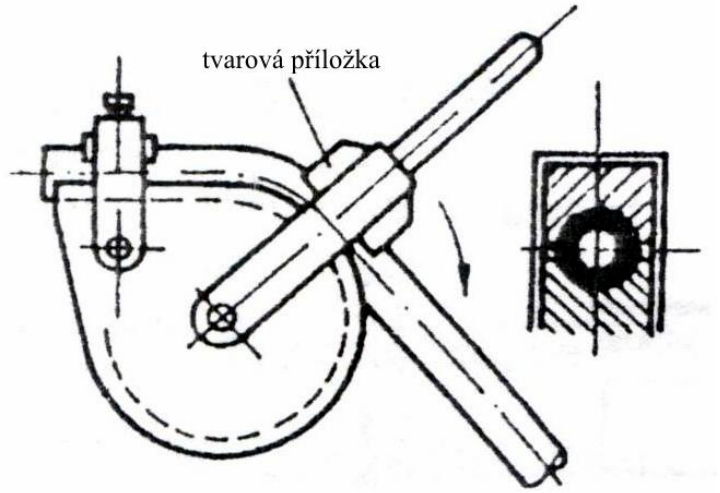
$$F_{O\max} = F_O + 1{,}3 \cdot F_O + F_k \qquad (2.12)$$

kde: F_{Omax} – celková ohýbací síla [N]
F_O – ohýbací síla [N]
F_k – kalibrační síla [N]

2.6 OHÝBÁNÍ TRUBEK

2.6.1 Ruční ohýbání trubek v přípravku [1]

Tento způsob se používá k ohýbání tenkostěnných trubek do průměru 20mm a minimálního poloměru ohybu $R_{min} \geq 2{,}5 \cdot D$. Trubka se pomocí upínky připevní k segmentovému kotouči a poté pomocí pohybu páky s tvarovou příložkou dochází k jejímu ohýbání do tvaru podle kotouče.



Obr.7 Ohýbání trubky v přípravku [1]

2.6.2 Ohýbání trubek navíjením [1], [3]

Ohýbání trubek s navíjením je výkonnější způsob než ruční ohýbání v přípravku. Je určeno pro průměry trubek D= (12÷80)mm a provádí se na strojních ohýbačkách. Celý proces spočívá v navíjení trubky na segmentový kotouč, který, stejně jako vodící lišta, musí mít odpovídající profilovou drážku dle vnějšího průměru trubky. Vodící lišta může být pevná nebo pohyblivá.

Nejprve se trubka, která prochází přes vodící lištu, upevní k segmentovému kotouči. Poté dochází k otáčení kotouče a tudíž k navíjení trubky na tento kotouč, z čehož vyplývá, že konečný tvar ohybku se opět odvíjí od tvaru kotouče.

Kvalita ohybu se dá zvětšovat vkládáním kalibračních trnů a mechanických ohebných vložek (pružiny, silikonové, kovové nebo polyuretanové vložky) do trubek. Kalibrační trn

většinou sahá až do místa ohybu. Pro trubky do průměru D<50mm je průměr trnu o (0,5÷0,6)mm menší než je vnitřní průměr trubky. Důležitým faktorem je mazání trnu, které se provádí buď ručně v místě ohybu nebo pomocí dutého trnu, kde se mazivo přivádí přes dutinu až do třecích ploch. Mezi nejpoužívanější maziva patří mazlavé mýdlo a další speciálně vyvinutá maziva.

Moment nezbytný k vyvolání plastické deformace (ohnutí trubky) se vypočte dle vztahu:

$$M = \left(k_1 + \frac{k_0}{2\rho_s} \right) \cdot W_o \cdot R_e \qquad (2.13)$$

kde: M – moment nezbytný k vyvolání plastické deformace [N·m]
k_1 – součinitel profilu (poměr statického momentu plochy napětí příčného řezu při plastické a elastické deformaci) – viz. Tab.2 [-]
ρ_s – poměr poloměru ohybu k vnějšímu poloměru trubky [-]
W_o – modul průřezu v ohybu pro trubku – viz. vztah (2.14) [m^3]
R_e – mez kluzu daného materiálu [Pa]

Modul průřezu v ohybu:

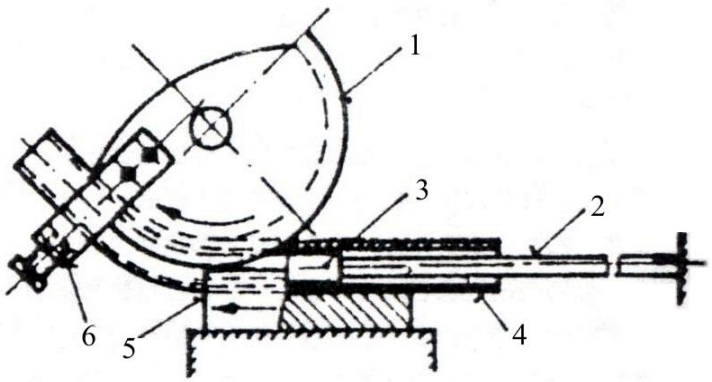
$$W_o = 0{,}1 \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} \qquad (2.14)$$

kde: W_o - modul průřezu v ohybu pro trubku [m^3]
D – vnější průměr trubky [m]
d – vnitřní průměr trubky [m]

$\frac{t}{D}$ [-]	k_1 [-]
< 0,05	1,3
0,05 ÷ 0,11	1,4
0,12 ÷ 0,19	1,5
0,20 ÷ 0,30	1,6

Tab.2 Hodnoty koeficientu k_1 [3]

Pozn. t – tloušťka stěny trubky [mm]



1 – segmentový kotouč
2 – nosná tyč
3 – kalibrovací trn
4 – trubka
5 – lišta
6 – upínka

Obr.8 Ohýbání trubky navíjením [1]

2.6.3 Ohýbání trubek s ohřevem [1]

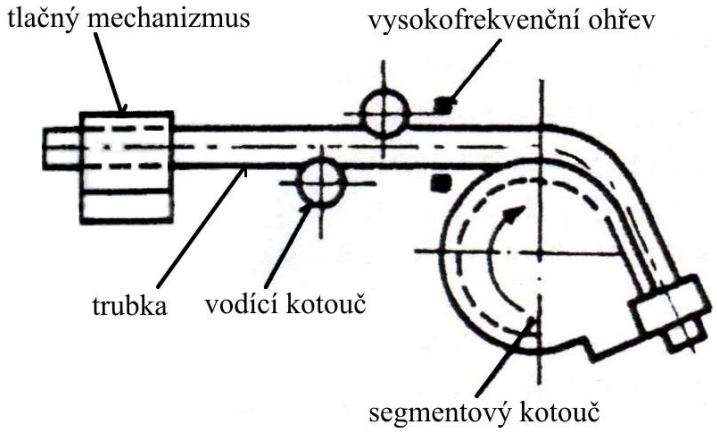
Ohyb s ohřevem se používá pro případy, kdy nelze danou součást ohnout některým ze způsobů zastudena. Trubka se ohýbá v přípravku a v místě ohybu se ohřívá kyslíko - acetylénovým plamenem. Důležité je, aby se více nahřívala vnitřní strana ohýbané trubky. Dutina ohýbané trubky se většinou plní sklářským pískem, který zabraňuje ztenčení stěn.

Mezi výhody této metody patří menší hodnoty úhlu odpružení a menší ohýbací síla. Nevýhody této metody vychází z ohřevu trubky – vyšší výrobní náklady, nižší produktivita práce, náročnější příprava trubky na ohýbání a v neposlední řadě horší kvalita povrchu.

2.6.4 Ohýbání trubek osovou tlakovou silou s ohřevem [1]

Při běžném ohýbání trubek na konvenčních strojích dochází během ohýbacího procesu na vnějším poloměru ke ztenčení tloušťky stěny, které obvykle dosahuje až 25%. Tato technologie potlačuje velikost ztenčení díky kombinaci vysokofrekvenčního ohřevu, ve vymezené oblasti trubky, s tlakem.

Princip této metody je podobný jako u metody navíjecí. Trubka prochází přes tlačný mechanizmus, vodící kotouče a vysokofrekvenční ohřev, který může být integrován do vodících kotoučů, a je postupně navíjena na segmentový kotouč, ke kterému je opět mechanicky připevněna.



Obr.9 Navíjení trubky s osovou tlakovou silou a ohřevem [1]

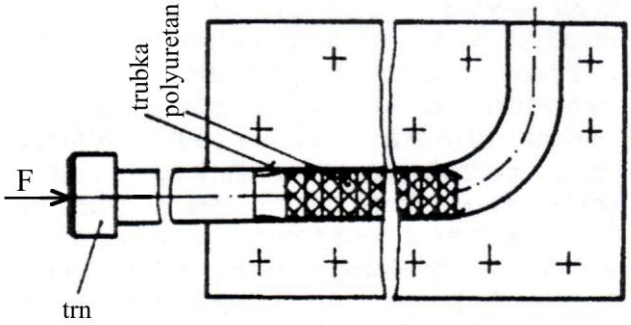
2.6.5 Protlačování trubek [1]

Protlačování trubek představuje další metodu ohýbání trubek zastudena. Postup při této metodě je následující.

Nejprve se konec trubky zúží protlačováním do matrice, což způsobí částečné uzavření konce trubky. Poté se do trubky vsunou polyuretanové kroužky a celý tento segment se vloží do dělené zápustky, která je sešroubována šrouby a má v sobě vyfrézován tvar budoucího ohnutého profilu. Na polyuretanové kroužky dosedne trn a začne je vtlačovat do trubky, čímž začne narůstat koeficient tření mezi kroužky a vnitřní stěnou trubky. Jakmile se tento koeficient stane větším, než je koeficient tření mezi vnější stěnou trubky a zápustky, tak dojde k posunu trubky a jejímu ohýbání dle zápustky.

Trubka je po celou dobu působení trnu zatěžována tlakovým napětím, díky čemuž dochází k napěchování tloušťky stěny, které může dosáhnout hodnoty až 30% (pro trubku s $\frac{t}{D} = 0{,}052$ a $\frac{R}{D} = 1{,}5$). Mimo potlačení ztenčování tloušťky stěny tato metoda potlačuje

další defekt, a sice zvlnění na vnitřním poloměru a to díky vysokému tlaku polyuretanu na vnitřní stěnu trubky.



Obr.10 Protlačování trubky [1]

2.7 VADY PŘI OHÝBÁNÍ TRUBEK [1]

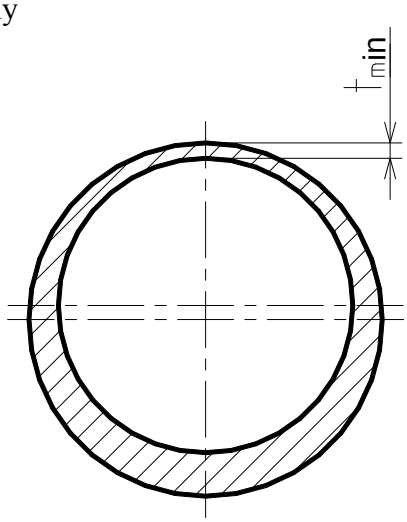
Ke vzniku vad při ohýbání dochází nejčastěji při nedodržení technologických zásad, mezi něž patří nedodržení poměrné tloušťky stěny a minimálního poloměru ohybu. Vzniku defektů se dá zabránit použitím výplní.

2.7.1 Ztenčení tloušťky stěny trubky [5]

Ztenčení se na ohýbané trubce projeví v oblasti vnějšího poloměru ohybu a může mít za následek i vznik trhlin. Dovolená hodnota ztenčení stěny je 25% a vypočítá se dle následujícího vztahu:

$$\Delta t = \left(1 - \frac{t_{\min}}{t_0}\right) \cdot 100 \qquad (2.15)$$

kde: Δt - ztenčení stěny [%]
t_{min} – minimální tloušťka stěny [mm]
t_0 – původní tloušťka stěny [mm]



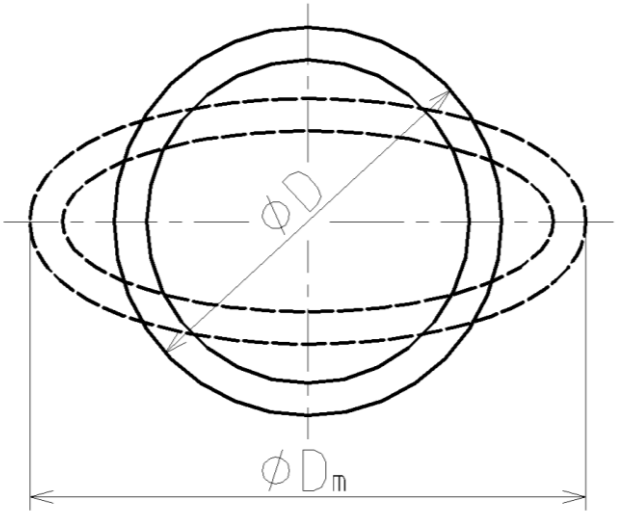
Obr.11 Ztenčení stěny trubky

2.7.2 Značné zploštění kruhového průřezu [5]

Dalším defektem při ohýbání trubek je ztenčení trubek neboli ovalita – původní kruhový průřez se po ohnutí mění na průřez oválný (Obr.12). Velikost ovality se vypočítá dle vztahu 2.16.

$$K_0 = \frac{D_m - D}{D} \cdot 100 \qquad (2.16)$$

kde: K_0 – ovalita [%]
D_m – největší průměr deformovaného průřezu [mm]
D – původní průměr trubky [mm]



Obr.12 Zploštění trubky

2.7.3 Další druhy defektů [5]

Mezi další defekty vzniklé při ohýbání trubek patří zvlnění stěny v oblasti vnitřního poloměru ohybu, k čemuž dochází při ztrátě stability stěny trubky, dále pak odpružení po ohnutí a nedosažení požadovaného zaoblení.

2.8 VÝPLNĚ TRUBEK [1]

Výplně stabilizují kruhový průřez a zabraňují tak vzniku defektů. Rozhodujícím kritériem pro použití výplně jsou následující dvě podmínky:

$$\frac{t}{D} \geq 0{,}1 \wedge \frac{R_{\min}}{D} \geq 3 \qquad (2.17)$$

kde: t – tloušťka stěny trubky [mm]
D – vnější průměr ohýbané trubky [mm]
R_{min} – minimální poloměr ohybu [mm]

Tyto dvě podmínky musí platit současně a při jejich splnění mluvíme o optimálních podmínkách pro ohýbání a nemusíme použít výplň. Jestliže tyto podmínky splněny nejsou, tak je použití výplně nezbytné.

2.8.1 Druhy výplní [1]

Výplně, používané k ohýbání trubek, se dají rozdělit na tuhé, tekuté, mechanické, elastické a sypké. Každá z těchto výplní je vhodná na určitý druh materiálu.

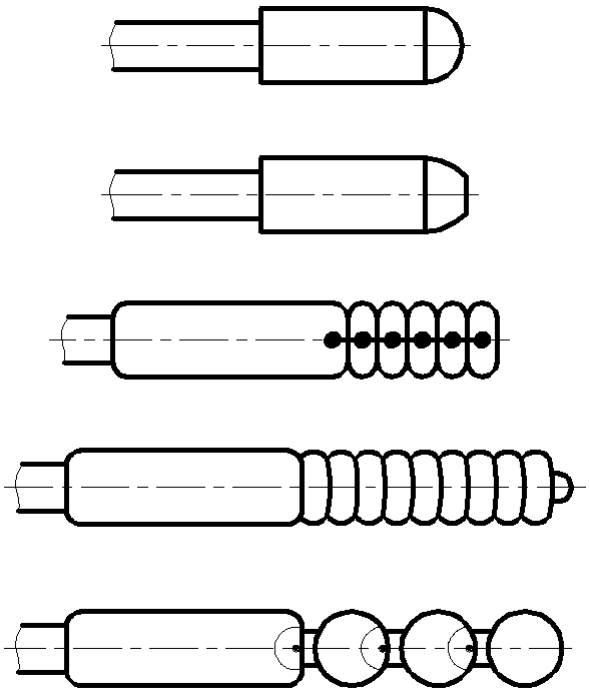
Pro ohýbání ocelových krátkých trubek s větším průměrem jsou vhodné tuhé a lehce tavitelné výplně (dusičnan vápenatý, kalafuna, ledek draselný, atd.), jejichž výhodou je po ohnutí snadný výplach horkou vodou při (70÷80)°C, naopak jejich nevýhoda je křehkost po ztuhnutí.

Tuto nevýhodu odstranilo plnidlo na bázi lehkotavitelné slitiny, která se skládá z kadmia, vizmutu, hutnického měkkého olova a čistého cínu. Slitina se ohřeje na 80°C a nalije se do trubky, odkud se, po ztuhnutí a ohnutí, vytaví v teplé vodě (90°C). Výhodou této slitiny je její opětovné použití.

K ručnímu ohýbání trubek je vhodným druhem výplně hydraulický olej, který je v trubce pod tlakem (25÷40)MPa. Výhodou je snadné odstranění oleje z trubky, nevýhodou je nutnost opatřit konce trubky šroubením a fakt, že k plnění je potřeba zařízení, které vyvine požadovaný tlak.

Mezi mechanické výplně se zahrnují silonové, polyuretanové nebo kovové vložky, skládající se z válcových, kulových, polokulových segmentů, a dále pak husté pružiny.

Pro ohýbání trubek z neželezných a barevných kovů se používají jednoduché ohýbací přípravky. U trubky nedochází při ohýbání k poškození ani na vnějším povrchu ani vevnitř trubky. Proto při ohýbání těchto druhů materiálu není nutné používat výplně.



Obr.13 Druhy trnů [3]

2.9 OHÝBÁNÍ PROFILŮ [5]

Kromě ohýbání trubek se ohybem zpracovávají i profily. Profily většinou mají nesouměrné rozložení plochy řezu vzhledem k jeho těžišti. Diagramy napětí a deformace v tahové a tlakové části pak nejsou symetrické. Na obrázku 14 je L profil, který je ve spodní části namáhán tlakovým napětím. Tlakové napětí je větší než tahové napětí v horní části profilu, z čehož vyplývá, že profil je více přetvořen ve spodním úseku, kde tedy může dojít snadněji ke ztrátě stability, tzn. že dojde ke zvlnění. Lepším řešením by bylo, kdyby byl profil

otočen, tzn. že stojna by byla namáhána tahovým napětím. I při tomto řešení by ale došlo při překročení určitého napětí ke vzniku trhlin na stojně. Kromě normálových tahových a tlakových napětí vznikají v profilu i smyková napětí, která způsobí, že se profil začne zkrucovat.

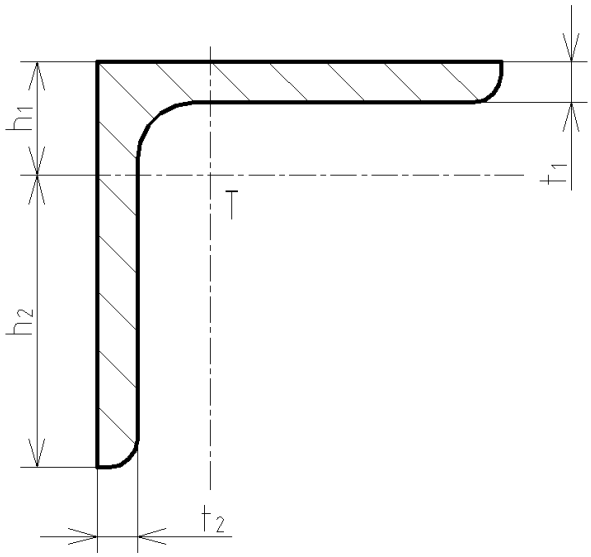
Předpoklady při ohýbání profilů jsou následující – neutrální vrstva leží v těžištní linii průřezů a dá se použít hypotézy o rovinnosti řezů po ohybu.

Mezi požadavky, které klademe na ohýbané profily patří dodržení požadovaného úhlu, rovinnosti a minimální zkroucení profilu po ohnutí. Jestliže je R/h>4, pak je zborcení profilu minimální, čím ostřejší je poloměr ohybu, tím větší je zborcení. Zborcení se dá předejít vložkami při ohýbání a dalšími konstrukčními úpravami.

Výpočet momentu vnitřních sil (ohybového momentu) při prostém ohybu:

$$M_{vn} = \int_0^{h_1-t_1}\left(\bar{\sigma}_k + D\frac{y}{R_O}\right)t_2 y dy + \int_{h_1-t_1}^{h_1}\left(\bar{\sigma}_k + D\frac{y}{R_O}\right)b\cdot y dy + \int_0^{h_2}\left(\bar{\sigma}_k + D\frac{y}{R_O}\right)t_2 y dy \qquad (2.18)$$

kde: M_{vn} – moment vnitřních sil [N·m]
h_1 – vzdálenost od těžiště po konec horního ramene profilu [m]
h_2 - vzdálenost od těžiště po konec dolního ramene profilu [m]
t_1 – tloušťka horního ramene [m]
t_2 – tloušťka dolního ramene [m]
$\bar{\sigma}_k$ – extrapolovaná mez kluzu [Pa]
D – modul zpevnění materiálu [Pa]
y – vzdálenost elementu dy od těžiště [m]
R_O – poloměr ohybu [m]



Obr.14 L profil

Mezi problémy, které způsobují nesymetrické profily, patří nesplnění podmínky rovinného ohybu, osa dílce vybočuje z roviny, ve které leží vnější síly.

Aby nedocházelo k tomu, že profil je stlačován a dochází tak k jeho borcení, byl vynalezen způsob, který tento problém odstraní. K ohybu se přidává současný tah, díky čemuž se z profilu, při použití správné velikosti tahových sil, úplně odstraní tlakové namáhání a tím i vady, které při něm vznikají.

3. STROJE PRO OHÝBÁNÍ

3.1 STROJE PRO OHÝBÁNÍ TRUBEK A PROFILŮ

Pro ohýbání trubek a profilů se nejčastěji používají ohýbačky, které jsou v dnešní době už většinou řízené pomocí CNC, což zajišťuje univerzálnost těchto strojů. Univerzálnost ovšem nespočívá pouze v tomto řízení, ale také v možné přenastavitelnosti. Na ohýbačkách se mohou ohýbat trubky ocelové, měděné, nerezové, hliníkové a trubky z dalších materiálů.

3.1.1 Ohýbačka trubek XOTL 60

Tato ohýbačka je určena pro ohýbání tenkostěnných i silnostěnných ocelových trubek do průměru 60 mm. Je vybavena řídící jednotkou, která umožňuje digitální odměřování délky mezi ohyby a úhly ohybu. Ohýbačka může pracovat v ručním nebo automatickém režimu. Jestliže se použijí speciální segmenty, tak je možno ohýbačku použít i k ohýbání jäcklů, profilů, plochých a čtyřhranných tyčí.

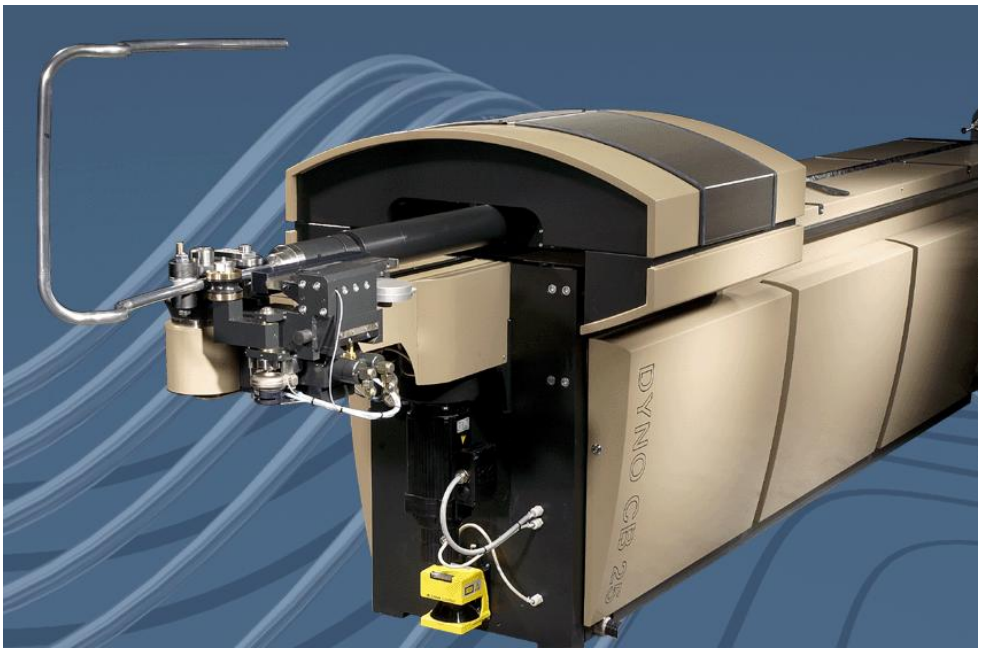
Obr.15 Ohýbačka trubek XOTL 60 [6]

Rozsah ohýbaných průměrů	20÷60 [mm]		
Maximální rozměry ohýbaných materiálů		Ø [mm]	t [mm]
	Trubka	51	10
	Trubka	60	6
	Kruhová tyč	50	-
	Čtyřhranná tyč	42×42 [mm]	
Rozměry	1 000×500×950 [mm]		
Hmotnost	130 [kg]		
Příkon	2,8 [kW]		
Napájecí napětí	400 [V]		

Tab.3 Technické parametry

3.1.2 Ohýbačka trubek CB 25

Ohýbačka CB 25 umožňuje ohýbat trubky a profily větších i menších rozměrů a poloměrů. Přesnost ohybu je 0,1° a maximální možný ohýbaný úhel je 200°. Materiálem trubek může být ocel, měď, hliník a další. Je vybavena CNC řízením, díky němuž je možno ohýbat široký rozsah geometrických tvarů a profilů (Obr.17). Zajímavostí této ohýbačky je vertikálně otvíraný, horizontálně dělený nástroj, jehož použitím se předchází poškození trubek a profilů při ohýbání. Tato ohýbačka je standardně vybavena vodícím trnem, řídícím panelem, dá se na ní prostorově ohýbat jak doprava, tak doleva. Podélný pohyb je zajišťován pomocí kuličkového šroubu.

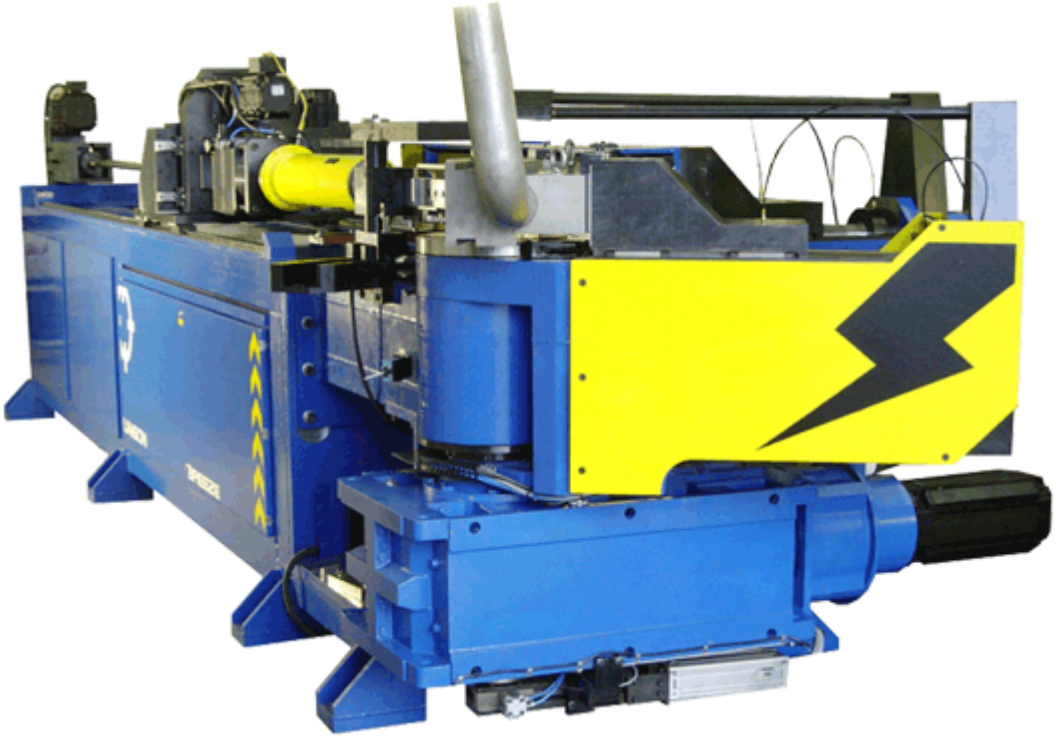


Obr.16 Ohýbačka trubek CB 25 [7]

Obr.17 Trubky a profily [8]

3.1.3 Ohýbačka trubek UNISON 100

Ohýbačka Unison je schopna ohýbat ocelové trubky do průměru 100mm (tloušťka stěny až 2,5mm), maximální úhel ohybu trubky je 190°. Je plně ovládána elektronicky, každý ohyb je kontrolován laserovým paprskem. Stroj provádí díky laserovému měření korekce, které přispívají k tomu, že přesnost úhlu je udávána na desetinu stupně a to už u prvního ohybu. Laserové měření tak odstraňuje vliv odpružení při ohýbání. Na této ohýbačce se dají ohýbat trubky s více poloměry ohybu. Další předností je možnost dělení trubek přímo na ohýbačce.



Obr.18 Ohýbačka UNISON 100 [9]

3.1.4 Ohýbačka trubek BLM Dynamic D8

Na této CNC řízené ohýbačce se dají ohýbat trubky až do průměru 130 mm ale také profily. Je osazena vícestupňovým nástrojem, který umožňuje použít na jednom výrobku víc druhů poloměrů ohybu. Dají se na ní zhotovovat ohyby kde $\frac{R}{D} = 1$. Tento stroj je vybaven softwarem, který podle 3D nákresu vyráběné součásti dokáže vygenerovat co nejefektivnější způsob ohýbání, který pak odsimuluje na obrazovce.

Obr.19 Ohýbačka trubek BLM Dynamic D8 [10]

Obr.20 Ohýbání profilu [11]

3.1.5 Ohýbačka trubek E-POWER 110

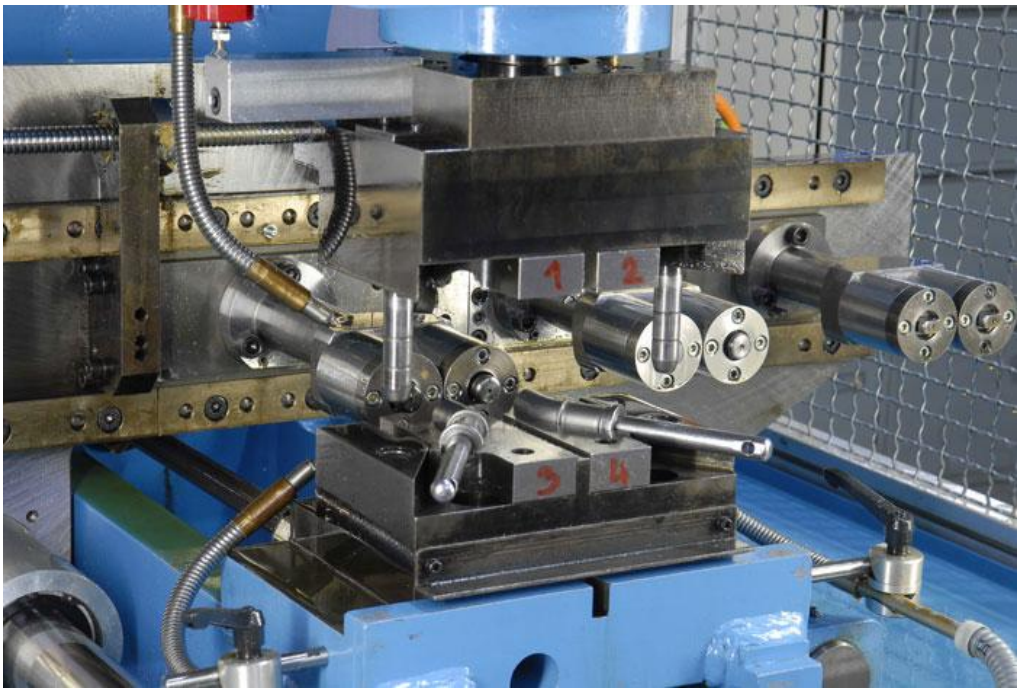
Jedná se o elektrickou ohýbačku trubek do maximálního průměru 110mm. Jako předchozí ohýbací stroje, je i tato ohýbačka číslicově řízena, také umožňuje na trubce používat rozdílné poloměry ohybu a umožňuje i ohýbání vlevo nebo vpravo ve stejném cyklu. K dalším vymoženostem patří dotykový displej. Konečné výrobky zhotovené na této ohýbačce jsou na obrázku 22.

Obr.21 Ohýbačka E-POWER 110 [12]

Obr.22 Výrobky [13]

3.1.6 Stroj k tváření trubek PHV 76/12T

Kromě ohýbání trubek se mohou trubky také tvářet. Tento stroj kromě tváření trubek umožňuje trubky také ohýbat. Dokáže vyvinout tvářecí sílu až 12 tun, má možnost až 5-ti zdvihů v jednom cyklu. Každý zdvih je nezávisle řiditelný. Dají se na něm tvářet trubky ocelové, měděné a nerezové. Je na něm možné také tvářet konce trubek, vyrábět různé prolisy, přechody, radiální vyboulení apod.



Obr.23 Stroj k tváření trubek PHV 76/12T [14]

Obr.24 Tvářecí nástroj [15]

Obr.25 Konečný výrobek vzniklý tvářením trubky [16]

3.1.7 Zakružovačka profilů HPK 160

Tato symetrická zakružovačka je určena pro ohýbání profilů z oceli, hliníku a dalších materiálů. Je u ní možnost variabilně měnit rychlost. Má tři vytvrzené zakružovací válce, které jsou poháněné hydromotorem. Válce jsou vyměnitelné a profilované na všechny druhy profilů. Na výstupu jsou umístěny dva digitální snímače.

Obr.26 Zakružovačka HPK 160 [17]

Průměr hřídelů [mm]	160
Průměr válců [mm]	470
Pracovní rychlost [m/min]	2÷6
Výkon motoru [kW]	22
Hmotnost [kg]	9000

Tab.4 Technické parametry

4. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zhodnocení moderních metod při ohýbání trubek a profilů. Nejprve jsem se zaměřil na historii ohýbání, pak přes ohýbání trubek a profilů jsem došel až k moderním strojům, které se v dnešní době právě pro ohýbání trubek a profilů používají.

Při zhodnocení výše uvedených strojů se jen těžko vybírá ten nejvhodnější. Každý stroj má své přednosti i své nevýhody. Rozhodujícím faktorem při výběru stroje by měly být určitě výrobní možnosti dané firmy (ekonomické využití stroje, malá či velká sériovost výroby,…).

Pro malé firmy je plně dostačující ohýbačka českého výrobce XOTL 60. Je to jednoduchý, přesný stroj, který předčí ostatní svou cenou. Při použití doplňkových zařízení se dá též použít pro ohýbání různých profilů. Dle mého názoru není příliš vhodný pro velkosériové zakázky, ale jinak ho hodnotím vcelku kladně.

Dalším parametrem, při rozhodování se o nejvhodnější ohýbačce, je určitě energetická náročnost stroje. Kromě ohýbaček E-POWER 110 a UNISON 100 mají všechny elektrohydraulický pohon. Elektrický pohon těchto dvou ohýbaček může být jedním z faktorů při rozhodování zákazníka o jejich koupi.

Nezanedbatelnou metodou v dnešní době je také tváření trubek. Tato metoda se dostává do popředí a dalo by se říct, že při výrobě menších ohnutých trubek ve velkosériové výrobě jí patří bezesporu první místo.

Z pohledu univerzálnosti stroje se mně jako nejoptimálnější řešení jeví použití ohýbačky CB 25 nebo BLM Dynamic D8, které se mohou využívat buďto jako ohýbačky trubek nebo profilů. V tomto univerzálním použití vidím jejich velkou přednost. Jistou nevýhodu ohýbačky CB25 je pouze malé spektrum průměrů trubek. Tuto nevýhodu ovšem odstraňuje ohýbačka BLM Dynamic D8, kterou tedy volím, ze všech mnou uvedených strojů, jako nejvhodnější.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření.* 2. vyd. Brno: CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

[2] DVOŘÁK, Milan a kolektiv. *Technologie II*. 3. vyd. Brno: CERM, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.

[3] DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, ŽÁK, Ladislav. *Technologie tváření: Návody do cvičení*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005. 103 s. ISBN 80-214-2881-3.

[4] FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

[5] ŽÁK, Jan, SAMEK, Radko, BUMBÁLEK, Bohumil. *Speciální letecké technologie I*. 1. vyd. Brno: Ediční středisko VUT Brno, Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 220 s. ISBN 80-214-0128-1.

[6] *Unit Plus s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <http://www.unitplus.cz/image/xotl/xotl1.jpg>.

[7] *Intech s.r.o.* [online]. 2007 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <http://www.intech.cz/popup.php?id=36>.

[8] *Dynobend B.V.* [online]. 2007 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <http://dynobend.bitwise.nl/Portals/dynobend/profielen-schoon.jpg >.

[9] *Unison* [online]. 2006 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.unisonltd.com/Machine%20Pictures/100mm%20breeze%20tube%20bender.gif >.

[10] *BLM Group* [online]. 2007 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.blmgroup.com/img_prod/prodotti/curvatura/dynamic5678/campionatura/foto1_zoom.jpg>.

[11] *BLM Group* [online]. 2007 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.blmgroup.com/img_prod/prodotti/curvatura/dynamic5678/campionatura/foto3_zoom.jpg>.

[12] *BEMA Group* [online]. 2008 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.bemagroup.it/upl/cms/fck/DSCF0038_1%20copy(2).jpg>.

[13] *BEMA Group* [online]. 2008 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.bemagroup.it/upl/cache/products/20081015143346069-596888.jpg/width-630-90.jpg>.

[14] *Boltjes International s.r.o.* [online]. 2006 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.boltjes.cz/img/foto/technologie/tvareni/05.jpg>.

[15] *Boltjes International s.r.o.* [online]. 2006 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.boltjes.cz/img/foto/technologie/tvareni/02.jpg>.

[16] *Boltjes International s.r.o.* [online]. 2006 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.boltjes.cz/img/foto/produkty/products_gallery_07.jpg>.

[17] *FERMAT Group, a.s.* [online]. 2008 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.fermatmachinery.com/images/106-HPK-160---obr.JPG>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
b	Šířka výchozího materiálu	[mm]
b_1	Šířka materiálu po ohnutí	[mm]
D	Vnější průměr trubky	[m]
D	Původní průměr trubky	[mm]
D	Modul zpevnění materiálu	[Pa]
D_m	Největší průměr deformovaného průřezu	[mm]
d	Vnitřní průměr trubky	[m]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_k	Kalibrační síla	[N]
F_o	Ohýbací síla	[N]
F_{omax}	Celková ohýbací síla	[N]
h	Výška profilu	[m]
h_1	Vzdálenost od těžiště po konec horního ramene profilu	[m]
h_2	Vzdálenost od těžiště po konec dolního ramene profilu	[m]
K_0	Ovalita	[%]
k	Součinitel určující polohu neutrální plochy v závislosti na poměru poloměru ohybu a tloušťce materiálu	[-]
k_1	Součinitel profilu	[-]
L	Vzdálenost podpor ohýbadla	[m]
l	Délka ohnuté části	[mm]
l_0	Délka ohnuté části	[mm]
$l_{01\text{-}0(n\text{-}1)}$	Délky neutrálních ploch	[mm]
l_1	Délka rovného úseku	[mm]
$l_{1\text{-}3}$	Délky rovných úseků	[mm]
l_2	Délka rovného úseku	[mm]
l_c	Celková délka	[mm]
l_n	Délka neutrální plochy	[mm]
l_n	Délky neutrálních ploch	[mm]
l_U	Vzdálenost mezi vnějším poloměrem ohybnice a vnitřním poloměrem součásti ohýbané do U	[mm]
l_V	Vzdálenost mezi opěrami ohybnice	[mm]
M	Moment nezbytný k vyvolání plastické deformace	[N·m]
M_o	Ohybový moment	[N·m]
M_{oel}	Elastický ohybový moment	[N·m]
M_{opl}	Plastický ohybový moment	[N·m]
M_{vn}	Moment vnitřních sil	[N·m]
p	Měrný tlak pro kalibrování	[MPa]
R	Vnější poloměr ohybu	[mm]
R_1	Poloměr ohybu před odpružením	[mm]
R_2	Poloměr ohybu po odpružení	[mm]
R_e	Mez kluzu materiálu	[MPa]
R_m, R_1	Poloměr zaoblení ohybnice	[mm]
R_{max}	Maximální poloměr ohybu	[mm]
R_{min}	Minimální poloměr ohybu	[mm]
R_O	Vnitřní poloměr ohybu	[mm]

S	Kalibrovaná plocha polotovaru v průmětu kolmém na pohyb ohybníku	[mm^2]
T	Teplota ohýbání	[°C]
T_{TAV}	Teplota tavení	[°C]
t	Tloušťka materiálu	[mm]
t	Tloušťka stěny trubky	[mm]
t_0	Původní tloušťka stěny	[mm]
t_1	Tloušťka materiálu po ohnutí	[mm]
t_1	Tloušťka horního ramene	[m]
t_2	Tloušťka dolního ramene	[m]
t_{min}	Minimální tloušťka stěny	[mm]
W_o	Modul průřezu v ohybu pro trubku	[m^3]
x	Součinitel posunutí neutrální plochy	[m]
y	Vzdálenost elementu dy od těžiště	[m]
z_r	Součinitel rozšíření původního průřezu	[-]
z_z	Součinitel ztenčení	[-]
α	Vnitřní úhel ohybu	[°]
α_1	Úhel ohnuté součásti	[°]
α_2	Úhel součásti po odpružení	[°]
β	Úhel odpružení materiálu	[°]
γ	Vnější úhel ohybu	[°]
Δt	Ztenčení stěny	[%]
ε	Mezní poměrné přetvoření krajních tahových vláken	[-]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	Poloměr neutrální plochy	[mm]
ρ_1	Poloměr neutrální plochy před odpružením	[mm]
ρ_2	Poloměr neutrální plochy po odpružení	[mm]
ρ_s	Poměr poloměru ohybu k vnějšímu poloměru trubky	[-]
σ	Tahové, tlakové napětí	[Pa]
$\bar{\sigma}_k$	Extrapolovaná mez kluzu	[Pa]
φ	Úhel ohnutého úseku	[°]