

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE PRO OHÝBÁNÍ NESYMETRICKÉHO OCELOVÉHO PROFILU

TECHNOLOGY FOR BENDING UNSYMETRIC PROFILE OF STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ WALACH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILAN DVOŘÁK, CSc.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Walach Lukáš: Technologie pro ohýbání nesymetrického ocelového profilu.

Tato diplomová práce řeší stanovení procesních parametrů zadaného ohýbaného profilu včetně výpočtu odpružení a hlavně ohýbací síly. Hodnotí rozdíly a výhody dvou různých variant technologie výroby ohýbaného dílce. Prostého ohýbání a technologie zakružování. Navržený technologický postup obsahuje technicko-ekonomické zhodnocení a je doplněn výkresovou dokumentací.

Klíčová slova: ohýbání, zakružování, ocelový profil

ABSTRAKT

Walach Lukáš: Technology for bending unsymetric profile of steel

The present thesis deals with the determination of procedural parameters of given bending profile including the calculation of spring-back, especially the bending force. It compares the differences and the benefits of two different technologies of producing a blank, the simple bending and the technology of rolling. The technological process suggested involves technical-economical evaluation, supplemented with the drawing documentation.

Keywords: bending, rolling, profile of steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Walach Lukáš: *Technologie pro ohýbání nesymetrického ocelového profilu*. Brno, 2008. 94 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 20.5.2008

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Také děkuji panu prof. Ing. Radku Samkovi, CSc., Ing. Marku Šronerovi, Ph.D. a Ing. Václavu Jandlovi za jejich odborné konzultace. Velké poděkování patří mým rodičům, snoubence a všem blízkým, kteří mne podporovali ve studiu na vysoké škole.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1. Úvod	11
2. Deformace kovů a aproximační diagramy.....	12
2.1. Deformace kovů.....	12
2.1.1. Krystalická stavba kovů.....	12
2.1.2. Polykrystalické a monokrystalické kovy	12
2.1.3. Pružná a plastická deformace.....	13
2.2. Aproximační diagramy.....	13
2.2.1. Hollomonova aproximace tahové zkoušky.....	13
2.2.2. Jedno-přímková aproximace.....	14
2.2.3. Dvou-přímková aproximace.....	14
2.2.4. Hodnoty potřebné při výpočtech aproximačních přímek.....	14
2.2.5. Pružně-plastický a tuho-plastický stav.....	15
3. Technologie ohýbání.....	16
3.1. Úvod do technologie ohýbání.....	16
3.2. Základní rozdělení na U a V ohyb.....	17
3.3. Volný ohyb.....	17
3.3.1. Varianty ohýbání volného ohybu – Ohyb s přídavným tahovým napětím... 18	
3.3.2. Varianty ohýbání volného ohybu – Kalibrace.....	19
3.3.3. Parametry při volném ohybu – Ohybový moment vnitřních sil.....	20
3.3.4. Parametry při volném ohybu – Ohybová síla.....	21
3.3.5. Parametry při volném ohybu – Poloměr neutrálního vlákna.....	23
3.3.6. Parametry při volném ohybu – Minimální poloměr ohybu.....	24
3.3.7. Parametry při volném ohybu – Maximální poloměr při ohybu.....	25
3.3.8. Parametry při volném ohybu – Vůle mezi činnými částmi ohýbadel.....	26
3.3.9. Nástroje pro ohýbání.....	26
3.4. Tří bodový ohyb.....	29
3.4.1. Technologičnost ohýbaných součástí.....	29
3.5. Zakružování.....	31
3.5.1. Dvouválcové zakružovačky – zakružování s nepevným nástrojem.....	31
3.5.2. Principy tříválcových zakružovaček.....	33
3.5.3. Základní technologické parametry u zakružování na tříválcové zakružovače.....	35

3.5.4. Princip čtyřválcové zakružovačky	37
4. Odpružení	37
4.1. Úvod do problematiky odpružení.....	37
4.2. Metody zjištění velikosti odpružení při ohybu.....	38
4.2.1. Přibližný výpočet úhlu odpružení.....	38
4.2.2. Výpočet odpružení při velkém poloměru ohybu.....	39
4.2.3. Zjištění odpružení pomocí koeficientu K' a diagramu s tímto koeficientem.....	39
4.2.4. Určení úhlu odpružení z experimentálně určených diagramů.....	41
4.3. Eliminace odpružení	41
5. Technologie ohýbání profilů.....	42
5.1. Tvary profilů.....	42
5.2. Zvláštnosti při ohýbání profilů.....	43
5.3. Zakružování profilů.....	44
5.3.1. Symetrické tříválcové zakružování profilů.....	44
5.3.2. Nesymetrické zakružování tenkostěnných profilů.....	45
5.3.3. Mezní diagramy při zakružování.....	46
5.4. Ohýbání nabalováním s předpětím.....	46
5.5. Nabalování profilů pomocí výkyvných ramen.....	47
5.6. Patenty pro ohýbání profilů.....	48
6. Charakteristiky zadané součásti.....	48
6.1. Materiál součásti.....	48
6.1.1. Označení oceli.....	49
6.1.2. Vlastnosti oceli.....	49
6.1.3. Chemické složení.....	50
6.2. Rozbor geometrie a rozměru ohýbaného profilu.....	50
7. Volba technologií a technologických postupů.....	52
7.1. Technologický postup Fáze I	52
7.2. Technologický postup Fáze I a Fáze II se zaměřením na Fázi II.....	53
7.2.1. Technologický postup pro ohýbání profilu v lisovacím nástroji	53
7.2.2. Technologický postup pro ohýbání profilu zakružováním.....	54
8. Stanovení procesních parametrů tváření profilu.....	55
8.1. Výpočet těžiště profilu.....	55
8.1.1. Výpočet pomocí programu Solid Works.....	55
8.1.2. Výpočet těžiště grafickou metodou.....	55
8.1.3. Matematický výpočet těžiště.....	56

8.1.3.1. Výpočet obsahů části ploch příčného průřezu profilu.....	56
8.1.3.2. Výpočet statických momentů.....	57
8.1.3.3. Výpočet polohy těžiště.....	58
8.2. Kvadratické momenty v těžišti profilu.....	58
8.2.1. Výpočet kvadratického momentu v ose x.....	58
8.2.2. Výpočet kvadratického momentu v ose y.....	59
8.2.3. Výpočet kvadratického deviačního momentu.....	60
8.2.4. Výpočet kvadratického polárního.....	61
8.3. Poloha neutrálního vlákna.....	61
8.4. Výpočet ohybové síly na mezi kluzu dle pružnosti pevnosti.....	62
8.4.1. Statické rovnice rovnováhy.....	62
8.4.2. Výpočet ohybového napětí respektive odvození pružné ohybové síly.....	62
8.5. Výpočet pružného průhybu w	64
8.5.1. Výpočet ohybových momentů a následných parciálních derivací pro úseky I a II.....	64
8.5.2. Výpočet průhybu w v bodě působení síly F.....	64
8.5.3. Výpočet průhybu dle lit. [26]	65
8.6. Výpočet pružné ohybové síly dle teorie ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění.....	66
8.6.1. Výpočet ohybového momentu a ohybové síly ve fázi pružného ohybu.....	67
8.7. Deformace podél průřezu profilu.....	68
8.7.1. Vlákná na vnější a vnitřní straně profilu.....	68
8.7.2. Vzorový výpočet deformace.....	69
8.7.3. Průběh deformací podél průřezu profilu.....	69
8.8. Výpočet skutečného ohybového napětí z aproximačních diagramů.....	70
8.8.1. Výpočet logaritmické deformace.....	70
8.8.2. Výpočet skutečného ohybového napětí pomocí Hollomonova aproximace...70	
8.8.3. Výpočet skutečného ohybového napětí pomocí jedno-přímkové aproximace70	
8.8.4. Výpočet skutečného ohybového napětí pomocí dvou-přímkové aproximace.70	
8.9. Výpočet ohybové síly ze skutečného ohybového napětí.....	71
8.10. Výpočet celkové síly pro ohyb.....	72
8.11. Výpočet kalibrační síly.....	73
8.12. Výpočet maximální ohybové síly pro návrh stroje.....	73
8.13. Výpočet odpružení.....	74
9. Návrh tvářecího nástroje a stroje.....	74
9.1. Návrh tvářecího nástroje.....	74
9.1.1. Návrh lisovacího nástroje.....	74
9.1.2. Návrh zakružovacích kladek.....	75
9.2. Návrh tvářecího stroje.....	75
9.2.1. Návrh tvářecího stroje pro ohýbání na lisovacím nástroji.....	75
9.2.2. Návrh tvářecího stroje pro ohýbání zakružováním.....	75

10. Technicko – ekonomické zhodnocení	76
10.1. Technické zhodnocení	76
10.2. Ekonomické zhodnocení	76
10.2.1. Varianta ohýbání na lisovacím nástroji	76
10.2.1.1. Nezávislé náklady	76
10.2.1.2. Závislé náklady	76
10.2.2. Varianta ohýbání na zakružovacím nástroji	78
10.2.1.1. Nezávislé náklady	78
10.2.1.2. Závislé náklady	79
10.2.3. Výpočet počtu kusů se stejnými náklady pro obě varianty výroby	81
11. Závěr	82
Seznam použitých symbolů a zkratk	84
Seznam použité literatury	90
Seznam příloh	91
Příloha 1	92
Příloha 2	93
Příloha 3	94
Sestava nástroje pro ohyb profilu	S0-50/51-20/01
Sestava nástroje pro ohyb profilu	S0-50/51-20/02
Výkres kladky 1	V4-50/51-20/01
Výkres kladky 2	V3-50/51-20/02
Výkres kladky 3	V3-50/51-20/03
Výkres ohnutého profilu	V3-50/51-20/04

1. Úvod

Technologie tváření kovů je velice široká oblast členící se na mnohá odvětví. V úplném základu je technologie tváření rozdělena na tváření objemové a tváření plošné. Tedy je rozlišováno, zda dojde k výraznému přemístování objemu či nikoli. Tato diplomová práce je zaměřena na tváření plošné. Tedy zabývá se tvářením kovů, kde nedochází k výraznému přemístění materiálu.

Taktéž toto plošné tváření je možné rozdělit na mnohé specifické procesy tváření plechů trubek profilů či jiných polotovarů. Tato diplomová práce se konkrétně zabývá dvěma technologiemi:

- Ohýbáním
- Zakružováním

Je potřeba nejprve poznat děje, které nastávají při průběhu tváření těmito technologiemi. Vyhodnotit procesní parametry, které je třeba nejenom znát, ale také správně určit, aby bylo možné zhotovit kvalitní součást dle zadaného výkresu. Tato práce je zajímavá tím, že se nezabývá pouze jednoduchým ohýbáním respektive zakružováním pásů plechu či tyčí, ale zabývá se ohybem nesymetrického profilu.

Jelikož je zadaný problém je do určité míry komplikovaný a mnohé výrobní podniky neustále hledají optimální postupy výroby je potřeba při řešení problému použít různé postupy či metody řešení. Vyhodnotit výsledky, zvolit optimální variantu a provést vše nezbytné, aby byl problém vyřešen.

Francouzský básník a esejista Paul Ambroise Valéry kdysi řekl:

Nesmyslná bádání jsou příbuzná s netušenými objevy.

Myslím, že tento citát v mnohém vypovídá i o technickém odvětví. Protože pro vyřešení problému je mnohdy potřeba velkého úsilí, dlouhodobých pokusů a mnohých nezdarů, které nakonec mohou vést ke zdárným výsledkům.

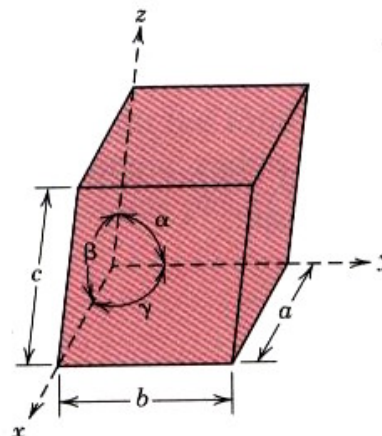
2. Deformace kovů a aproximační diagramy [19] [8]

2.1. Deformace kovů

Deformací kovů rozumíme změnu tvaru materiálu. Tedy dochází k posouvání či přemisťování atomů v krystalické stavbě kovů. Tato deformace vzniká působením napětí na daný prvek. Tyto deformace lze rozdělit do dvou skupin. Pružné deformace, které jsou malé a po ukončení působení síly se materiál vrací do původního stavu. A deformace plastické, u kterých dochází k trvalým změnám. Plastické deformace jsou větší než deformace pružné a při překročení určité meze dochází k porušení materiálu. Pro hlubší posouzení je potřeba znát krystalickou stavbu kovů a to z toho důvodu, že vlastnosti kovů výrazně závisí na krystalické stavbě.

2.1.1. Krystalická stavba kovů

Základními prvky této struktury jsou krystalická mřížka a elementární buňka. Krystalické materiály jsou charakteristické pravidelným uspořádáním. Tedy atomy jsou uspořádány v jednotlivých uzlech krystalické mřížky. Elementární buňka je vymezena třemi délkovými parametry a třemi úhlovými parametry.



Obr. 2.1.1.1. Elementární buňka [19] Obr. 2.1.1.2. Parametry elementární buňky [19]
 kde: α, β, γ - úhlové parametry mřížky
 a, b, c - délkové parametry mřížky

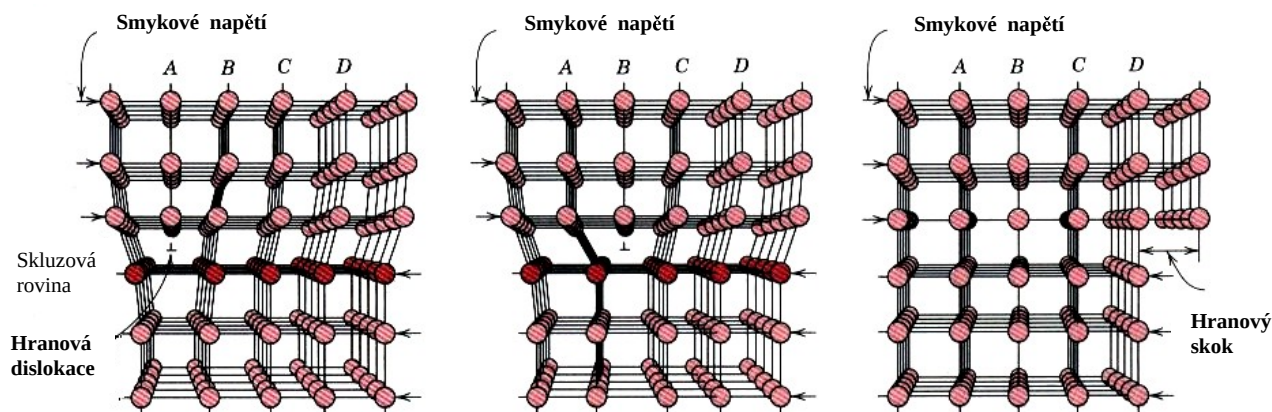
Rozlišujeme 7 krystalografických soustav. Soustavu krychlovou (kubickou), šesterečnou (hexagonální), trojklonnou (triklinickou), jednoklonnou (monoklinickou), kosočtverečnou (ortorombickou), čtverečnou (tetragonální) a trigonální, neboli klencovou (romboedrickou). U kovů a jejich slitin se vyskytují 3 základní soustavy: krychlově plošně středěná FCC, krychlově prostorově středěná BCC a šesterečnou mřížku HCP.

2.1.2. Polykrystalické a monokrystalické kovy

Rozdíl mezi polykrystalickými a monokrystalickými kovy spočívá v uspořádání jednotlivých elementárních buněk. Pokud elementární buňky plynule translačně navazují a nedochází ke vzájemnému natáčení, jedná se o monokrystalický materiál. A tedy struktura se jeví jako jeden celistvý krystal. Pokud ale pozorujeme u zrn různou orientaci, jedná se o materiál polykrystalický.

2.1.3. Pružná a plastická deformace

Jak již bylo řečeno tak deformaci lze dělit na pružnou a plastickou. U pružné deformace se závislosti mezi napětími a deformacemi řídí dle Hookova zákona. Vznik plastické deformace je charakterizován dvěma mechanismy. Kluzem a dvojčatěním. Důležitým faktorem při deformaci jsou dislokace. Jedná se o čárové poruchy, jejichž posuvem se zmiňovaná deformace výrazně ovlivňuje.



Obr. 2.1.3.1. Pohyb dislokace při smykovém namáhání mřížky [19]

Z obr. 2.1.3.1. je zřejmé že působením smykového napětí dochází k posuvu dislokace, kde v prvních dvou obrázcích dochází k pružné deformaci, ale když dojde k deformaci větší, než je vzdálenost atomů dojde k nevratnému jevu plastické deformace.

Toto také vyplývá z tahových diagramů. Pokud překročíme mez kluzu, začne docházet k nevratným plastickým deformacím a při následném zvyšování napětí k lomu. U polykrystalů je vznik plastické deformace spjat s orientací zrn. Plastická deformace začne vznikat, kde jsou optimálně natočená zrna vůči maximálnímu smykovému napětí. Při jednoosém zatěžování, je optimální orientace natočení zrn 45° . Zrna, která nemají tuto orientaci, se budou deformovat pružně a při dosažení tohoto optimálního natočení, se začnou deformovat plasticky.

2.2. Aproximační diagramy [18]

2.2.1. Hollomonova aproximace tahové zkoušky

V technické praxi je potřeba pro řešení různých problémů znát závislost napětí na logaritmickém přetvoření $\bar{\sigma} = f(\varphi)$. Tato závislost je základní charakteristikou materiálu a je zjišťována tahovými zkouškami zejména v plošném tváření. Tuto křivku lze různými způsoby aproximovat.

Jedním ze způsobů je mocninná Hollomonova aproximace

$$\bar{\sigma} = K \cdot \varphi^n \quad (2.2.1.1.)$$

kde: K - materiálová konstanta,

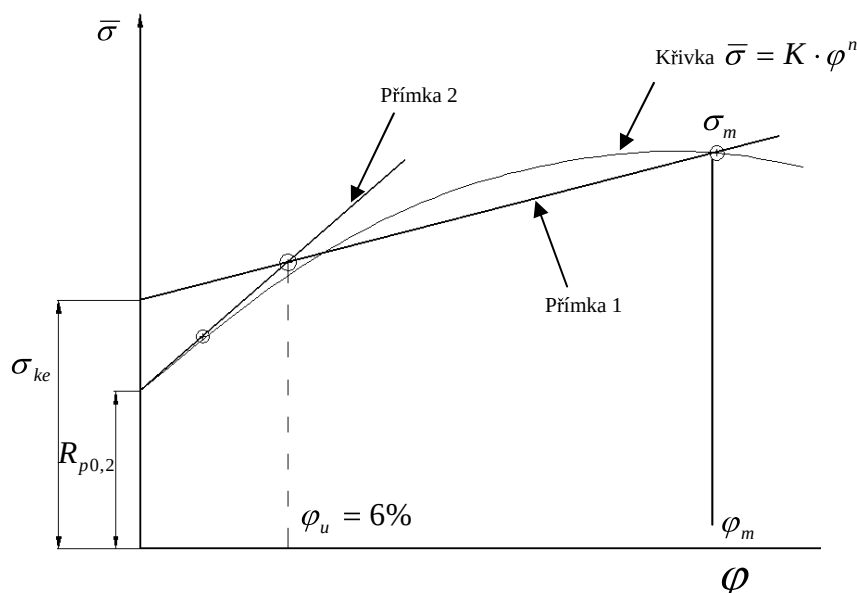
n - exponent zpevnění

$\bar{\sigma}$ - deformační napětí

φ - logaritmické přetvoření

Tento exponenciální tvar rovnice, ale vnáší do dalších výpočtů komplikace. Proto byly vytvořeny další jednodušší aproximace ve tvaru přímkovém.

Na obr. 2.2.1.1. jsou vyznačeny tři aproximace. Holomonova aproximace začíná v bodě meze kluzu $R_{p0,2}$ u tlaku jak je tomu na obr. 2.2.1.1. nebo v 0 u tahu.



Obr. 2.2.1.1. Schéma jednotlivých aproximací přirozených deformačních odporů napětí [18]

2.2.2. Jedno-přímková aproximace

Tato jedno přímková aproximace, je vytvořena dvěma body, extrapolovanou mezí kluzu σ_{ke} a mezí pevnosti σ_m . Přesněji řečeno popsána rovnicí:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{ke} + D\varphi \quad (2.2.2.1)$$

Bod σ_m nastává při poměrné deformaci $\varepsilon_m = e^n - 1$ kdy začne docházet k vytvoření krčku. Jedno-přímková aproximace charakterizuje tuho-plastický stav. Tato aproximace, ale špatně aproximuje malé deformace, proto byla vytvořena druhá varianta, dvou-přímková aproximace. Tato jedno-přímková aproximace je označena na obr. 2.2.1.1. jako Přímka 1.

2.2.3. Dvou-přímková aproximace

Zde je vytvořena ještě druhá přímka. Spojuje smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a je tečnou ke křivce popsané rovnicí (2.2.1.1). Mezní bod, který rozděluje oblast použití první či druhé přímky je jejich průsečík. V tomto bodě dosahuje deformace $\varphi = 6\%$; tato hodnota byla zjištěna z experimentálních zkoušek různých materiálů tab. 1. Matematické vyjádření této aproximační přímky je následující:

$$\bar{\sigma} = R_{p0,2} + D'\varphi \quad (2.2.3.1)$$

2.2.4. Hodnoty potřebné při výpočtech aproximačních přímek

Hodnota D značí modul zpevnění pro přímku 1 a D' modul zpevnění pro přímku 2.

Tedy znamenají tangenty úhlů, které svírají přímky s horizontální osou. Hodnoty pro výpočty jedno-přímkové a dvou-přímkové aproximace lze odvodit ze známých parametrů materiálové konstanty K a exponenciálního zpevnění n , posléze se tyto hodnoty vypočítají dle vztahů:

Extrapolovaná mez kluzu:

$$\sigma_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n [\text{MPa}] \quad (2.2.4.1)$$

Moduly zpevnění:

Modul zpevnění pro jedno-přímkovou aproximaci

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n [\text{MPa}] \quad (2.2.4.2)$$

Modul zpevnění pro dvou-přímkovou aproximaci

$$D' = K \cdot n \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}} \right]^{\frac{1-n}{n}} [\text{MPa}] \quad (2.2.4.3)$$

Kritériem pro rozdělení ostrého či volného ohybu může být také deformace $\varphi = 6\%$ pokud je deformace menší než 6% jedná se o volný ohyb. Pokud je tato deformace větší než 6%, jedná se už o ostrý ohyb. Tato deformace nastane v průsečíku přímek 1 a 2.

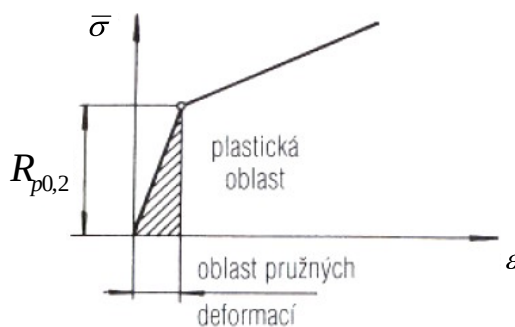
Materiál ČSN	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	K [MPa]	n [-]	σ_{ke} [MPa]	D [MPa]	D' [MPa]
14 140.3	292	614	1189	0,249	505	1343	8524
14 331.3	340	626	1188	0,250	504	1344	5345
12 050.0	369	685	1233	0,232	548	1426	6477
17 246.1	223	573	1077	0,356	354	1100	2990

Tab. 1. Tabulka výše uvedených parametrů pro některé oceli [18]

2.2.5. Pružně-plastický a tuho-plastický stav

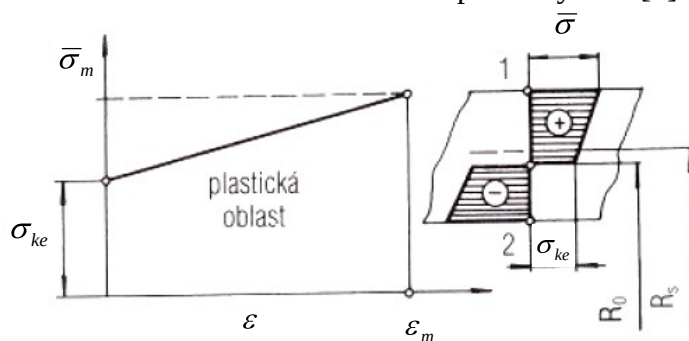
Při pružně-plastickém stavu se počítá s tím, že dochází jak k pružným tak k plastickým deformacím. U aproximace tuho-plastické zanedbáváme pružná napětí, protože deformace plastická je mnohem větší.

Parametrem při ohybu pro přijetí vhodného kritéria je poměr R_2 / t viz obr. 3.1.1.



Obr. 2.2.5.1. Pružně plastický stav [5]

Volný ohyb splňuje podmínku $R_2 / t > (6 \text{ až } 12)$ a tomuto ohybu odpovídá pružně-plastický stav. Ostrý ohyb splňuje podmínku $R_2 / t < (6 \text{ až } 12)$ a odpovídá mu tuho-plastický charakter. V případě pokud je splněna podmínka $R_2 / t \leq 3$ nebere se v úvahu posun neutrální vrstvy.



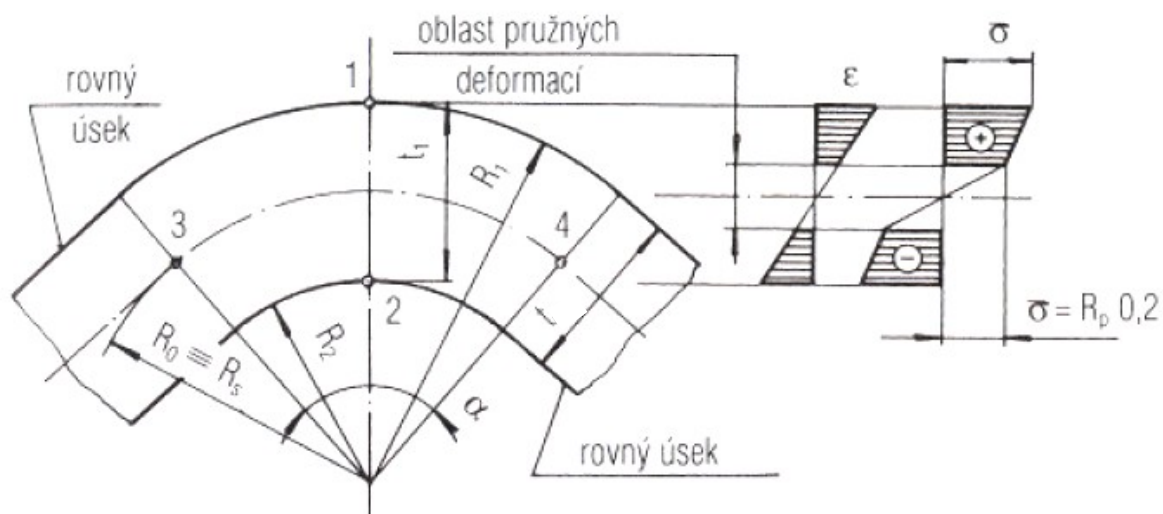
Obr. 2.2.5.2. Tuho plastický stav [5]

3. Technologie Ohýbání

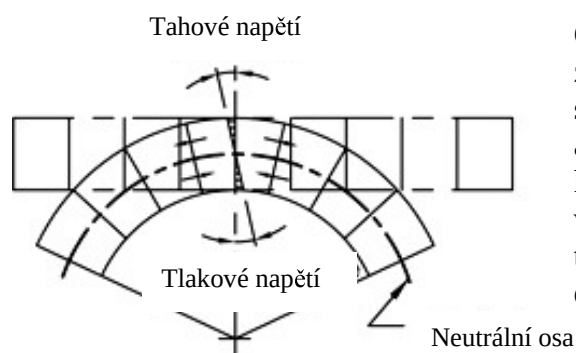
3.1. Úvod do technologie ohýbání [1] [5]

Technologie ohýbání je trvalá deformace materiálu za působení ohybové síly od ohybového momentu. Tato síla je převedena na nástroj a následně v polotovaru vyvolá požadovanou deformaci polotovaru. Ohýbání se provádí většinu za studena u menších průřezů polotovaru, ale u materiálů, které mají větší pevnost, či rozměry se ohýbá za tepla. Při ohýbání dochází k pružně - plastickým deformacím. Tato skutečnost není příliš příznivá, protože dochází ke změně rozměrů po ukončení působení sil vlivem odpružení. Pružné deformace se vyrovnají. Ohýbaný dílec můžeme rozdělit na oblast deformovanou a nedeformovanou. Deformovaná oblast je znázorněna v obrázku obr. 3.1.1. ze kterého je zřejmé, že deformovat se bude pouze oblast mezi body 3-4.

V některých případech lze využít přídavných tahových napětí, k tomu abychom docílili odstranění tlakových napětí v průřezu. Přidáním tahové síly se průběh napětí upraví na pouze kladné hodnoty a v materiálu dochází pouze k tahovým napětím.



Obr. 3.1.1. Ohyb součásti [5]



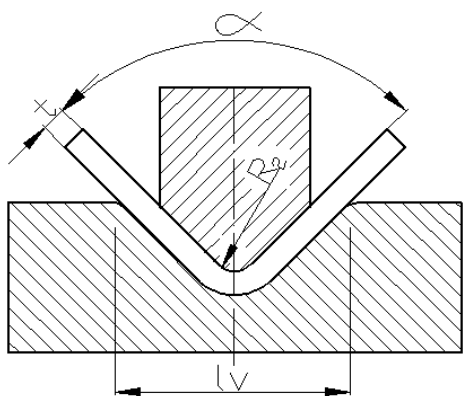
Obr. 3.1.2. Popis tahových a tlakových napětí [12]

Charakteristickým znakem ohýbání je fakt, že dochází ke dvojímu napětí v průřezu součásti, jak je tomu na obrázcích obr. 3.1.1. a obr. 3.1.2. Tedy na vnější části dochází k tahovým napětím, vlákna se natahují. Na vnitřní části od neutrální osy dochází k tlakovým napětím. V místě neutrální osy je deformace nulová.

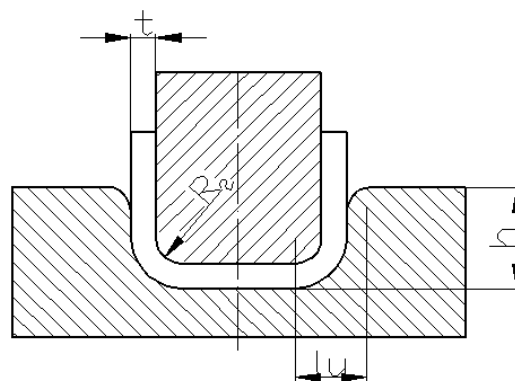
Délka neutrálního vlákna je před i po ohýbání stejná. Díky tomuto faktu lze jednoduše počítat délku výchozího polotovaru.

3.2. Základní rozdělení na U a V ohyb [1]

Ohýbání do tvaru U a V jsou základní ohýbací operace. Pro každou z nich se počítá síla či odpružení jiným způsobem. Tyto dvě operace jsou základními typy, podle kterých se konstruuje nástroje a provádí technologie. Jak lze vidět na obrázku. Princip této technologie je takový, že horní nástroj vtlačuje plech či jiný polotovar do dutiny spodního nástroje a vytváří požadovaný ohyb.

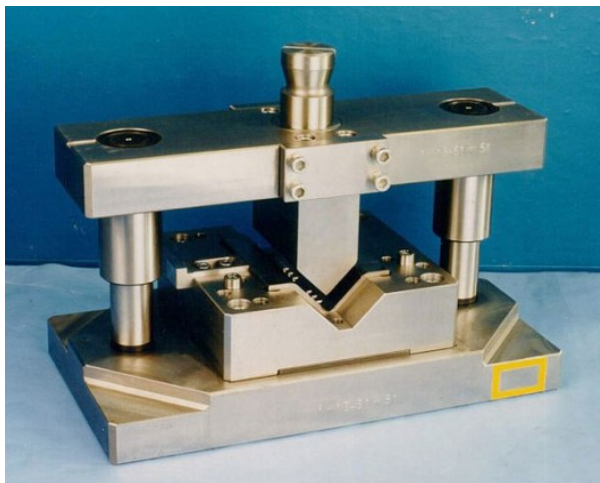


Obr. 3.2.1. Ohyb do V tvaru



Obr. 3.2.2. Ohyb do U tvaru

Na obr. 3.2.3. je znázorněný příklad jednoduchého ohybadla do tvaru V. Bližšímu popisu jednotlivých částí ohýbacího nástroje se věnuje bod níže uvedený.



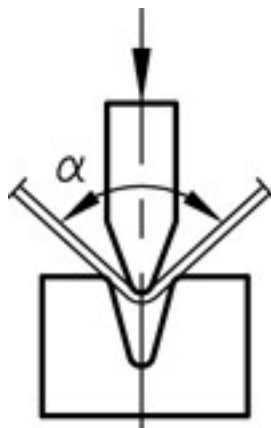
Obr. 3.2.3. Nástroj pro ohýbání do V tvaru [20]

3.3. Volný ohyb [12] [1]

Horní část nástroje, ohybník, vtlačuje svůj vrchol do polotovaru a následně se dále posouvá do spodní části nástroje, ohybnice, v předem určené hloubce. Takto vytváří ohyb na polotovaru. Tato metoda je druh tříbodového ohybu, kde ke kontaktu mezi nástrojem a polotovarem dochází pouze v místech zaoblení horního a spodního nástroje. Úhel horního a spodního nástroje nemusí být stejný. V některých případech dokonce ve spodním nástroji nemusí být dutina ve tvaru V, ale může být čtvercového tvaru. Toto je varianta, kdy lze současně nastavovat spodní část nástroje.

Velkou výhodou tohoto způsobu ohýbání je, že jedinou kombinací nástroje horního a spodního lze vyrobit různé tvary profilu, tedy různé produkty.

Jinými slovy jediným nástrojem můžeme u mnohých materiálů vytvořit řadu různých úhlů ohybu. Což je velice výhodné a tento fakt dělá z volného ohybu velice flexibilní způsob ohýbání. Není potřeba četných výměn nástrojů i při různých výrobcích, čím se nám velice zvyšuje produktivita. Taktéž výhodné je, že potřebujeme menší síly ohybu, proto lze nástroje vyrábět s větší štíhlostí. Také výkony strojů jsou menší, což znamená, že nemusíme kupovat drahé stroje. Tato metoda, má ale taktéž své nevýhody. Přesnost výlisku není moc velká. Dochází zde ke změně tloušťky výlisku a také k opotřebení špičky vrcholu horního nástroje a místnímu opotřebení spodního nástroje. Tyto faktory mají za následek nepříjemné úchylny na výrobcích.



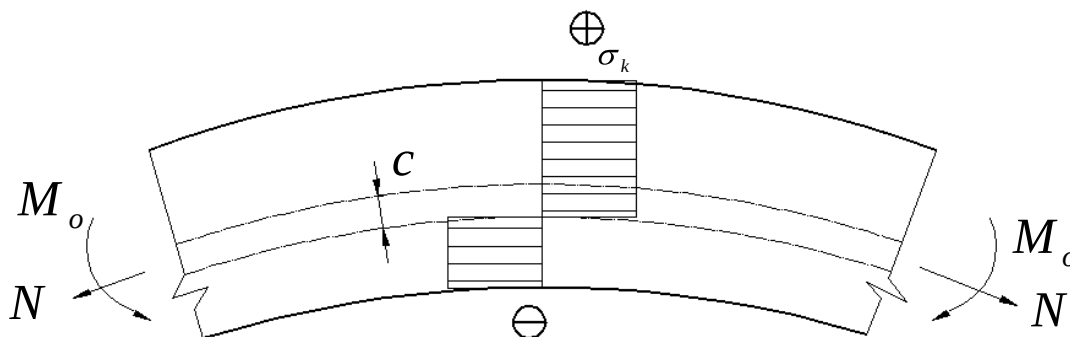
Obr. 3.2.2.1. Volný ohyb [12]

Dochází zde také k odpružení. K tomu, aby bylo dosaženo maximální úhlové přesnosti, volí se hodnota šířky V otevření 6t pro plechy do tloušťky 3mm a 12t pro plechy tloušťky větší než 10mm. Úhlová přesnost, kterou jsme schopni volným ohybem docílit je zhruba okolo $\pm 30'$. Poloměr ohybu není určený tvarem nástroje, ale je závislý na pružnosti materiálu. Normálně jsou poloměry ohybu někde mezi (1t - 2t). Technologie je založená na vysoké flexibilitě a relativně nízkých požadavcích na stroje.

Trh stále více posouvá tváření plechu k volnému ohýbání. Značné nevýhody jsou eliminovány použitím různých opatření, jako jsou měřicí systémy úhlu, dokončovací systémy, nastavitelné jak v ose x , tak y a používání nástrojů odolných proti opotřebení.

3.3.1. Varianty ohýbání volného ohybu – Ohyb s přidavným tahovým napětím [25]

Přidáním osově tahové síly k ohýbanému momentu, se snažíme odstranit tlakové napětí v průřezu ohýbaného výlisku.



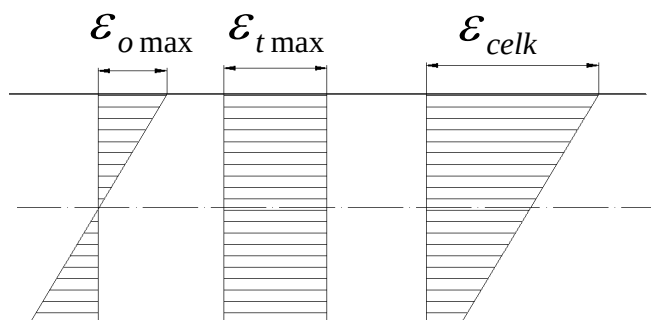
Obr. 3.3.1.1. Schéma napěťových a silových poměrů při ohybu s tahem bez zpevnění

U této metody jsou jednotlivé výpočty momentů, odpružení, či neutrálního vlákna odlišné od jednoduchého ohýbání. Například posun neutrálního vlákna c je přímo úměrný zatěžující tahové síle. Čím je tato síla větší, tím je větší i posun neutrálního vlákna. viz bod. 3.3.5.

Existují dva způsoby provedení této technologie:

A. Vytvoření ohybu a následného přidání tahové síly

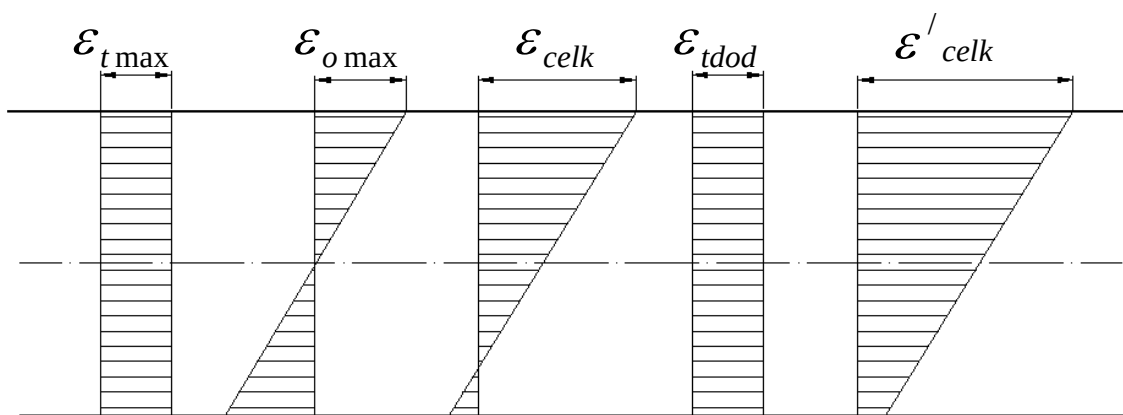
Tento způsob je jednodušší, protože výlisek je nejprve ohýbán a následně se přidá tahové napětí, které docílí požadovaný stav.



Obr. 3.3.1.2. Schéma deformací při metodě ohyb + tah

B. Vytvoření tahové síly a následně ohybu

U tohoto způsobu může nastat problém v nesprávném zvolení velikosti tahové síly. Protože dochází k vytvoření tahového napětí a následného ohybu. Pokud je toto tahové napětí malé a nepostačí k odstranění tlakových napětí při ohybu, je nutné další tahové zatěžování, aby bylo docíleno tahového napětí v celém průřezu výlisku.



Obr. 3.3.1.3. Schéma deformací při metodě tah + ohyb

3.3.2. Varianty ohýbání volného ohybu – Kalibrace [12] [1] [5]

Kalibrace je jedna z operací, kterou docílíme kvalitnější a přesnější výrobek. Provádí se tak, že dojde k dalšímu stlačení ohnutého dílce pohyblivým nástrojem respektive ohybníkem. Materiál je tlačén nástrojem do otvoru spodního nástroje.

Po vytvoření ohybu dojde ke zvýšení síly a to až na dvojnásobek či trojnásobek síly ohýbací jak je zřejmé z obr. 3.3.4.2. Kalibrací se snažíme zpřesnit rozměry či eliminovat

odpružení. Kalibrování vyžaduje mnohokrát vyšší ohýbací sílu, než je tomu u volného ohybu. Mnohdy je potřeba, pět až desetkrát vyšší sílu a v nějakých příkladech, dokonce 25 až 30 krát vyšší sílu, než u volného ohybu. Kalibraci lze snížit odpružení skoro až k nule v celém průřezu ohýbaného polotovaru. Tedy úhel ohybu a úhel funkčních částí nástroje jsou identické. Šířka V otevření se pohybuje obvykle kolem hodnoty 5t, větší hodnota V otevření by znamenala, že by hloubka dutiny musela být větší, aby bylo možno vytvořit požadovaný úhel. Tento fakt by znamenal snížení rychlosti a tedy produktivity technologie.

3.3.3. Parametry při volném ohybu – Ohybový moment vnitřních sil [18]

Moment vnitřních sil ostrého ohybu

U ohýbání se jedná o ostrý ohyb, pokud je splněna podmínka $R_2 / t < (6 - 12)$. Čím je tento ohyb volnější tedy poměr se blíží k hodnotě 12 je rovnice (3.3.3.2) méně přesná a je potřeba použít rovnici pro ostrý ohyb.

$$M_{oo} = \frac{1}{4} b t^2 \sigma_{ke} + \frac{D}{R_0} \frac{b t^3}{12} [Nmm] \quad (3.3.3.1)$$

kde:

σ_{kl} - extrapolovaná mez kluzu

D - modul zpevnění,

b - šířka pásu

t - tloušťka pásu

Moment volného ohybu

U výpočtu tohoto momentu je musí být splněna podmínka $R_2 / t > (6 - 12)$ tedy podmínkou jsou větší poloměry ohybu. Jedná se o pružně-elastický ohyb bez zpevnění, jenž se vypočítá:

$$M_{ov} = \frac{b \cdot t^2}{4} \cdot R_{p0,2} + \frac{1}{12} \frac{D'}{R_0} \frac{b \cdot t^2}{12} [Nmm] \quad (3.3.3.2)$$

Ohybový moment v oblasti intervalu $R_2 / t = (6 - 12)$

Pro přesnější vyjádření ohybového momentu vnitřních sil byla vytvořena rovnice, která zahrnuje obě aproximace. Tento moment se vypočítá:

$$M_{oo/ov} = M_{oo} + b \cdot \left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{\max}} \cdot \frac{t}{2} \right)^2 \cdot (R_{p0,2} - \sigma_{ke}) + \frac{2}{3} b \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{\max}} \cdot \frac{t}{2} \right)^2}{R_0} \cdot (D' - D) [Nmm] \quad (3.3.3.3)$$

Ohybové momenty dle Boljanoviče [10] a Forejta [8]

Výpočet ohybových momentů je zjednodušen na výpočet bez zpevnění. Oba tito autoři uvádějí pro tři různé stavy stejné vztahy.

V oblasti ideálně pružně-plastické uvádí výpočet ohybového momentu následně:

$$M_{opp} = \frac{Re \cdot b}{12} \left[3 \cdot t^2 - 4 \cdot \left(\frac{Re \cdot R_0}{E} \right)^2 \right] [Nmm] \quad (3.3.3.4)$$

pro ideálně plastický ohyb uvádí:

$$M_{opl} = \frac{Re \cdot b \cdot t^2}{4} [Nmm] \quad (3.3.3.5)$$

a pro ideálně pružný ohyb uvádí:

$$M_{opr} = \frac{Re \cdot b \cdot t^2}{6} [Nmm] \quad (3.3.3.6)$$

3.3.4. Parametry při volném ohybu – Ohybová síla [1] [4] [8] [10]

Ohýbací síla je síla, kterou potřebujeme k vytvoření požadovaného ohybu. Závisí jak na způsobu ohybu, tak na geometrii nástroje, ohýbaném materiálu a tření mezi nástrojem a polotovarem. Mnozí autoři se liší ve výpočtu této síly. Výpočty jsou zaměřeny pouze na V ohyb. Například norma ČSN 22 7340 [4] uvádí následující vztahy.

$$F_o = \frac{R_e \cdot b \cdot t^2}{2 \cdot R_2} \cdot tg \frac{\alpha}{2} [N] \quad (3.3.4.1)$$

Pokud použijeme přidržovač, je třeba ohýbací sílu navýšit o sílu přidržovače, která se vypočítá vztahem:

$$F_p = (0,25 - 0,35) \cdot F_o [N] \quad (3.3.4.2)$$

Další možný výpočet uvádí Forejt [8]. Výpočet ohýbací síly volného ohybu osamělou silou, tedy ohybu do tvaru V, rozděluje do dvou fází. První fází je pružný ohyb, kde ohýbací síla se vypočítá, pro úzké tyče:

$$F_{pr} = \frac{2}{3} \cdot \frac{b \cdot t^2}{l_v} \cdot \sigma_k [N] \quad (3.3.4.3)$$

a pro pásy široké:

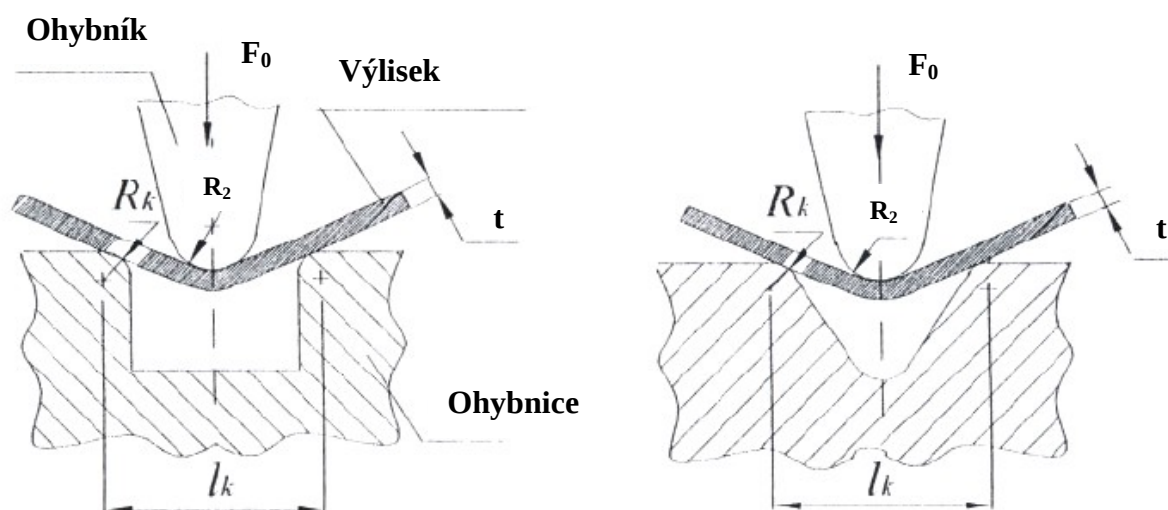
$$F_{pr}' = \frac{4}{3 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{b \cdot t^2}{l_v} \cdot \sigma_k [N] \quad (3.3.4.4)$$

Druhou fází je pružně - plastický ohyb, kde ohybová síla se vypočítá:

$$F_{opr-pl} = \frac{b \cdot t^2 \cdot \sigma_k (\sin \alpha / 2 + f \cdot \cos \alpha / 2) \cdot \sin \alpha / 2}{l_k - 2 \cdot (R_2 + R_k + t) \cdot \cos \alpha / 2} [N] \quad (3.3.4.5)$$

Boljanovič [10] při výpočtu ohýbací síly vychází z předem vypočtených momentů, u kterých rozděluje výpočet momentů podle pružně-plastického a čistě pružného stavu. Následně výpočet ohýbací síly se provede dle vzorce:

$$F_o = \frac{4 \cdot M_o}{l_k - 2(R_k + R_2 + t) \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \cos^2 \frac{\alpha}{2} [N] \quad (3.3.2.6)$$



Obr. 3.3.4.1. Rozměrové charakteristiky volného ohybu do tvaru V [10]

Modelový příklad

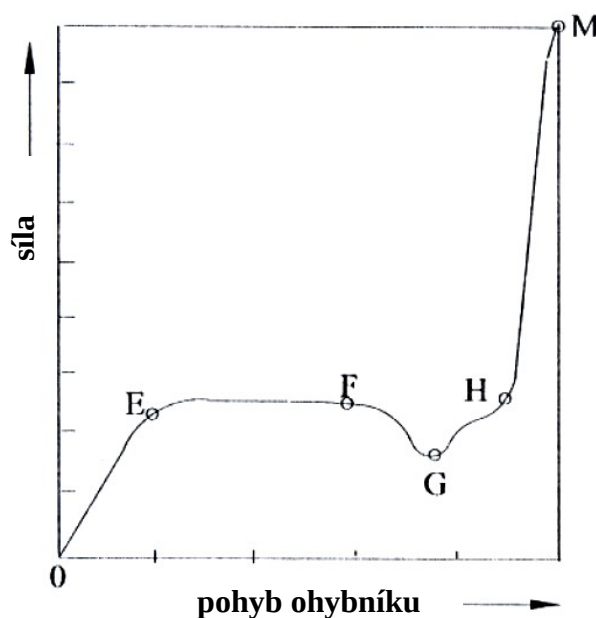
Pro srovnání jednotlivých metod výpočtu ohybové síly je uveden modelový příklad. Ohýbána je úzká tyč o rozměrech $b = 50\text{mm}$ $t = 1,5\text{mm}$ z oceli $R_e = 200\text{ MPa}$, $E = 2,1 \cdot 10^5$, třením $f = 0,2$ ohybu $\alpha = 60^\circ$, poloměrem ohybu $R_2 = 20\text{mm}$, rozměry nástroje $R_k = 10\text{mm}$, $l_k = 100\text{ mm}$

fáze ohybu autor	pružný	Pružně - plastický
ČSN 22 7340[4]	-	$F_o = 324,76\text{N}$
Forejt[8]	$F_o = 150\text{N}$	$F_o = 167\text{N}$
Boljanovič[8]	$F_o = 164,2\text{N}$	$F_o = 246\text{N}$

Tab. 2. Srovnání různých přístupů výpočtu ohybové síly

Průběh ohybové síly

Průběh ohýbací síly je znázorněn na obr. 3.3.4.2. Lze z něj usoudit, že tento průběh se bude skládat z několika částí. Část 0 – G znázorňuje volné ohýbání a lze ji rozdělit na část, kde dochází k pružným deformacím 0-E. Následuje část, kde je ohybová síla obvykle konstantní E-F. V Bodě G dochází k poklesu síly z důvodu klouzání materiálu. Mezi body G-H je výlisek již ohnut. Pokud po volném ohybu má následovat kalibrace dochází k výraznému nárůstu síly H-M.



Obr. 3.3.4.2. Průběh ohýbací síly [10]

3.3.5. Parametry při volném ohybu – Poloměr neutrálního vlákna [1] [2] [3] [4] [5]

Neutrální vlákno při ohybu zůstává stejně dlouhé. Vlivem ohýbání dochází u některých operací k posunu tohoto vlákna od středové osy součásti směrem k vnitřnímu ohybu součásti. Vše závisí na velikosti poměru R_2/t

a) pokud tento poměr je $R_2/t > 12$ tedy poloměry ohybu jsou velké, nedochází k výraznému posunu neutrálního vlákna a polohu tohoto vlákna lze počítat dle vzorce:

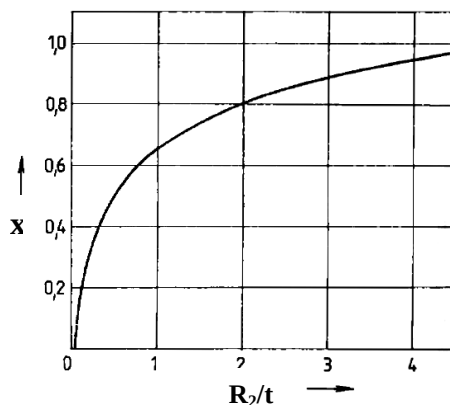
$$R_o = R_2 + \frac{t}{2} [mm] \quad (3.3.5.1)$$

b) při ohýbání malými poloměry $R_2/t < 6$ dochází ke změně tloušťky i průřezu a taktéž se posouvá neutrální vlákno. Poloměr se poté musí počítat dle vzorce:

$$R_o = R_2 + x \cdot \frac{t}{2} [mm] \quad (3.3.5.2)$$

kde: x - součinitel posunutí neutrálního vlákna.

Lze ho odečíst z grafu obr. 3.3.5.1.

Obr. 3.3.5.1. Graf závislosti součinitele x na poměru R_2/t

c) Kocman[5] uvádí výpočet poloměru s jiným koeficientem x , pro ocel, daný poměr R_2/t a úhel ohybu 90° .

$$R_2/t = 1 \quad x = 0,42$$

$$R_2/t = 3 \quad x = 0,46$$

$$R_o = R_2 + x \cdot t [mm] \quad (3.3.5.3)$$

d) Dvořák[3] uvádí výpočet poloměru neutrálního vlákna pro ohýbání s malými poloměry kde $R_2 \leq 6$. U této metody se počítá s vlivem deformace průřezu.

$$R_0 = \left(R_2 + \frac{t}{2} \right) \cdot z_z \cdot z_r [mm] \quad (3.3.5.4)$$

kde: $z_z = t_1 / t$ - součinitel ztenčení

$z_r = b_1 / b$ - součinitel rozšíření původního průřezu

t_1 – tloušťka po ohybu

b_1 – šířka po ohybu

e) posun neutrálního vlákna při ohýbání a přidavným tahovým napětím [25]

U této speciální technologie dochází k většímu posunu neutrálního vlákna, než je tomu u prostého ohýbání. Tento posun je přímo závislý na velikosti tahové síly N a lze ho vypočítat dle následující rovnice:

$$x = \frac{N}{\sigma_k \cdot 2 \cdot b} [mm] \quad (3.3.5.4)$$

3.3.6. Parametry při volném ohybu – Minimální poloměr ohybu [4] [5] [8]

Jedná se o nejmenší možný ohyb, který jsme schopni vytvořit na daném materiálu, geometrii či technologii, aniž by došlo k porušení materiálu, či výskytu trhlin na vnější tahové straně. Je to způsobeno tím, že na vnější straně dochází k tahovým napětím. Když napětí těchto vláken dosáhne meze pevnosti R_m , bude docházet k vzniku prvních trhlin. Tedy minimální poloměr výrazně závisí na mezi pevnosti, plastičnosti materiálu, geometrii součásti, úhlu ohybu či kvalitě povrchu.

Dle Kocmana [5] se přibližně může tento poloměr počítat:

Pro málo plastické materiály $R_{\min} = 4t$

Pro středně plastické materiály $R_{\min} = 1,5t$

Pro velmi plastické materiály $R_{\min} = 0,66t$

Forejt [8] uvádí pro přesný výpočet minimálního poloměru odvození z deformací a poloměrů ohýbaného dílce. Z této úvahy můžeme odvodit, že minimální poloměr ohybu způsobí maximální deformaci.

$$\varepsilon_1 = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{(R_2 + t)\alpha - \left(R_2 + \frac{t}{2}\right)\alpha}{\left(R_1 + \frac{t}{2}\right)\alpha} = \frac{t}{2 \cdot R_2 + t} \Rightarrow \varepsilon_{\max} = \frac{t}{2R_{\min} + t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{\min} = \frac{t}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\max}} - 1 \right) [mm]$$
(3.3.6.1)

kde t – tloušťka ohýbaného materiálu [mm]

$\varepsilon_{\max}$ – mezní deformace. Tedy jedná se o deformaci při, které je materiál na mezi pevnosti a tedy začíná docházet k trhlinám. Zjištění této deformace může být provedeno pomocí nanesení (kruhové) sítě a další analýzou této metody

Stejný vzorec pro výpočet minimálního poloměru uvádí Boljanovič [10] a podobně jako Forejt [8] uvádí tabulku s koeficientem C , podle něhož lze minimální poloměr vypočítat.

$$R_{\min} = C \cdot t [mm]$$
(3.3.6.2)

MATERIÁL	STAV	
	Měkký	Tvrký
Nízko uhlíková ocel	0,5	3,0
Nízko legovaná ocel	0,5	4,0
Austenitická ocel	0,5	4,0
Hliník	0,0	1,2
Hliníková slitina série 2000	1,5	6,0
Hliníková slitina série 3000	0,8	3,0
Hliníková slitina série 4000	0,8	3,0
Hliníková slitina série 5000	1,0	5,0
Měď	0,25	4,0
Bronz	0,6	2,5
Mosaz	0,4	2,0
Titán	0,7	3,0
Titanová slitina	2,5	4,0

Tab. 3. Tabulka koeficientu C pro výpočet rovnice (3.3.6.2)

3.3.7. Parametry při volném ohybu - Maximální poloměr při ohybu [8]

Teorie pro odvození tohoto maximálního poloměru je podobná jako při minimálním poloměru. Zde ale není mezní hodnota okamžik, kdy začne docházet k porušení. Maximální poloměr lze odvodit Hookova zákona. V tomto případě se uvažuje jak pružná tak plastická deformace. Proto, aby bylo možné vytvořit nějaký ohyb, musí být překročena mez kluzu. Tedy maximální poloměr je hodnota poloměru, kde dojde k první plastické trvalé deformaci. Podobně jako u minimálního poloměru lze odvodit vzorec:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{t}{2 \cdot R_{2\max} + t} \Rightarrow R_{2\max} = \frac{t}{2} \left(\frac{E}{\sigma_k} - 1 \right) [mm]$$
(3.3.7.1)

kde: t – tloušťka ohýbaného materiálu

E – modul pružnosti v tahu

σ_k – mez kluzu materiálu (Lze zde dosadit R_{eL} či $R_{p0,2}$)

Boljanovič [10] uvádí pro výpočet maximálního poloměru, který je mezí pro vznik plastické deformace:

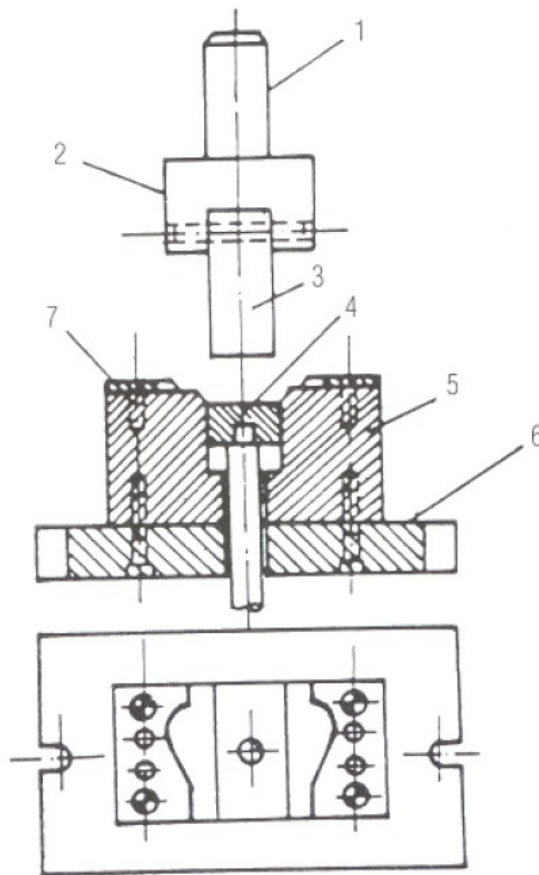
$$R_{2\max} = \frac{tE}{2\sigma_k} [mm] \quad (3.3.7.1)$$

3.3.8. Parametry při volném ohybu - Vůle mezi činnými částmi ohýbadel [7]

Vůl mezi činnými částmi ohýbadel se rozumí mezera mezi ohybníkem a ohybnicí ve spodní úvrati nástroje. Tato vůle se vytvoří seřízením zdvihu lisu. U ohybu do tvaru V je tato vůle rovna tloušťce plechu. Při technologii, ve které jsou malé vůle, může docházet ke ztenčení stěny. Vůle mezi činnými částmi ohýbadel ovlivňuje velikost ohýbací síly a velikost odpružení. Čím je větší vůle, tím je menší ohýbací síla.

3.3.9. Nástroje pro ohýbání [7] [2]

Ohýbání probíhá v ohýbacím nástroji, jehož funkční části jsou ohybník a ohybnice. Konstrukce ohýbacích nástrojů může být jednoduchá, postupová, nebo sdružená. Na obrázku je zobrazen nástroj pro ohýbání součásti do tvaru U.



Obr 3.3.9.1. Ohýbací nástroj [5]

Tento nástroj se skládá z:

- 1 - stopka
- 2 - upínací hlavice
- 3 - lisovnický či ohybník
- 4 - vyhazovač
- 5 - lisovnice či ohybnice
- 6 - základová deska
- 7 - středící příložka

Dochází zde k tomu, že ohybník ohýbá polotovar z prstříhu či pásu plechu do ohýbací čelisti, respektive ohybnice.

Materiál klasických ohybníků či ohybnic je buď konstrukční ocel 11 500, nebo 11 600.

Může být také použita uhlíková nástrojová ocel například 90MnCrV8 (19 314), nebo 95MnWCr5 (19 313).

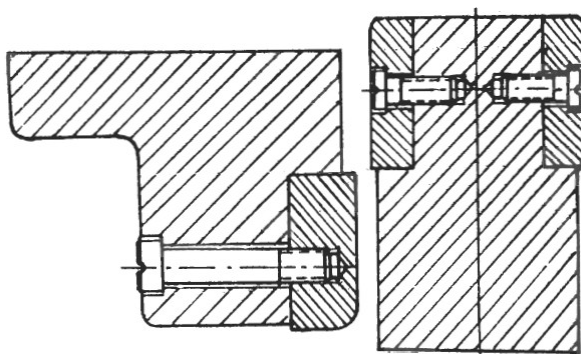
U těchto materiálů se, ale ohybník nekonstruuje jako celistvý kus, ale z konstrukční oceli je vytvořeno tělo a z nástrojových ocelí se pouze vytvoří výměnné vložky, které jsou přišroubovány na tělo ohybníku.

Tento způsob konstrukce se provádí, protože nástrojové oceli jsou příliš drahé. Proto se z nástrojových ocelí vytvoří pouze funkční části, které jsou obvykle výměnné. Konstrukce

ohýbadla může být provedena s vedením nebo bez vedení. Obvyklé ohybníky se konstruují bez vodících sloupků, ale u velkých sérií je ohybník veden pomocí vodících sloupků.

Ohybníky

Ohybník je funkční část stroje, která přenáší ohybovou sílu na polotovar a vytváří tak požadovaný rozměr. Tyto ohybníky se vytvářejí buď celistvé nebo dělené či vložkované. Vložkované ohybníky se vložkují kalenými lištami. Konstrukce je provedena následovně. Ohybník se skládá ze stopky a funkční části. Funkční část je tvaru požadovaného ohybu. Tyto rozměry mohou být zkorigovány o případné odpružení. Jednotlivé funkční plochy jsou vhodně opracovány a tepelně zpracovány, aby nedocházelo k opotřebení nástroje či vytvoření defektů na ohýbaném polotovaru.



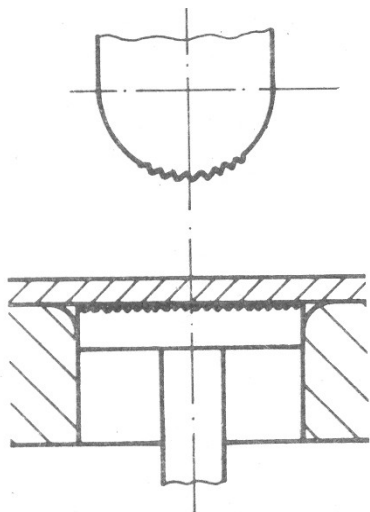
Obr. 3.3.9.2. Ohybníky [2]

Ohybnice

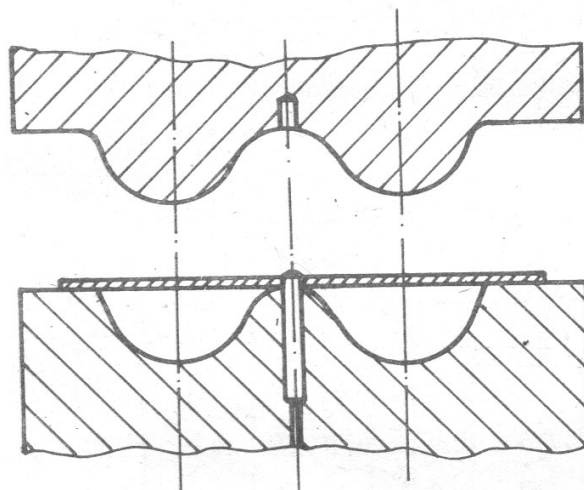
Je to funkční část spodní části nástroje, kde dochází k deformaci polotovaru. Tvar dutiny ohybnice posléze dostane ohýbaný polotovar. Taktéž konstrukce ohybnic je různá. Mohou být konstruovány jako celistvé nebo skládané. Součástí ohybnic je vyhazovač, který slouží k vyhození zhotoveného výrobku z ohybnice. Zvláštní typ ohybnice, je takzvaná ohybnice nepevná. Princip takového nástroje je, že pevný ohybník vtlačuje polotovar do nepevné ohybnice. Tato ohybnice je vytvořená z plastické hmoty jako je například polyuretan, nebo pryž.

Zamezení posuvu materiálu

Při ohýbání je nutné nejenom přesně vymezit polohu polotovaru v nástroji, ale taktéž je potřeba zamezit nežádoucímu posuvu materiálu. Kdyby nebyla zajištěna tato ochrana, mohlo by dojít k vytvoření nepřesného, tedy zmetkovitého kusu. Existují různé metody, jak udržet polotovar v požadované poloze po celou dobu ohybu. Na obrázcích níže uvedených jsou zobrazeny některé z mnoha metod zamezení posuvu. Například na obr. 3.3.9.3. je zobrazena metoda zdrsňených funkčních částí. Díky velkému tření dojde k zamezení posuvu polotovaru. Další metodou může být konstrukce pevných nebo odpružených kolíků, kterými je polotovar přesně uchycen do předem připravených otvorů a nedochází k nežádoucímu posuvu, viz obr. 3.3.9.4.

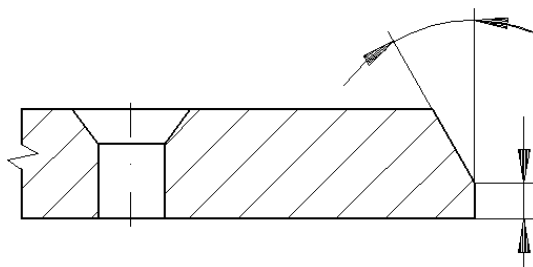


Obr. 3.3.9.3. Zdrsnění funkčních částí ohybadla [7]



Obr. 3.3.9.4. Zajištění polotovaru kolíky [7]

Pro přesné uložení polotovaru do nástroje slouží zakládací dorazy. Konstrukce těchto částí nástroje by měly být jednoduchá. Obvykle jsou tyto dorazy vytvořeny s úhlem pro snadné vložení polotovaru do nástroje. Výška zakládacího otvoru by se měla rovnat tloušťce plechu, pokud ale tloušťky plechu jsou malé, neměla by tato výška být menší než 1,5 mm. Na obr. 3.3.9.5. je znázorněn zakládací doraz s výše uvedeným zkosením a výškou zakládacího otvoru.



Obr. 3.3.9.5. Zakládací doraz [7]

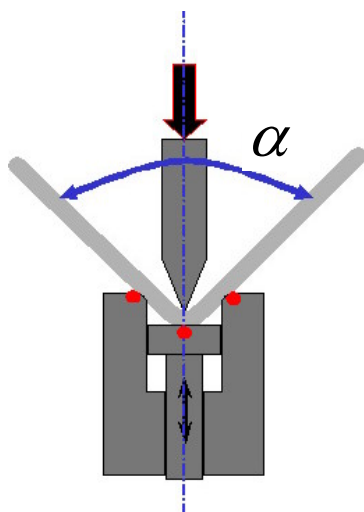
Přidržovače a vyhazovače

Jedná se o část nástroje, jehož funkcí je udržet výlisek ve správné poloze při ohýbání. Při ohybu může u některých výlisků docházet k různému natáčení či zvedání mimo zakládací dorazy. Proto je potřeba použít přidržovač, který zamezí nežádoucímu natočení či posuvu výlisku. U těch nástrojů, které jsou konstruovány s přidržovačem, obvykle tento přidržovač slouží také jako vyhazovač.

Vyhazovače slouží k pohodlnému vyjmutí hotového výlisku z nástroje. Vyhazovače jsou konstruovány pomocí pružných elementů, které se stlačují při ohýbání. Po vykonání pracovního pohybu a vrátí do původní polohy a tím vyhodí výlisek z nástroje. Vyhazovače mohou být konstruovány také s odděleným nuceným pohybem. Tato konstrukce je mnohdy složitější, ale méně namáhá stroj.

3.4. Tří bodový ohyb [16] [12]

Relativně nová ohýbací technika je tříbodový ohyb, který může být považována za variantu volného ohybu. Tato technika byla vyvinutá švýcarskou firmou HAMMERLE. Celý princip je založen na tom, že zde dochází opět k tříbodovému kontaktu, jako je tomu u volného ohybu. Speciální horní nástroj zatlačuje polotovar do dutiny spodního nástroje do té doby, než dojde ke kontaktu špičky polotovaru se dnem spodního nástroje. Tedy rozdíl od volného ohybu je takový, že tři dosedací body jsou ve spodním nástroji a tyto tři body pevně definují úhel ohybu. Spodní část nástroje může být přenastavována pomocí servomotoru. Polotovar se ohýbá do té doby, než dosedne polotovar na dno. Takto můžeme opět docílit různých úhlů ohybu u jednoho nástroje a to tím způsobem, že pokud se zvyšuje hloubka pohyblivého dna, snižuje se i úhel ohybu. Toto nastavení dna může být vytvořeno velice přesně ($\pm 0.01 \text{ MM} / \pm .0004''$). Taktéž horní nástroj může být korigovat vzhledem k beranu pomocí hydraulické podušky, čímž dojde k zamezení vlivu úchylek v tloušťce polotovaru. Následkem toho, mohou být vytvořeny úhly ohybu s vysokou přesností a to méně než $15'$.



Obr. 3.4 Metoda tříbodového ohybu [16]

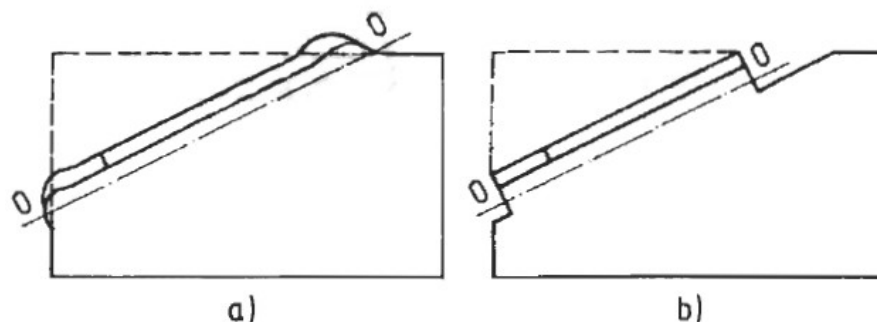
Výhody tříbodového ohybu jsou opět vysoká flexibilita, v kombinaci s vysokou ohýbací přesností. Nicméně značnými nevýhodami jsou náklady spojené se zavedením těchto systémů do provozu a omezený výběr nástrojů. Proto je tato technika prozatím omezená na úzce specializovaný trh, kde náklady na tuto technologii jsou převáženy výhodami.

3.4.1. Technologičnost ohýbaných součástí [3] [4]

Při ohýbání je nutno dodržovat určitá pravidla, která omezí výrobu zmetkovitých součástí, či zjednoduší konstrukce nástrojů pro výrobu ohýbaných součástí. Jedná se o různá konstrukční doporučení udávaná normou, nebo jinými předpisy.

Je potřeba zvolit co nejmenší úhel ohybu. Splněním tohoto doporučení můžeme vhodně snížit odpružení součástí. Je vhodné typizovat poloměry ohybu a omezit jejich počet. Taktéž u součásti není příliš vhodné střídát poloměry ohybu. Při ohybu je potřeba znát průběh vláken v součásti. Při volbě osy ohybu je vhodné zvolit kolmou osu na směr vláken. Pokud není toto doporučení splněno, je potřeba zvětšit poloměr ohybu 1,5 až 2 krát. Je vhodné správně orientovat polotovar, aby ta část polotovaru, na které se vyskytuje otřep byla namáhána na tlak. U součástí, které nejsou tvarově symetrické je potřeba vhodně zamezit posuvu součásti při ohýbání.

Pro přesnější ohýbání je vhodné zvolit po ohybu kalibraci. U součástí s velkými poloměry ohybu nebo u materiálu s velkou anizotropií je vhodné upravit součást vytvořením vyztužujících žebër, které zpevní součást. Při ohýbání je nutné dbát na to, aby okraje polotovaru byly kolmé na osu ohybu. Pokud nedojde k úpravě konců polotovaru, dojde k vytvoření zmetkovitého kusu, protože poloměr na krajích polotovaru bude větší než poloměr vnitřní části polotovaru. Na obr. 3.4.1. je znázorněn tento problém. Zobrazuje variantu s upravenými konci a s konci bez úpravy.

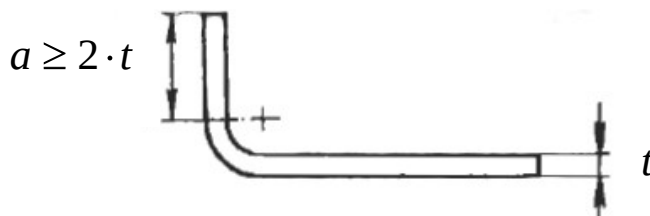


Obr. 3.4.1. Problém konců polotovaru při ohýbání [4]

- a) vzniklý problém bez úpravy konců
b) úprava konců a odstranění problému

Je potřeba konstrukčně upravit součást, aby délka ohýbaného ramene byla $a \geq 2 \cdot t$.

U součástí, kde není tato podmínka splněna, vytvoří se delší rameno aby splněna byla. Po ohybu se ohnuté rameno ostříhne na požadovanou délku.



Obr. 3.4.2. Požadavek na délku ohýbaného ramene [4]

Úchylky a tolerance součástí

U ohýbaných součástí je taktéž potřeba vhodně volit tolerance jak délkových, tak úhlových rozměrů. Není vhodné, když se úchylky rozměrů volí příliš malé. Pokud se úchylky budou volit pod mez, dosažitelnou při běžném lisování, bude nepříjemně stoupat cena výroby.

Poloměr ohybu R	<3	3 až 6	6 až 20	>20
Tolerance	0,5	1	2	3

Tab. 4. Výrobní tolerance poloměrů ohybu [4]

Materiál	Poměrný poloměr ohybu R_2/t		
	<1	1 až 2	2 až 4
Měkká ocel, mosaz $R_m = 300\text{MPa}$	$\pm 15'$	$\pm 30'$	$\pm 1^\circ$
Středně tvrdá ocel $R_m = 400\text{MPa}$	$\pm 30'$	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 3^\circ$
Tvrdá ocel $R_m = 600\text{MPa}$	-	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$

Tab. 5. Tolerance úhlů ohybů součástí [4]

3.5. Zakružování [3] [8] [13] [14] [15]

Ohyb součástí lze provádět taktéž technologií zakružování. Při této technologii dochází k ohýbání materiálu mezi točivými elementy nástroje, které se mohou radiálně posouvat vzhledem vůči ohýbanému materiálu. Princip je takový, že rovinný polotovár je ohýbán posuvem rotujících kladek, které vytvářejí volný ohyb. K celkovému požadovanému ohybu nedojde po jednom průchodu mezi kladkami, ale polotovár musí několikrát projít pracovním prostorem kladek, aby došlo ke konečnému požadovanému tvaru.

Počet těchto kladek je různý podle jednotlivých typů zakružovaček. Toto rozdělení a popis jednotlivých typů je uveden níže. Různé typy mají různé nevýhody. Jedním z hlavních problémů je, že u některých typů zakružovaček dochází k výskytu rovinného konce, který se úplně nezakrouží. Tyto problémy jsou vyřešeny dalšími typy zakružovaček.

Touto technologií lze ohýbat různé typy polotovarů. Zakružovačky jsou vhodné pro hýbání pásů plechu, trubek či profilů. Zakružováním jsme schopni vytvořit nejenom oblouky, ale i uzavřené obrouče, kde dojde k vytvoření téměř uzavřeného kruhu, který se následovně může svařit. Taktéž lze zakružovat do šroubovic či spirál. Vše závisí na uspořádání kladek a na celkovém uspořádání stroje.

Charakteristickým znakem je fakt, že zakružování se provádí za studena, ale mohou nastat i výjimky. Například plechy tlusté nad 40mm není možno zakružovat za studena. Proto je potřeba provést ohřev a zakružovat za tepla.

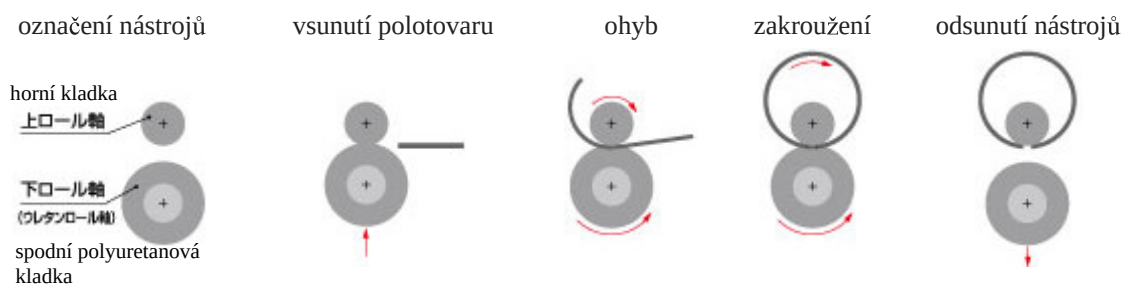
Způsoby technologie zakružování profilů se zabývá bod 5.3.

3.5.1 Dvouválcové zakružovačky – zakružování s nepevným nástrojem [13] [11]

Princip

Tato zakružovačka využívá použití nepevného materiálu. Spodní válec je konstruován tak, že na jeho povrchu je polyuretanová vrstva, která slouží k ohýbání materiálu. Oba válce jsou přitlačeny k sobě a zasouváním polotovaru dochází k deformacím kladky.

Polyuretanová kladka je umístěná na ocelovém hřídeli a přitlačuje polotovár k horní pevné kladce a tímto způsobem se vytváří zakroužený tvar.



Obr. 3.5.1. Schéma dvouválcové zakružovačky [13]

Výhodou této technologie je jednoduchost práce a vysoká produktivita. Při zakružování jsme schopni vytvořit vynikající zakroužený tvar bez zbytkových rovných okrajů. Díky nepevnému nástroji nedochází k povrchovým vadám, jako jsou trhliny na povrchu materiálů, jako jsou nerezová ocel či hliník. Tímto způsobem jsme schopni nejenom ohýbat ale taktéž lisovat různé potisky.

Napětíové poměry [11]

Napětíové poměry u této technologie znovu vycházejí z aproximací základního $\sigma - \varepsilon$ diagramu. A to pro pružnou část Hookovým zákonem $\sigma = E \cdot \varepsilon$ a pro plastickou část mocninou funkcí $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$. Místem kde dochází k přechodu z lineární do mocniné části je $\varepsilon_c = (K/E)^{1/(1-n)}$. Zakirov [11] uvádí pro výpočet konstant n a K následující vztahy, které vycházejí ze základních zkoušek materiálu jako například z tahové zkoušky.

$$n = [\ln(\sigma_m / \sigma_k)] / \ln(\varepsilon_m / \varepsilon_k) \quad (3.5.1.1)$$

$$K = \sigma_m / \varepsilon_m^n \quad (3.5.1.2)$$

Z ruské literatury [11] je také převzata tabulka s příkladem těchto mechanických charakteristik. Jedná se o oceli, jejichž označení je provedeno dle ruské normy.

Materiál	Mechanické vlastnosti					Konstanty pro aproximační křivky	
	$E[MPa]$	$\sigma_k[MPa]$	$\varepsilon_k[-]$	$\sigma_m[MPa]$	$\varepsilon_m[-]$	$K[MPa]$	$n[-]$
30KhGSAM	210000	294	0,0036	568	0,14	1010	0,218
40KhNMA	210000	850	0,0060	1000	0,12	1380	0,095
12Kh18N10T	220000	380	0,0037	640	0,40	1100	0,190

Tab. 6. Mechanické vlastnosti pro některé materiály

Tyto vztahy lze taktéž použít v přítomnosti sloučených napětí.

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i \text{ kde } \varepsilon_i \leq \varepsilon_{0,2} \text{ a } \sigma_i = K \cdot \varepsilon_i^n \text{ v případě } \varepsilon_i > \varepsilon_{0,2}$$

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sum (\sigma_a - \sigma_b)^2}, \quad \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\sum (\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2} \quad (3.5.1.3)$$

$$a = 1, 2, 3,$$

$$b = 2, 3, 1,$$

$$\sigma_a = E_r \cdot \varepsilon_a (\varepsilon_a \leq \varepsilon_k), \quad \sigma_a = K_r \cdot \varepsilon_a^n (\varepsilon_a > \varepsilon_k); \quad a = 1, 2, 3$$

Kde hodnoty redukovaných modulů E_r a K_r se vypočítají:

$$E_r = E / (1 - \mu^2) \quad (3.5.1.4)$$

$$K_r = \frac{\left[4 \left(1 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^2 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} + \left(\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} \right)^2 \right) / 9 \right]^{\frac{n}{2}} \cdot K}{\left(1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^2 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \frac{\sigma_3}{\sigma_1} - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.5.1.4)$$

Tato rovnice je možno zjednodušiť pokud se bude uvažovat konkrétní technologie. Pro úzké pásy lze přepsat hlavní napětí a deformace na $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ a $\varepsilon_1, \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\mu\varepsilon_1$. Potom lze psát.

$$K_r = K \quad (3.5.1.5)$$

Pro široké pásy k ohýbání lze přepsat hlavní napětí $\sigma_1, \sigma_2 = 0, \sigma_3$ a hlavní poměrné přetvoření jako $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1, \varepsilon_3 = 0$. Potom lze psát.

$$K_r = (2/\sqrt{3})^{1+n} K \quad (3.5.1.6)$$

kde:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - hlavní napětí

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - hlavní poměrné deformace

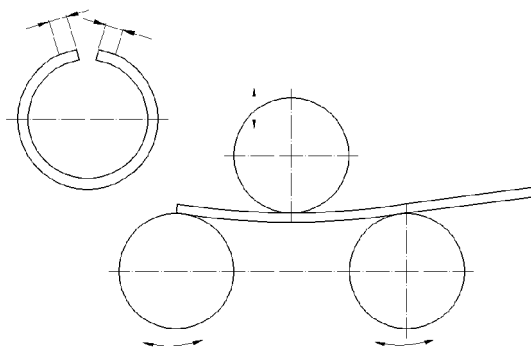
μ - Poissonova konstanta

3.5.2. Principy tříválcových zakružovaček

Tříválcová zakružovačka se skládá ze tří kladek, které ohýbají polotovar. Tento typ nástroje může mít dvě konstrukce. Symetrickou zakružovačku a nesymetrickou zakružovačku. Problém s těmito typy zakružovaček je v tom, že dochází ke vzniku rovinných konců a nedojde k úplnému zakroužení materiálu. Některé firmy, ale různými konstrukcemi a vylepšeními tuto nevýhodu odstraňují.

Tříválcová zakružovačka symetrická

Tento typ je konstruován podobně jako volné ohýbání nosníku. Taktéž tato varianta uspořádání může mít různé konstrukce k tomu, aby došlo k odstranění rovinného konce, které lze vidět na obrázku klasické symetrické zakružovačky obr. 3.5.2.1. u které vznikají tyto nezakroužené místa na obou koncích.

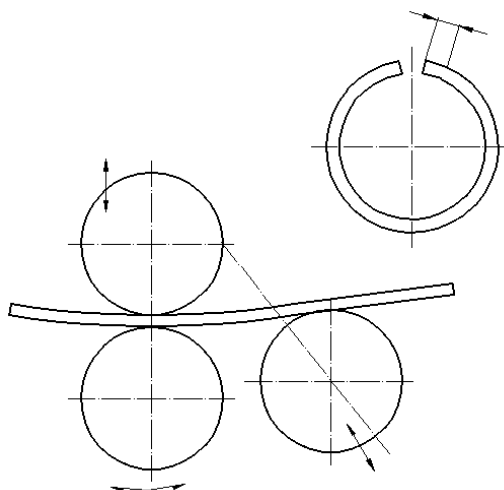


Obr. 3.5.2.1. Schéma tříválcové symetrické zakružovačky

Jednou z metod odstranění rovinných konců je metoda dvou suvných kladek firmy ISEL co. LTD. [13] Tedy Horní kladka se pouze otáčí a dvě spodní kladky přitlačují polotovaru k horní otáčivé kladce. Přesněji řečeno dochází zde k rozdělení pohybů spodních kladek a každá se může pohybovat jinak. Tímto způsobem lze úplně odstranit rovinné konce.

Princip tříválcové zakružovačky nesymetrické

Princip této zakružovačky je následný. Jsou zde dvě kladky uložené nad sebou, čímž dojde k pevnému sevření ohýbaného polotovaru a následným otáčením spodní kladky, dochází k posuvu polotovaru. Děj ohýbání začne, když druhá spodní kladka se začne posouvat k horní kladce, čímž začne zakružování. Takovýmto způsobem dojde k vytvoření pouze jednoho rovinného konce na součásti. Tato vada se dá odstranit otočením polotovaru a finálním zakroužením do úplného kruhovitěho tvaru.

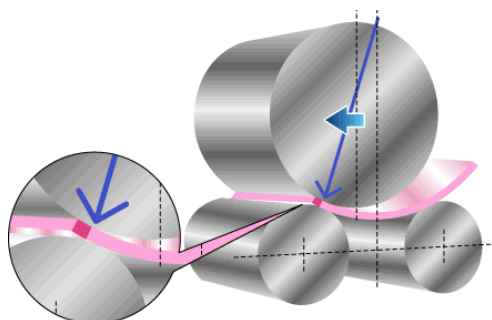


Obr. 3.5.2.2. Schéma tříválcové zakružovačky

Kurimoto's systém [14]

Firma KURIMOTO'S konstrukci tříválcové zakružovačky provedla jiným způsobem. Taktéž tento typ konstrukce by měl odstranit rovinné konce, které se vyskytují u zastaralých konstrukcí. KURIMOTO'S systém je skoro totožný s klasickou konstrukcí zakružovaček. Tedy má jednu horní kladku, která koná suvný pohyb a dvě otáčivé kladky. Rozdíl v této konstrukci spočívá v tom, že horní válec se posouvá nejenom ve vertikálním

směru, ale také v horizontálním směru. Pohyby toho válce jsou úplně automatizovány. Tímto způsobem se zdokonalí zakřivení konců téměř na 100%. Kontrola v příčném průřezu po ohýbání vykazuje téměř 100% přesnost zakroužení.



Obr. 3.5.2.3. Schéma metody Kurimoto's systém [14]

3.5.3. Základní technologické parametry u zakružování na tříválcové zakružovačce [3] [10]

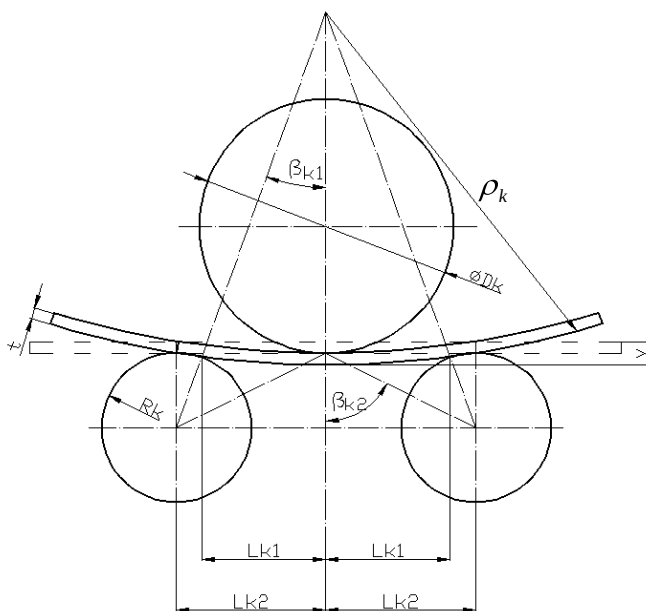
Poloměr zakružování

Je důležité znát, pod jakým zakřivením budeme polotovar zakružovat. Poloměr zakružování se vypočítá dle vztahu:

$$\rho_k = \frac{L_{k2}^2 - y^2}{2 \cdot y} - R_k [mm] \quad (3.5.3.1)$$

ponoření horního válce mezi válce podpěrné je dáno vztahem:

$$y = (R'_k + \rho_k) - \sqrt{(R'_k + \rho_k)^2 - L_{k2}^2} [mm] \quad (3.5.3.2)$$



Obr. 3.5.3.1. Rozměrové parametry tříválcové symetrické zakružovačky

Odpružení

Stejně jako u ohýbání dochází taktéž v této technologii k pružně-plastickým deformacím. Tedy poloměr zakružování a konečný poloměr po vysunutí zákružku z nástroje nejsou stejné. Pro výpočet konečného zakřivení po odeznění pružných deformací je potřeba znát poloměr pružného zakřivení. Tento poloměr se vypočítá dle vzorce:

$$\rho_e = \frac{E \cdot t}{2 \cdot Re} \quad (3.5.3.3)$$

Konečný poloměr zakřivení vyplývá ze závislosti:

$$\frac{1}{\rho_p} = \frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_e} \quad (3.5.3.4)$$

Pokud vezmeme v úvahu materiálové konstanty a deformační zpevnění, lze konečné celkové zakřivení vypočítat, jak uvádí Dvořák [3] :

$$\rho_p = \frac{\rho_k}{1 - \frac{3}{2+n} \cdot \frac{C}{E} \cdot \left(\frac{2 \cdot \rho_k}{t} \right)^{1-n}} \quad (3.5.3.5)$$

kde:

C – materiálová konstanta odvozená ze zkoušky zjišťování deformačního odporu materiálu

n – exponent deformačního zpevnění

b – šířka zakružovaného plechu

t – tloušťka zakružovaného plechu

přítlačná síla ohybového válce

$$F_{zk} = \frac{b \cdot t^{2+n}}{(2+n) \cdot L_{k2} \cdot (2 \cdot \rho_k)^n} \quad (3.5.3.6)$$

Boljanovič [10] uvádí pro výpočet přítlačné síly vzorec

$$F_{zKB} = R_{e0,2} \cdot \frac{b_z}{D_z - t} \left[t^2 - \frac{R_{e0,2} (D_z - t)^2}{3 \cdot E^2} \right] \cdot \cot g \frac{\alpha}{2} \quad (3.5.3.7)$$

kde:

D_z - vnitřní průměr zákružku

b_z - délka ohybu

α - úhel ohybu, který se vypočítá $\alpha = 2 \arcsin \frac{2 \cdot L_{k2}}{D_z + 2R_k}$

ohybový moment

$$Mo_{zk} = C \cdot \frac{b \cdot t^{2+n}}{(2+n) \cdot 2^{1+n} \cdot \rho_k^n} \quad (3.5.2.9)$$

3.5.4. Princip čtyřválnové zakružovačky

Principem této zakružovačky jsou čtyři kladky, které vzájemným otáčením a posouváním vytvářejí zakroužený stav. Dvě kladky (2,4) jsou pevně uloženy a dochází u nich pouze k otáčení. Úkolem těchto kladek je pevné sevření polotovaru a posouvání ho k ohýbacím kladkám (3,1). Tyto kladky nejsou hnané, pouze svým posuvným pohybem ohýbají polotovaru. Výhodou této konstrukce je fakt, že nedochází k vytvoření rovinných částí na koncích ohýbaného polotovaru, jako je tomu u tří-válnových zakružovaček.



Obr. 3.5.4.1. Schéma postupu zakružování čtyřválnové zakružovačky [13]

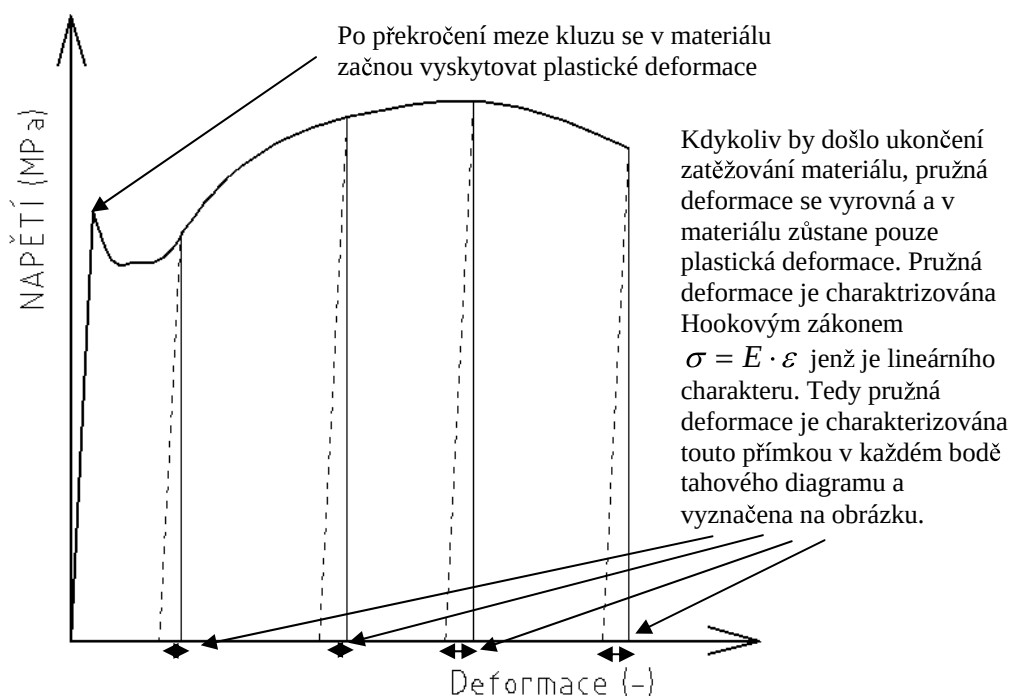
4. Odpružení [3] [5] [8] [10]

4.1. Úvod do problematiky odpružení

V bodě 2.1. Deformace kovů bylo uvedeno, že kovové materiály se deformují pružnou a plastickou deformací tedy celkovou deformaci lze konstatovat vzorcem:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{pl} \quad (4.1.1)$$

Pružné deformace vytváří u konstrukčních materiálů používaných k ohýbání nepříznivý jev, který se nazývá odpružení. Po ukončení působení ohýbací síly, dochází k vyrovnání pružných deformací. Tedy materiál se snaží vrátit z části do původního stavu. Na obr. 4.1.1. je zobrazeno vyrovnávání pružných deformací, které vytvářejí odpružení v materiálu.

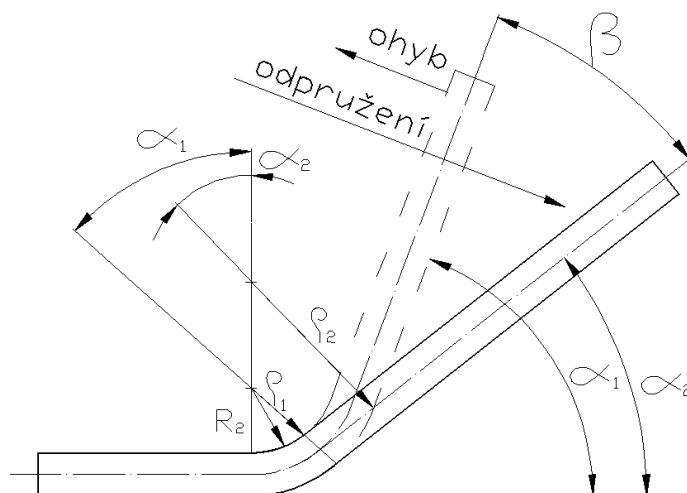


Obr. 4.1.1. Tahový diagram napětí – deformace se zobrazením velikosti pružné deformace v různých bodech závislosti napětí – deformace

Proto je potřeba provádět různá opatření, kterými se zabrání odpružení.

Patří mezi ně ohnutí o větší úhel, než požadujeme, úpravy tažníku či tažnice, nebo výztuhy či žebra. Odpružení je tím větší, čím je větší tvrdost materiálu a čím je větší úhel a poloměr ohybu. Tedy velikost odpružení závisí na materiálu, způsobu provedení ohybu, úhlu ohybu a tloušťce polotovaru.

4.2. Metody zjištění velikosti odpružení při ohybu



Obr. 4.2.1. Schéma ohýbaného dílce včetně vyznačení parametrů ohybu [8]

4.2.1. Přibližný výpočet úhlu odpružení [3] [8]

Pro ohyb tvaru U:

$$\operatorname{tg} \beta = 0,75 \cdot \frac{l_u}{k \cdot t} \cdot \frac{\operatorname{Re}}{E} \quad (4.2.1.1.)$$

Pro ohyb tvaru V:

$$\operatorname{tg} \beta = 0,375 \cdot \frac{l_v}{k \cdot t} \cdot \frac{\operatorname{Re}}{E} \quad (4.2.1.1.)$$

kde:

l_u - vzdálenost středů poloměrů ohybníku a ohybnice

l_v - vzdálenost středů poloměrů ohybnice

Re – mez kluzu

E – modul pružnosti

k – součinitel určující polohu neutrálního vlákna $k = 0,5-0,68$ jak uvádí Dvořák [3]

Poměr R_0/t	0,1	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
Součinitel k	0,68	0,65	0,62	0,58	0,54	0,53	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,5	0,5

Tab. 7. Součinitel k [4]

4.2.2. Výpočet odpružení při velkém poloměru ohybu [4]

U součástí s velkým poloměrem ohybu kdy R_2/t je větší než 20 se úhel odpružení vypočítá pro V ohyb:

$$\beta = (180 - \alpha) \left(\frac{R_2}{r_p} - 1 \right) [^\circ] \quad (4.2.2.1.)$$

kde r_p je poloměr pohyblivé čelisti s ohledem na pružení.

$$r_p = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + 3 \cdot \frac{R_e}{E \cdot t}} \quad [mm] \quad (4.2.2.2.)$$

4.2.3. Zjištění odpružení pomocí koeficientu K' a diagramu s tímto koeficientem [3][8][10]

Odpružení lze zjistit použitím různých empirických vztahů a grafů. Z diagramu uvedeného na obr. 4.2.3. lze zjistit koeficient K' , který vypovídá o poměru úhlu ohybu před a po odpružení.

$$K' = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{R_1 + 0,5t}{R_2 + 0,5t} \quad (4.2.3.1.)$$

kde:

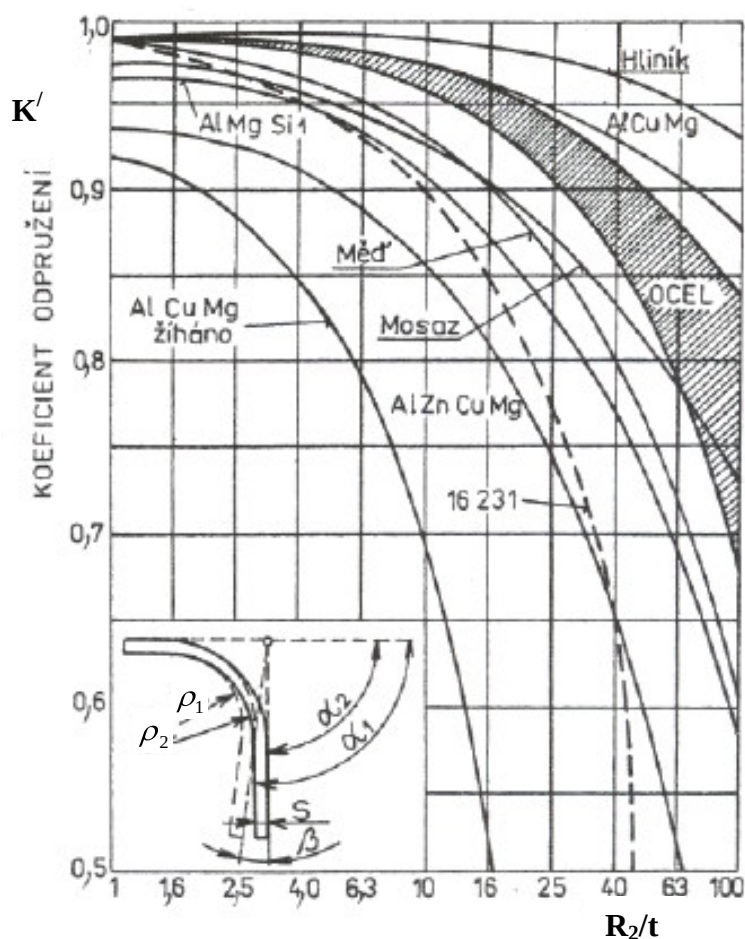
α_1 - úhel ohybu před odpružením

α_2 - úhel ohybu po odpružení

ρ_1 – zakřivení výlisku před odpružením

ρ_2 – zakřivení výlisku po odpružení

hodnoty α_1 a R_1 značí parametry na, které je třeba výlisek ohnout, aby po ukončení působení sil a vytvoření odpružení rozměry výlisku odpovídaly požadovaným parametrům α_2 a R_2 .



Obr. 4.2.3. Diagram koeficientů odpružení [8]

Tedy pokud koeficient $K=0$ jedná se o stav úplného odpružení a nenastanou žádné plastické deformace. Pokud $K=1$ nedochází k žádnému odpružení a žádné pružné deformace se nevyrovnávají. K odhadu odpružení byl vyvinut přibližný vzorec poměru poloměru R_1/R_2 :

$$\frac{R_1}{R_2} = 4 \cdot \left(\frac{R_1 \cdot R_e}{E \cdot t} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{R_1 \cdot R_e}{E \cdot t} \right) + 1 [-] \quad (4.2.3.2.)$$

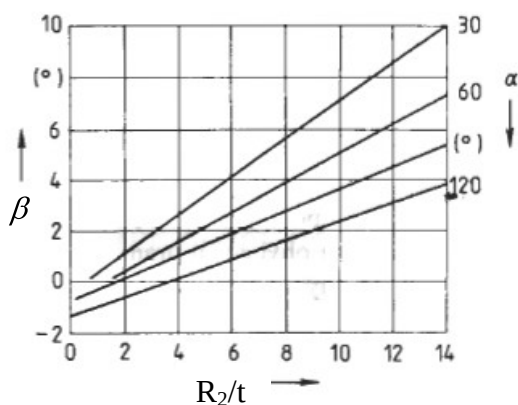
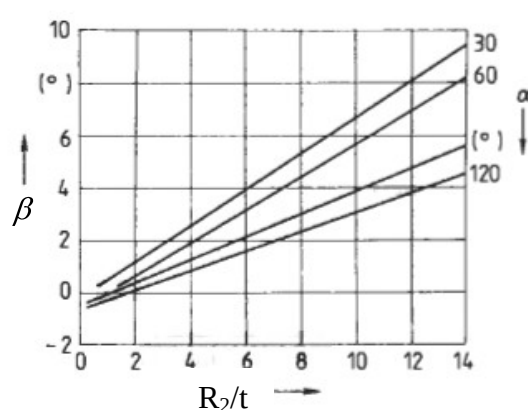
Boljanovič [10] uvádí tabulku koeficientu K' pro různé materiály

R_2/t	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3	10,0	25,0
Materiály (AISI)	K'						
2044-T	0,92	0,905	0,88	0,85	0,80	0,70	0,35
7075-0 & 2024-0	0,98	0,98	0,98	0,98	0,975	0,97	0,945
7075-T	0,935	0,93	0,925	0,915	0,88	0,85	0,748
1100-0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,943

Tab. 8. Koeficient K' pro některé materiály [10]

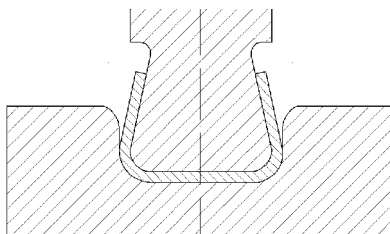
4.2.4. Určení úhlu odpružení z experimentálně určených diagramů

Různé literatury jak například [10] uvádí možnosti určení koeficientu k dle poměru R_2/t pro danou geometrii a daný materiál. Na základě různých zkoušek byly vytvořeny také diagramy pro různé materiály. Jednoduchým způsobem je možné odpružení určit odečítáním úhlu odpružení při známých parametrech úhlu ohybu α a poměru R_2/t viz obr. 4.2.4.1. a obr. 4.2.4.2.

Obr. 4.2.4.1 Diagram β pro ocel 12 010 [5]Obr. 4.2.4.2 Diagram β pro ocel 11 425 [5]

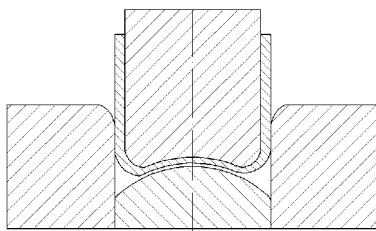
4.3. Eliminace odpružení [7]

Jak už bylo řečeno výše existují různé způsoby odstranění odpružení, nejjednodušší varianta je zvýšit úhel ohybu o hodnotu úhlu odpružení. Při vyrovnání pružných deformací dojde k tomu, že výlisek bude mít požadovaný tvar. Tento způsob se může provést speciálně upraveným ohybníkem jak je zřejmé z obr. 4.3.1.

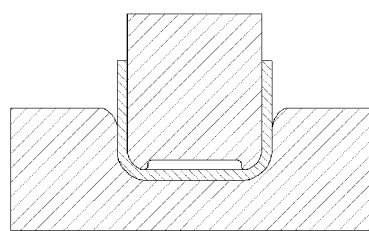


Obr. 4.3.1. Zvětšení úhlu ohybu o úhel odpružení

Odstranění odpružení může být prováděno dalšími metodami konstrukčních úprav jak ohybníku tak ohybnice. Jednou z varian je, že dojde k vytvoření drážky v ohybníku, čímž se docílí kvalitnější dotlačení v rozích výlisku, dojde ke zpevnění a zmenší se tak odpružení viz. obr.4.3.3. Nebo se upraví obě funkční části a vytvoří se zaoblení dna čímž se i odstraní odpružení viz. obr. 4.3.2.

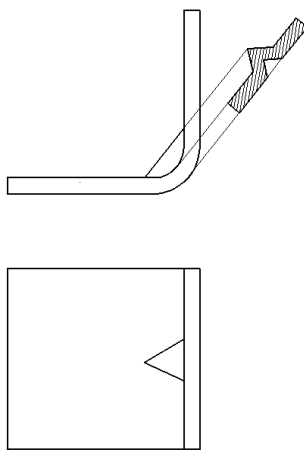


Obr. 4.3.2. Zaoblení ohybníku a přidržovače

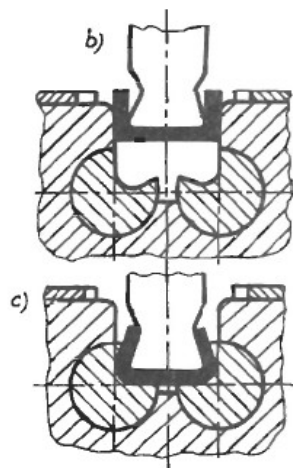


Obr. 4.3.3. Zpevnění materiálu v rozích

Další z variant odstranění odpružení je vylišování žeber, které slouží jak ke zpevnění výlisku, tak k zamezení odpružení viz obr. 4.3.4.



Obr. 4.3.4. Vylišování žebra



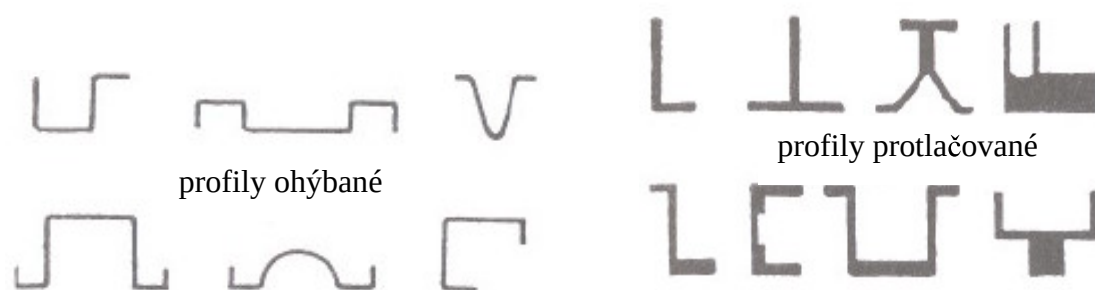
Obr. 4.3.5. Kalibrování bočními ohybnicemi [7]

Složitější konstrukční usprádnění má ohýbací nástroj s otočnými čelistmi. Princip tohoto způsobu je takový, že po ohybu dojde k pootočení speciálně upravené ohybnice a tím i k dotlačení výlisku na ohybník. Tímto způsobem se výlisek prohne o úhel odpružení a po odpružení se výlisek vrátí do požadovaného tvaru.

5. Technologie ohýbání profilů [5]

5.1. Tvary profilů

Profilové prvky lze rozdělit na dva typy. Tenkostěnné profily mají malou tloušťku, jsou vyráběny z plechu a to nejčastěji ohraňováním nebo profilovým válcováním. Tvar a rozměry jsou velice různé. Od těch nejjednodušších L profilu, až po velice složité různě tvarované profily. Druhým typem jsou tlustostěnné profily. Jejich tloušťka je mnohem větší a nebylo by je možné vyrábět výše zmiňovanými technologiemi. Proto se vyrábějí úplně odlišně. Technologie používaná pro výrobu tlustostěnných profilů se nazývá protlačování. Rozměrově velké profily se mohou ještě vyrábět válcováním za tepla ve válcovacích stolicích.



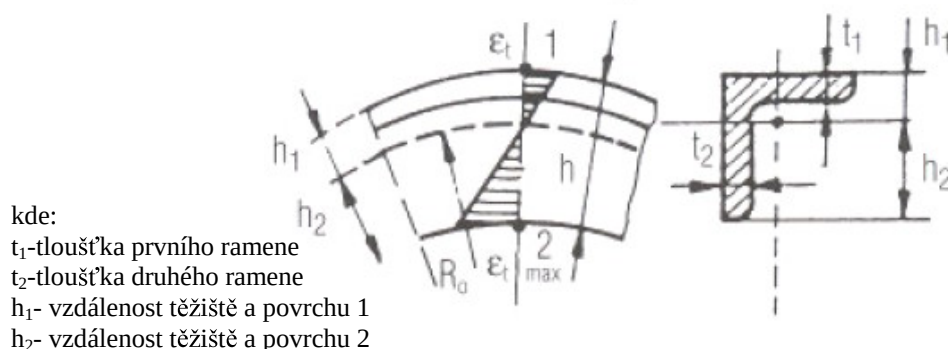
Obr. 5.1.1. Druhy profilů [5]

5.2. Zvláštnosti při ohýbání profilů

Při ohýbání profilů dochází k mnohým komplikacím. Hlavní problém při deformacích profilů je fakt, že mají různý tvar průřezu. U tyčí kruhových, čtvercových, obdélníkových průřezů je těžiště uprostřed. Sice dochází více či méně k bočním deformacím a může docházet k deformaci průřezu do oválného tvaru, ale materiál je rozložen rovnoměrně a těžiště je uprostřed těchto průřezů. Proto deformace průřezu nejsou tak velké, jak je tomu u profilových průřezů. U nesymetrických profilů jako je například L profil je materiál rozložen nesymetricky vůči těžišti a dochází k deformaci profilu, takzvanému zkroucení. Nedochozí zde už ke vzniku rovinného ohybu, ale vznikají zde smyková napětí, která profil zkroucují.

Tento problém je blíže rozveden na L profilu. Při ohybu dochází k jiným deformacím příčného průřezu u úzkých pásů a k jiným deformacím u širokých pásů. Pokud teď tyto dva případy spojíme a vytvoříme jeden jediný profil, začne docházet k tomu, že část o tloušťce t_1 se začne deformovat jako pás široký a část o tloušťce t_2 jako pás úzký. Vlivem toho začne docházet ke zkroucení, protože tyto dvě části jsou spojeny, ale deformují se odlišným způsobem.

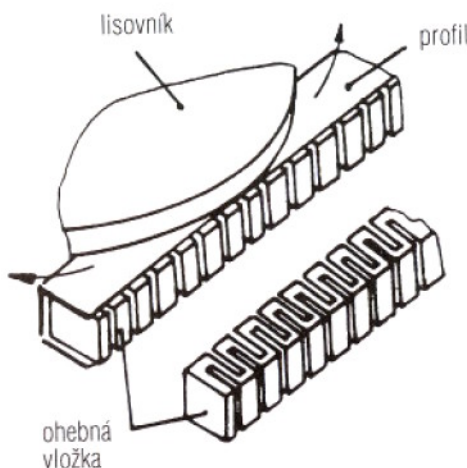
Tento problém je zobrazen na obr. 5.2.1. Na tomto obrázku je znázorněno nesymetrické rozložení tangenciálních napětí vůči těžišti. Tlakové napětí v bodě 2 je mnohem větší než tahové v bodě 1. Tento stav může způsobit, že dojde ke ztrátě stability tedy ke zborcení tenké stěny profilu.



Obr 5.2.1. Ohyb profilu L [5]

Aby k nepříjemným jevům zkroucení nedocházelo, používají se v jednotlivých technologiích ohýbání či zakružování profilů různé stabilizační vložky či jiné prvky.

Do profilu je vložena ohebná vložka. Při ohýbání profilu na lisovnicku dochází nejen k ohybu profilu, ale také se zároveň ohýbá vložka. Díky použití této vložky nedochází k nepříznivým deformacím tohoto U profilu. Je to obdobná metoda, která se používá pro ohýbání trubek, kde proti deformaci průřezu se používají různé náplně jako kapaliny, plastické hmoty či jiné sypké látky.



5.2.2. Ohyb U profilu s ohebnou vložkou [5]

Při ohýbání profilů může docházet ke zvlnění stěn. Tomuto problému lze předejít přidáním tahové síly k ohybu a tedy provádět technologii ohyb+tah. Druhým způsobem odstranění této vady, respektive zabránění vzniku zvlnění je boční přitlačování materiálu k nástroji.



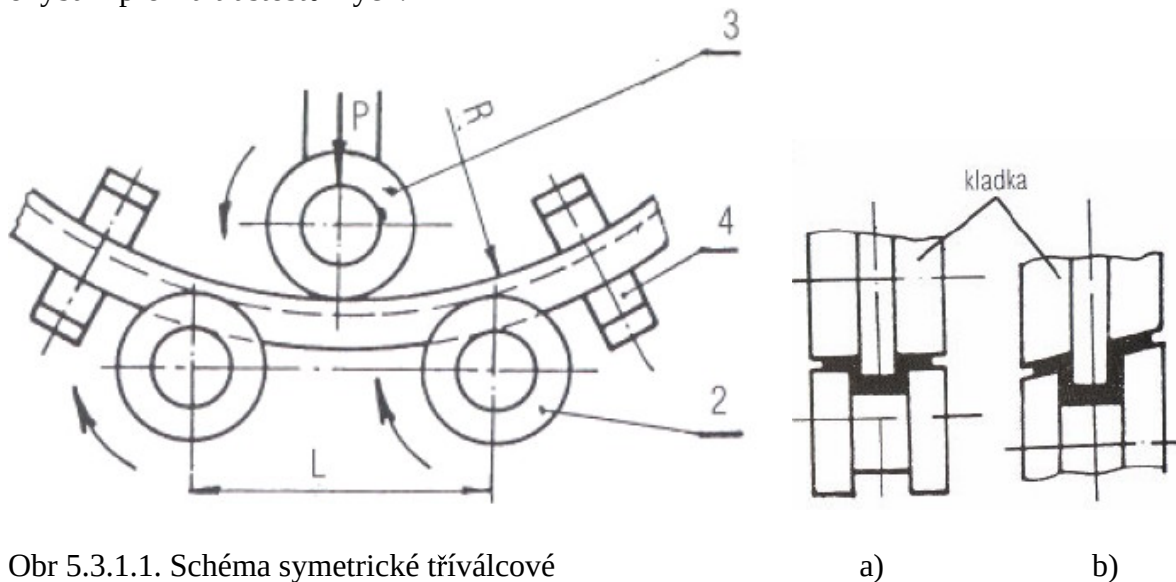
5.2.3. Zvlnění stěn U profilu [21]

5.3. Zakružování profilů

5.3.1. Symetrické tříválcové zakružování profilů

Nejčastěji používanou metodou pro ohýbání profilů je zakružování. Principiálně se mnoho neliší od zakružování plechů. Tedy místo hladkých kladek u zakružovaček na plechy jsou použity letmo, nejčastěji horizontálně, upnuté profilové kladky. Horizontální upnutí se většinou používá pro profily s menšími rozměry. Pro profily velkých průřezů se používají svislé zakružovačky. Tato varianta je provedena tímto způsobem proto, aby při manipulaci s velkorozměrnými profily bylo jednodušší zavedení polotovaru do pracovního prostoru. Stejně jako u normálního zakružování plechu existují různé konstrukce zakružovaček. Obvyklá je tří-kladková konstrukce, kde všechny kladky jsou poháněné. Uspořádání zakružovacích kladek je symetrické.

Tento způsob se nejčastěji používá pro větší profily. Taktéž tato konstrukce je vhodná pro ohýbání profilu tlustostěnných.



Obr 5.3.1.1. Schéma symetrické tříválcové zakružovačky profilů [5]

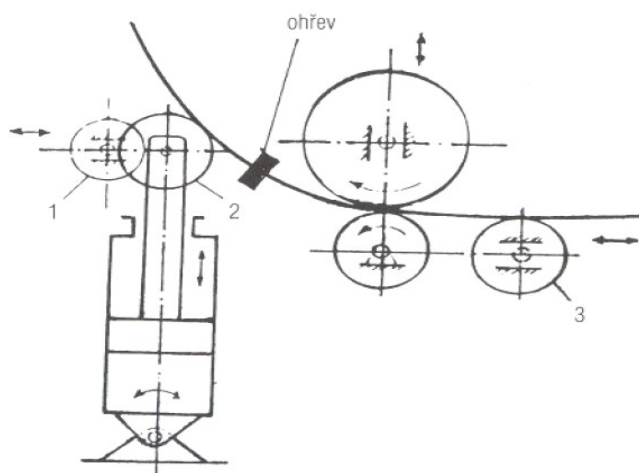
a) b)
Obr. 5.3.1.2. Profilové kladky [5]

Na obr. 5.3.1.2. jsou znázorněny profilové kladky. Na obr. 5.3.1.2. b) je možné si povšimnout způsobu technologie, kdy je možné natočit pásnic vzhledem k stojině.

5.3.2. Nesymetrické zakružování tenkostěnných profilů

U tenkostěnných profilů je nevýhodou to, že se lehce bortí. Jsou to profily vyrobené většinou z plechu. Proto je výhodné použít typ nesymetrické zakružovačky.

U této technologie dochází v místě největšího ohybu k pevnému sevření profilu dvěma proti sobě krouticími se kladkami. Takovým to způsobem se lépe docílí toho, aby nedošlo ke zborcení profilu nepříznivým deformacím. Tyto zakružovačky jsou schopné zakružovat profily maximálně do rozmezí tloušťky 6-8mm a to s maximálním rozměrem strany 80-100 mm pokud se jedná o zakružování profilu vytvořeného z hliníkové slitiny. Tato metoda je taktéž vhodná pro použití těžko tvařitelných materiálů jako jsou titán a jeho slitiny, či žáropevné materiály.

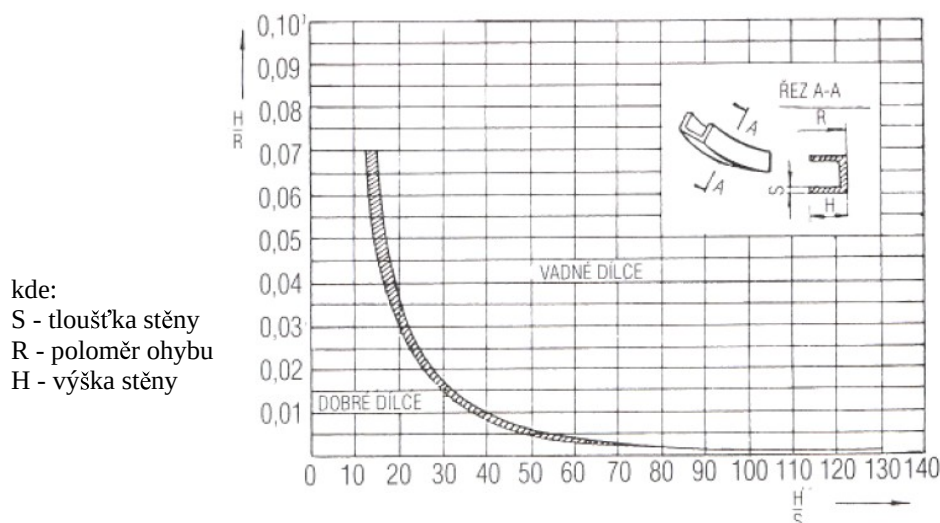


Obr. 5.3.2.1. Schéma nesymetrické zakružovačky s lokálním ohřevem [5]

Pro zakružování takovýchto profilů se použije lokálního ohřevu jak je tomu na obr. 5.3.2.1. Ohřev je zpravidla vytvořen vysokofrekvenční cívkou a celý ohřívací systém je umístěn těsně před kladkou, kterou probíhá zakružování. Ohřátí profilu však nesmí být ve velkém rozsahu. Úsek, který se nahřívá, nesmí být větší než čtyřnásobek tloušťky stěny profilu. Na obr. 5.3.2.1. je znázorněno konstrukční uspořádání této technologie. Kladka 2 je hlavní ohýbací element. Její poloha je ovládána otočným pístem. Za současného vysouvání a natáčení této kladky dochází k ohybu ohýbaného profilu. V zahraničí používání zakružovaček s čtyřmi kladkami má velice dobré výsledky. Tyto technologie se používají v automobilovém či leteckém průmyslu.

5.3.3 Mezní diagramy při zakružování

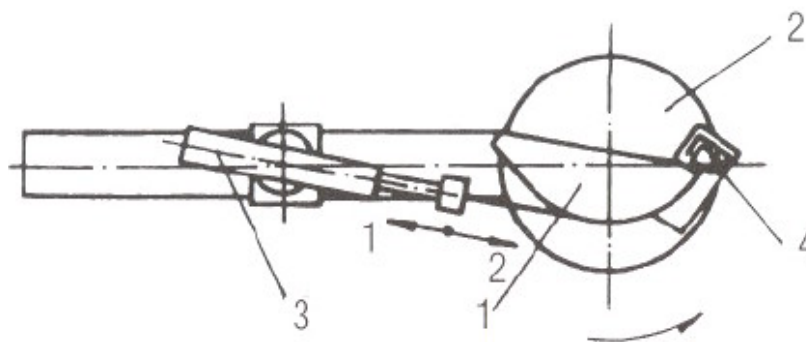
Technologií zakružování však nelze zakružovat jakékoli dílce. Mezními parametry pro ohnutí kvalitního výlisku z profilového materiálu jsou jeho rozměry. Existují grafy, které rozdělují oblasti výroby zmetkovitých a dobrých součástí. Tyto diagramy jsou dělány pro různé typy ohybů či různé materiály. Například pro dural ČSN 42 4201 pro ohyby profilového tvaru T a U vypadá takto. Limitními hodnotami je tloušťka profilu s výškou stěny a poloměr ohybu.



Obr. 5.3.3. Diagram mezního stupně zakružování [5]

5.4. Ohýbání nabalováním s předpětím

Toto je velice progresivní metoda principiálně podobná přetahování plechů. Tato technologie je účinně využívána pro ohyb kruhových dílců. Na obr 5.4. je uveden jeden z možných způsobů konstrukce této technologie. Hlavní části je Lisovník (1) jehož tvar ohýbáme do profilového polotovaru. Obvykle má tvarovou dutinu dle tvaru ohýbaného profilu. K tomu aby nedocházelo ke ztrátě stability tvaru profilu, se i zde používají ohebné vložky. Základovou jednotkou tohoto nástroje je otočný stůl (2) na kterém je připevněn jak lisovník (1) tak kleština (4). Ta má za úkol pevně upnout profilovou tyč a držet jí upnutou po celou dobu ohýbání. Charakteristickým znakem této technologie je, že při ohýbání je profil natahován tažnou silou a následně nabalován na Lisovník (1). Tato konstantní stálá síla je vytvořena hydroválcem (3) uloženého na suportu.

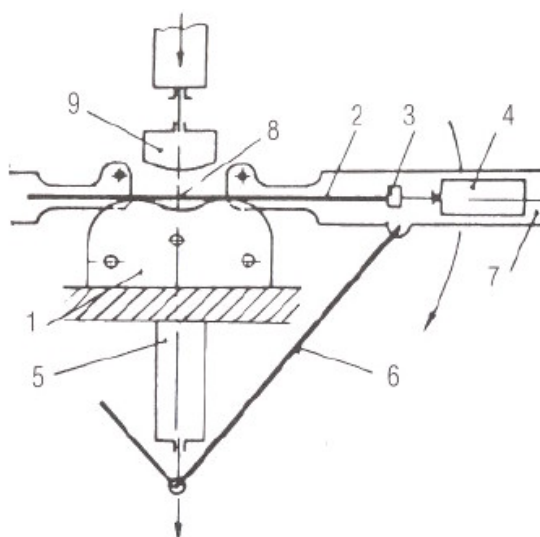


Obr. 5.4. Schéma ohýbání profilů nabalováním s předpětím [5]

5.5. Nabalování profilů pomocí výkyvných ramen

Tato technologie je velice podobná výše uvedené technologii, ohýbání nabalováním s předpětím. Ale v tomto případě je hlavní lisovník (1) nepohyblivý a nijak se neotáčí. Znovu je docíleno natažení profilu a vytvoření předpětí a to znovu díky kleštině (3), která je ovládaná hydroválcem (4). Tedy profil je dostatečně předepjatý a tedy je ho možné dále tvarovat. Ohyb profilu je proveden pomocí výkyvného ramene, kde jsou upnuty konce profilu. Pohyb těchto výkyvných ramen (7) je ovládán dalším pístním hydroválcem (5). Pohyb tohoto hydroválcce je přenášen pomocí táhla na výkyvné rameno a tímto pohybem dochází k ohýbání, lépe řečeno tvarování profilu na lisovníku. Nátáčení výkyvných ramen se děje okolo bodu (8).

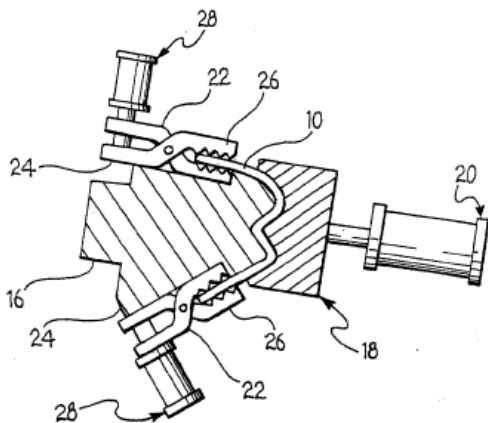
Tímto způsobem dochází k nabalování profilu na lisovník a vytvoření téměř jakéhokoli tvaru, který je ve funkční části lisovníku jako negativ. Výhodou této metody je, že lze provést následnou deformaci dalšího tvaru, který ještě nebyl vytvořen výkyvnými rameny. K tomuto ději slouží další lisovník (9). Tento tvar lze vytvořit, ale pouze pokud se jedná o negativní prolis. Operace na tomto nástroji se mohou provádět jako jedno-operační či více operační. Vše závisí na poměru rádiusu ohybu a výšky profilu. Pokud je tento poměr příliš malý je třeba provádět ohyb na více operací a to s mezioperačním tepelným zpracováním. Taktéž tato technologie se velice výrazně používá v leteckém průmyslu.



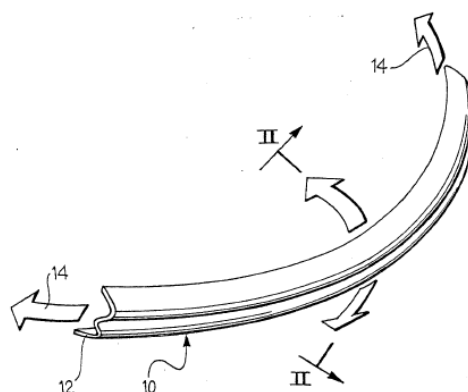
Obr. 5.5. Schéma nabalování profilů pomocí výkyvných ramen [5]

5.6. Patenty pro ohýbání profilů [22]

Patent číslo PCT/EP00/00208 vydaný roku 2002 vytvořeného v Itálii Petrem Passonem se zabývá ohýbáním profilu v jednom nebo více směrech. Tento patent hovoří o zařízení, které vytvoří kompenzační síly na profil, které jsou kolmé na směr síly, jenž vytvoří ohyb. Tímto způsobem se zabráňuje deformacím profilu při ohýbání. Profil je pevně uchycen na lisovník (16) a je vytvořena kompenzační síla pomocí kleští (22) jejichž počet a rozmístění je vytvořeno tak, aby nedocházelo ke změně průřezu profilu (10) při ohýbání. Následně se provede ohyb.



Obr. 5.6.1. Schéma patentovaného nástroje [22]



Obr. 5.6.2. Ohnutý profil [22]

6. Charakteristiky zadané součásti

6.1. Materiál součásti [24] [23] [6]

Součást je vyrobena z nerezové oceli. Jedná se o vysoce legovanou austenitickou chrom niklovou ocel X5CrNi18-9. Tato ocel se vyznačuje s lepší korozní odolností než ocel typu AISI 302. Mechanické vlastnosti jsou následující: vysoká tažnost, nízká mez kluzu a pevnosti, ocel vhodná pro tváření s velkou zásobou plasticity. Pevnost a mez kluzu lze zvýšit tvářením za studena, nebo přísadou dusíku, který musí být rozpuštěný v austenitu. V podstatě nemagnetická ocel se stává mírně magnetická při tváření za studena. Nízký obsah uhlíku znamená menší precipitaci karbidů do tepelně ovlivněné oblasti při svařování a nižší choullostivost k iregulární korozi. Tato ocel není stabilizována titánem nebo niobem, proto je zde možné vyloučení karbidů $M_{23}C_6$. Nestabilizovaná austenitická ocel má vysokou odolnost proti korozi, ale špatně odolává korozi pod napětím a za působení chloridů.

Aplikace použití oceli:

sudy na pivo, chemické vybavení, kuchyňské vybavení, nádoby pro použití při nízkých teplotách, mlékárenské vybavení, kuchyňské přístroje, vybavení potravinářského průmyslu, nemocniční chirurgické vybavení, subkutánní jehly, výlevky v kuchyni, námořní vybavení, nukleární nádrže, papírový průmysl, sanitární armatury, textilní barvicí vybavení, trubky.

Tepelné zpracování:

Při pomalém ochlazování oceli po odlévání nebo tváření se mohou vyskytovat na hranicích zrn karbidy chromu. Tento nepříjemný proces způsobí snížení procenta chromu v blízkosti hranic zrn, a pokud obsah chromu klesne pod 12%, může nastávat mezi-krystalická koroze. Pokud nastane tento stav je potřeba provést tepelné zpracování. Tedy vytvořit homogenní austenit novým ohřevem nad křivku změny rozpustnosti a po výdrži na teplotě rozpouštěcího žíhání rychle ochladit, aby se potlačila precipitace karbidů. Min ochlazovací rychlost 1400°C/h jak uvádí lit.[6]

6.1.1. Označení oceli

- označení dle chemického složení: X5CrNi18-9
- označení dle evropské normy: EN 1.4301
- označení dle ČSN: 17 240
- označení dle americké normy: AISI 304 (Fe/Cr18/Ni10)

6.1.2. Vlastnosti oceli

V tabulkách tab. 9.1. a tab. 9.2. jsou uvedeny charakteristické hodnoty mechanických a tepelných vlastností oceli X5CrNi18-9

Mechanické vlastnosti

Tvrdość Brinell	123
Tvrdość Knoop	138
Tvrdość Rockwell B	70.0
Tvrdość Vickers	129
Mez pevnosti v tahu	505-750 MPa
Mez kluzu v tahu	215 MPa
Prodložení do začátku vzniku trhlin	70.0 %
Yangův modul pružnosti	193 - 200 GPa
Poissonovo číslo	0.290
Nárazová práce	325 J
Shear Modulus	86.0 GPa
Materiálová konstanta K	1275 MPa
Exponent zpevnění n	0,45

Tab. 9.1. Tabulka mechanických vlastností oceli X5CrNi18-9

Teplotní vlastnosti

Měrná tepelná kapacita	0.500 J/g-°C
Tepelná vodivost	16.2 W/m-K
Teplota tání	1400 – 1455 °C
Teplota Solidu	1400 °C
Teplota Liquidu	1455 °C

Tab. 9.2. Tabulka teplotních vlastností oceli X5CrNi18-9

6.1.3. Chemické složení

C	≤ 0.0800 %
Cr	18.0 - 20.0 %
Fe	66.345 - 74.0 %
Mn	≤ 2.00 %
Ni	8.00 - 10.5 %
P	≤ 0.0450 %
Si	≤ 1.00 %
S	≤ 0.0300 %

Tab. 9.3. Tabulka chemického složení oceli X5CrNi18-9

6.2. Rozbor geometrie a rozměru ohýbaného profilu

Tvar ohnutého profilu je vytvořen ohybem z rovného profilového polotovaru, který je vytvořen z pásu pechu na ohraňovacích lisech či profilovacích kladkách.

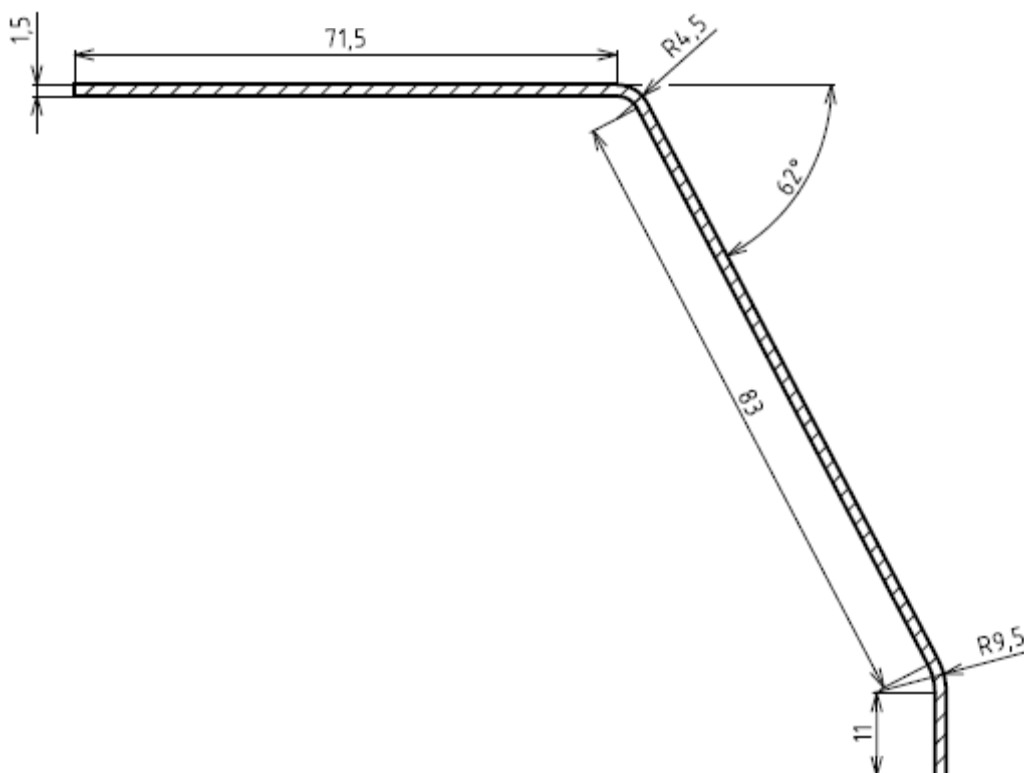
Délka tohoto rovného profilového polotovaru je zjištěna rozvinem neutrálního vlákna a není pro funkci součásti významná.

Hlavními směrodatnými tedy funkčními rozměry ohnutého profilu jsou:

- poloměr ohybu na vnitřní straně ohybu R 2200mm
- hloubka průhybu na vnitřní straně ohybu = 80mm

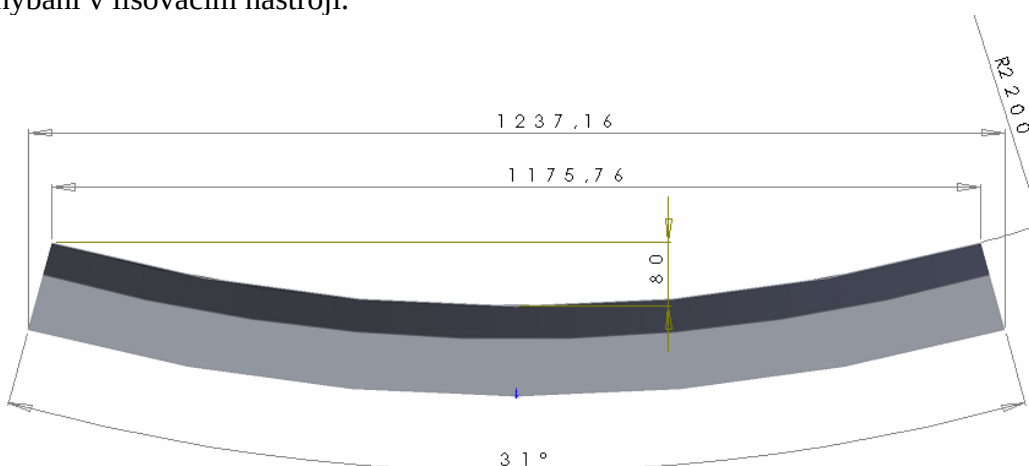


Obr. 6.2.1. Tvar ohnutého profilu



Obr. 6.2.2. Rozměry průřezu profilu

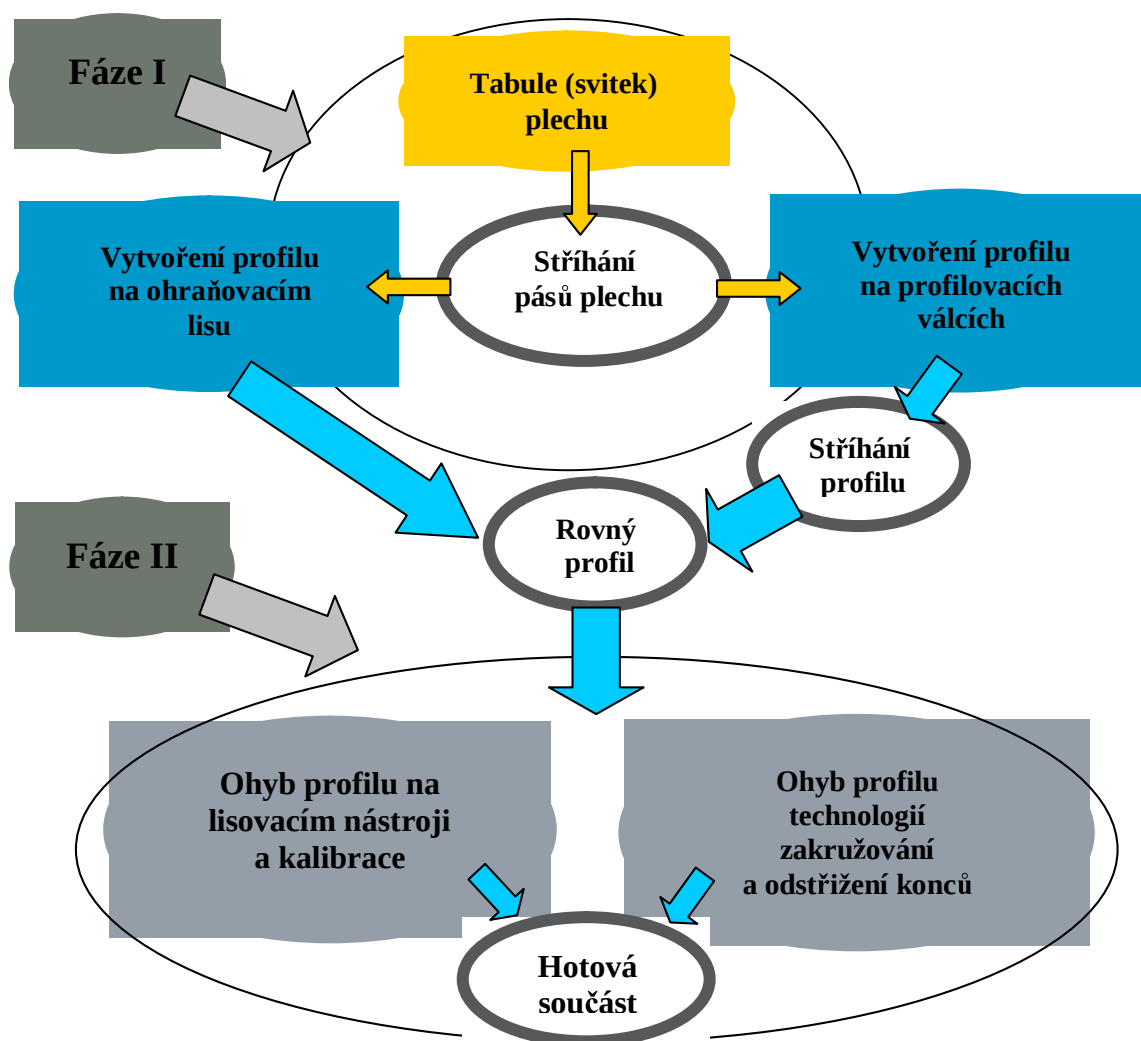
Délkové rozměry ohnutého profilu nejsou podstatné, protože vyplývají z rozměrů poloměru ohybu a hloubky průhybu. Z hlediska funkce součásti jsou nevýznamné, proto nejsou ani tolerovány. Dle lícovací soustavy ISO jsou tolerance součásti odpovídající tolerancím IT 13, IT 14. Tedy tato součást nevyžaduje zvláštní opatření, protože tyto tolerance jsou běžně dosažitelné v klasických lisovnách. Zadaná součást je jednoduchého tvaru, proto jí lze zařadit do výlisku jednoduššího tvaru. Na obr. 6.2.1. je zobrazen 3D tvar ohnutého profilu s detailem průřezu profilu. Obr. 6.2.2. zobrazuje rozměrové hodnoty průřezu profilu a obr. 6.2.3. zobrazuje tvar a rozměry ohnutého profilu v poloze, ve které bude umístěn v nástroji při ohýbání v lisovacím nástroji.



Obr. 6.2.3. Rozměry ohnutého profilu

7. Volba technologií a technologických postupů

Tato práce se zabývá dvěma technologiemi pro ohyb profilu. Klasickým ohybem v lisovacím nástroji a technologií zakružování. Každá z těchto dvou variant výroby zadané součásti je zhodnocena a následně vyhodnocena optimální varianta pro výrobu součásti. Obě dvě technologie se skládají ze dvou fází. Výroby polotovaru a ohybu vyrobeného polotovaru. Tato diplomová práce se nezabývá výrobou polotovaru, ale následně je uvedena dále nerozváděná zmínka o tomto postupu výroby polotovaru, tedy rovného profilu.



Obr. 7.1. Diagram technologického postupu

7.1. Technologický postup Fáze I

Celkový postup výroby rovného profilu lze rozdělit na dvě varianty. První operace bude pro obě varianty stejná. Ustřížení potřebné délky pásu plechu z tabule či svitku. Další operace technologického postupu se již budou lišit

Varianta A

1. operace: ustřižení pásu plechu z tabule plechu na tabulových nůžkách
2. operace: vytvoření profilu dle průřezu na obr. 6.2.2. na ohraňovacím lisu



Obr. 7.1.1. Ohraňovací lisy [12]

Varianta B

1. operace: ustřižení pásu plechu ze svitku plechu
2. operace: vytvoření profilu dle průřezu na obr. 6.2.2. na profilovacích kladkách
3. operace: ustřižení požadované délky rovného profilu

Pro konečný technologický postup je volena Varianta A, a to z následujících důvodů. Odpadá operace ustřižení požadované délky rovného polotovaru pro ohyb a také manipulace se svitkem ustřižení pásu plechu ze svitku a další manipulace se svitkem vytvořeným z ustřiženého pásu.

Jelikož se tato diplomová práce nezabývá Fází I, není dále řešeno posouzení této volby.

7.2. Technologický postup Fáze I a Fáze II se zaměřením na Fázi II

Ve Fázi I je vstupním polotovarem tabule plechu. Ve Fázi II je vstupním polotovarem rovný profil, který se dále ohýbá. Opět tuto fázi lze rozdělit na dvě varianty, ve kterých jsou použity odlišné technologie tváření. Klasický ohyb pomocí lisovacího nástroje spolu s následnou kalibrací a druhou technologií je zakružování na tří-válcové symetrické zakružovače. Tento bod se zabývá celkovým technologickým postupem s hlavním zaměřením na Fázi II

7.2.1. Technologický postup pro ohýbání profilu v lisovacím nástroji

Při technologii ohýbání bude rovný profil vtačován do tvarové ohybnice, kde následně bude vytvořen požadovaný ohyb. Po vytvoření ohybu bude zvýšena síla a provedena kalibrace tvaru. Celý proces ohybu profilu bude proveden v lisovacím nástroji na stroji navrženém dle procesních parametrů vypočítaných v bodě 8.

Technologický postup

1. operace: ustřižení pásu plechu z tabule plechu na tabulových nůžkách
2. operace: vytvoření profilu dle průřezu na obr. 6.2.2. na ohraňovacím lisu
3. operace: ohnutí rovného profilu do požadovaného tvaru
4. operace: kalibrace

Z důvodu nesymetrickosti profilu by mohlo docházet ke zkrucování či vytvoření vln na volném rameni profilu. Tento problém je ošetřen přidáním bočního přidržovače, který má zabránit vytvoření vln či zkroucení profilu po ohybu. Kalibrací je docíleno přesného tvaru, částečně se eliminuje odpružení či jiné další vady při ohýbání.

7.2.2. Technologický postup pro ohýbání profilu zakružováním

Tento technologický postup je založen na exkurzi a mnohých konzultacích s odborníky firmy **Fritzmeier s.r.o., Vyškov**.

Tato firma se zabývá výrobou kabin různých pozemních strojů počínaje vysokozdviznými vozíky až po zemědělskou techniku. Tedy se zabývají ohybem profilů, ohraňováním a dalšími tvářecími operacemi.

Celý technologický postup vychází z poznatků z praxe. Nejsou dále rozváděny výpočty konkrétních procesních parametrů pro zakružování.

Rozbor součástí a postupu technologie pro zakružování

1. Zadaný profil, který se má ohýbat je vytvořen z plechu o tloušťce 1,5 mm

Profil vytvořený z tenkého plechu není příliš vhodný pro zakružování na profilových kladkách. Postup zakružování na jeden průjezd mezi válci by byl obtížný. Proto je potřeba provádět ohyb větším počtem průjezdů mezi válci do té doby, než bude vytvořen požadovaný tvar ohnutého profilu. Jelikož se tento postup provádí zkusmo a po každém průjezdu profilu mezi kladkami je potřeba vyhodnotit tvar profilu, není možné exaktně stanovit počet průjezdů profilu mezi kladkami. Tedy dělník má měрку, podle které vyhodnocuje tvar ohnutého profilu a zvětšuje ponoření horního válce mezi válce podpěrné, až dojde k vytvoření požadovaného tvaru. Pro tuto práci je potřeba kvalifikovaného pracovníka.

Nevýhodou tohoto postupu je mnohonásobně vyšší časově náročná pracnost. Proto tento způsob technologie je vhodný pouze pro malosériovou výrobu.

2. Ohyb profilu má být proveden po celé délce

Při zakružování se konce ohnou do nespecifikovaných poloměrů, je potřeba vytvořit rovný polotovar se značným přídávkem.

Po exkurzi ve firmě Fritzmeier jsem usoudil, že by se pro zadaný profil aplikoval technologický přídavek na délku polotovaru pro zakružování o hodnotě 140mm. Po provedení ohybu na zakružovače je potřeba tento přídavek odstranit pomocí technologie odstřížení.

Technologický postup

1. operace: ustřižení pásu plechu z tabule plechu pomocí tabulových nůžek
2. operace: vytvoření profilu dle průřezu na obr. 6.2.2. na ohraňovacím lisu
3. operace: ohnutí rovného profilu do požadovaného tvaru zakružováním
4. operace: ustřižení přídatku na délku

8. Stanovení procesních parametrů tváření profilu

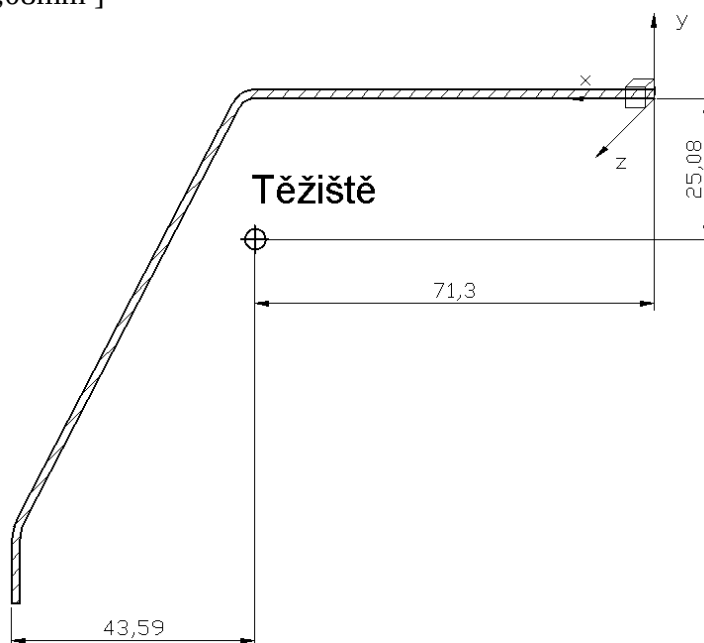
8.1. Výpočet těžiště profilu

Výpočet těžiště profilu je stěžejní pro další výpočty průřezových charakteristik profilu a pro určení neutrálního vlákna. Těžiště je umístěno uprostřed délky profilu, ale je potřeba ještě zjistit jeho umístění v příčném řezu profilu

8.1.1. Výpočet pomocí programu Solid Works

Pomocí programu Solid Works byl vymodelován tvar profilu a následně proveden výpočet těžiště tímto programem. Souřadnice těžiště vůči souřadnému systému jsou:

T [71,30mm; -25,08mm]

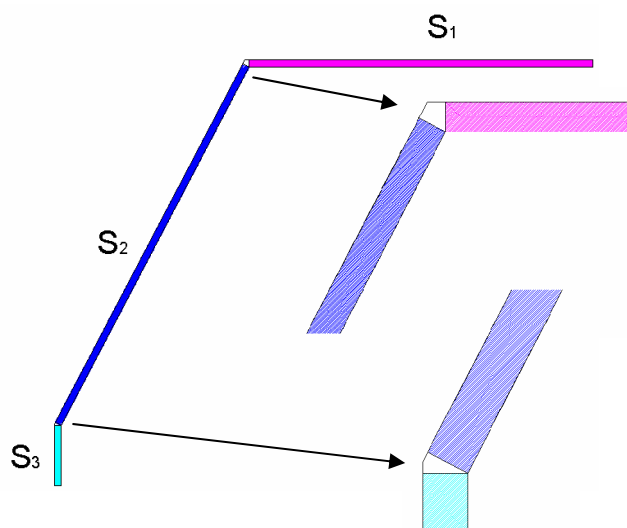


Obr. 8.1.1. Poloha těžiště vypočtená pomocí programu Solid Works

8.1.2. Výpočet těžiště grafickou metodou

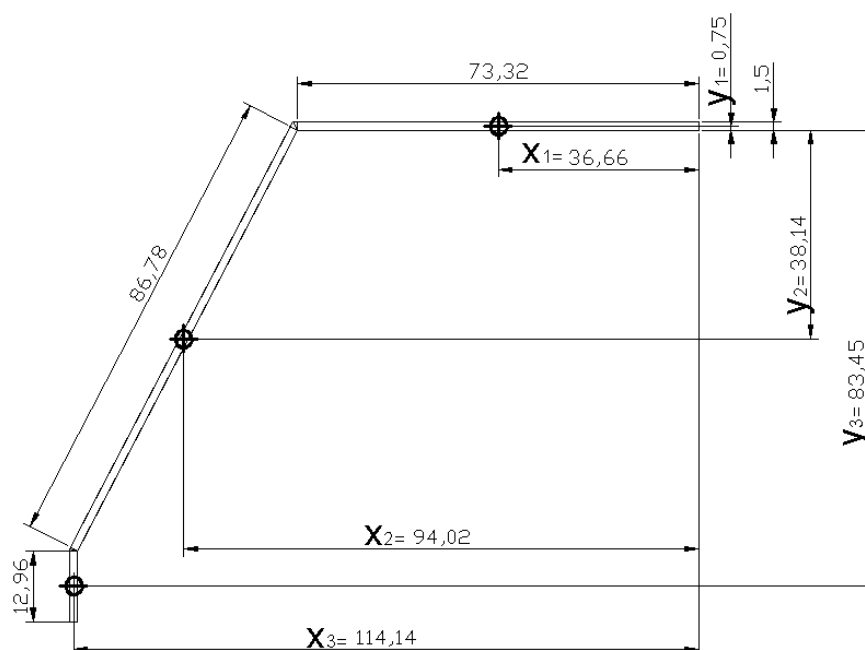
Zjištění polohy těžiště bylo provedeno grafickou paprskovou metodou. U této metody byly zanedbány rádiusy a trojúhelníkové části. Tedy příčný řez profilu byl zjednodušen na tři obdélníkové části S_1 , S_2 a S_3 . Přesná konstrukce je uvedena v Příloze 1. Poloha těžiště u této metody byla určena:

T [71,25mm; -25,06mm]



Obr. 8.1.2. Zjednodušení průřezu profilu na tři plochy

8.1.3. Matematický výpočet těžiště

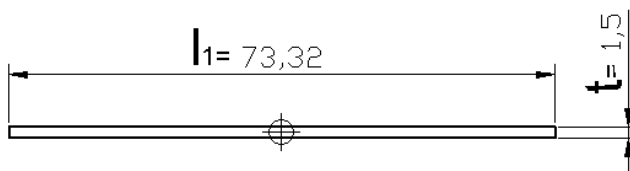
Obr. 8.1.3.1. Těžiště ploch S_1 , S_2 a S_3 a jejich vzdálenosti vůči souřadnému systému

Jak už bylo uvedeno v bodě 8.1.2. tak profil se zjednoduší na tři obdélníkové části S_1 , S_2 a S_3 a bude proveden výpočet těžiště.

8.1.3.1. Výpočet obsahů částí ploch příčného průřezu profilu

Výpočet obsahu plochy S_1

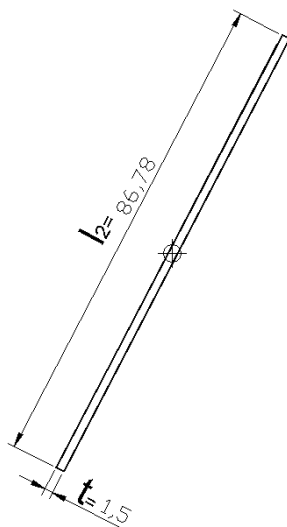
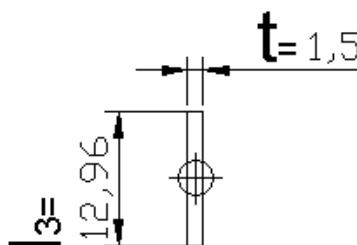
$$S_1 = l_1 \cdot t = 73,32 \cdot 1,5 = \underline{\underline{109,98 \text{ mm}^2}}$$

Obr. 8.1.3.2. Rozměry plochy S₁**Výpočet obsahu plochy S₂**

$$S_2 = l_2 \cdot t = 86,78 \cdot 1,5 = \underline{\underline{130,13 \text{ mm}^2}}$$

Výpočet obsahu plochy S₃

$$S_3 = l_3 \cdot t = 12,96 \cdot 1,5 = \underline{\underline{19,44 \text{ mm}^2}}$$

Obr. 8.1.3.3. Rozměry plochy S₂Obr. 8.1.3.4. Rozměry plochy S₃**8.1.3.2. Výpočet statických momentů****Statický moment v ose x**

$$U_x = (S_1 \cdot y_1) + (S_2 \cdot y_2) + (S_3 \cdot y_3) = (109,98 \cdot 0,75) + [130,13 \cdot (-38,14)] + [19,44 \cdot (-83,45)]$$

$$U_x = \underline{\underline{-6502,96 \text{ mm}^3}}$$

Statický moment v ose y

$$U_y = (S_1 \cdot x_1) + (S_2 \cdot x_2) + (S_3 \cdot x_3) = (109,98 \cdot 36,66) + (130,13 \cdot 94,02) + (19,44 \cdot 114,14)$$

$$U_y = \underline{\underline{18485,57 \text{ mm}^3}}$$

8.1.3.3. Výpočet polohy těžiště

Souřadnice v ose y

$$y_t = \frac{U_x}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{-6502,96}{109,98 + 130,13 + 19,44} = \underline{\underline{-25,05mm}}$$

Souřadnice v ose x

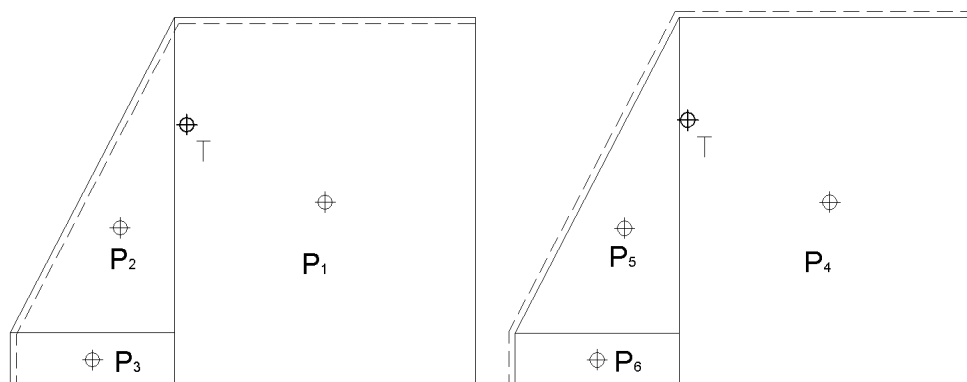
$$x_t = \frac{U_y}{S_1 + S_2 + S_3} = \frac{18485,57}{109,98 + 130,13 + 19,44} = \underline{\underline{71,22mm}}$$

$$T [71,22mm; -25,05mm]$$

Po posouzení všech tří přístupů výpočtu polohy těžiště se výsledky jednotlivých metod liší řádově v setinách milimetrů. Tento fakt potvrzuje možnost zanedbání rádiusů na profilu, jelikož odchylky výsledku jsou zanedbatelné.

Volím souřadnice těžiště T [71,30mm; -25,08mm]

8.2. Kvadratické momenty v těžišti profilu



Obr. 8.2.1. Rozdělení profilu na plochy P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, P₆

8.2.1. Výpočet kvadratického momentu v ose x

$$J_{xT(P1)} = \frac{y_{P1}^3 \cdot x_{P1}}{12} + \left(y_{P1} \cdot x_{P1} \right) \cdot y_{tP1}^2 = \frac{91,43^3 \cdot 74,23}{12} + 91,43 \cdot 74,23 \cdot 19,14^2 = 7214148,96mm^4$$

$$J_{xT(P2)} = \frac{y_{P2}^3 \cdot x_{P2}}{36} + \left(\frac{y_{P2} \cdot x_{P2}}{2} \right) \cdot y_{tP2}^2 = \frac{78,11^3 \cdot 40,66}{36} + \frac{78,11 \cdot 40,66}{2} \cdot 25,49^2 = 1570022,81mm^4$$

$$J_{xT(P3)} = \frac{y_{P3}^3 \cdot x_{P3}}{12} + \left(y_{P3} \cdot x_{P3} \right) \cdot y_{tP3}^2 = \frac{13,32^3 \cdot 40,66}{12} + 13,32 \cdot 40,66 \cdot 58,19^2 = 1841876,55mm^4$$

$$J_{xT(P4)} = \frac{y_{P4}^3 \cdot x_{P4}}{12} + (y_{P4} \cdot x_{P4}) \cdot y_{tP4}^2 = \frac{89,93^3 \cdot 73,32}{12} + 89,93 \cdot 73,32 \cdot 19,89^2 = 7052339,66 \text{ mm}^4$$

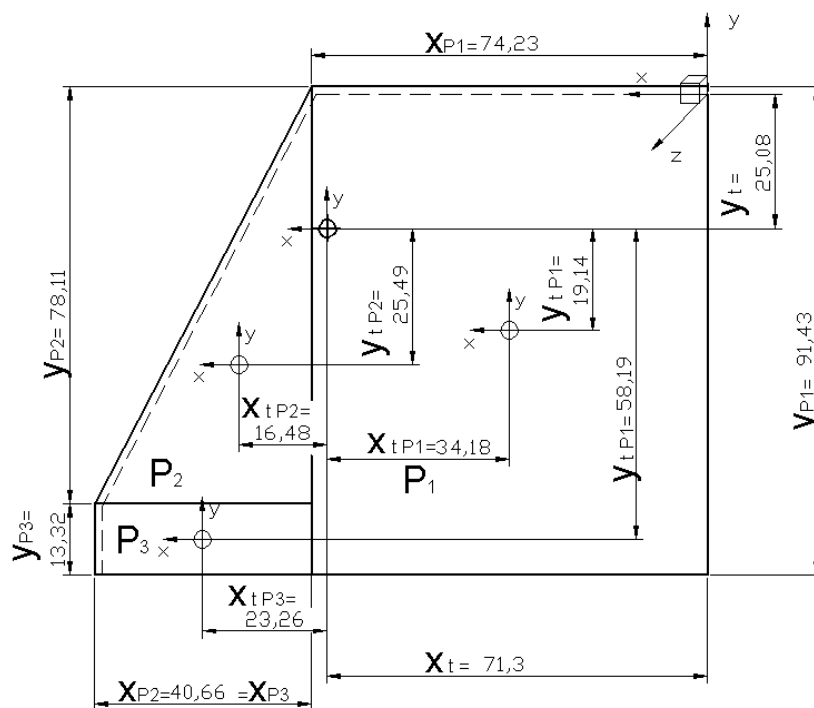
$$J_{xT(P5)} = \frac{y_{P5}^3 \cdot x_{P5}}{36} + \left(\frac{y_{P5} \cdot x_{P5}}{2} \right) \cdot y_{tP5}^2 = \frac{76,97^3 \cdot 40,07}{36} + \frac{76,97 \cdot 40,07}{2} \cdot 26,24^2 = 1569342,55 \text{ mm}^4$$

$$J_{xT(P6)} = \frac{y_{P6}^3 \cdot x_{P6}}{12} + (y_{P6} \cdot x_{P6}) \cdot y_{tP6}^2 = \frac{13,58^3 \cdot 40,07}{12} + 13,58 \cdot 40,07 \cdot 58,37^2 = 1776577,82 \text{ mm}^4$$

$$J_{xT} = J_{xT(P1)} + J_{xT(P2)} + J_{xT(P3)} - J_{xT(P4)} - J_{xT(P5)} - J_{xT(P6)} =$$

$$= 7214148,96 + 1570022,81 + 1841876,55 - 7052339,66 - 1569342,55 - 1776577,82$$

$$\underline{\underline{J_{xT} = 227788,30 \text{ mm}^4}}$$



Obr. 8.2.1.1. Rozměrové hodnoty ploch P₁, P₂, P₃,

8.2.2. Výpočet kvadratického momentu v ose y

$$J_{yT(P1)} = \frac{y_{P1} \cdot x_{P1}^3}{12} + (y_{P1} \cdot x_{P1}) \cdot x_{tP1}^2 = \frac{91,43 \cdot 74,23^3}{12} + 91,43 \cdot 74,23 \cdot 34,18^2 = 11045235,58 \text{ mm}^4$$

$$J_{yT(P2)} = \frac{y_{P2} \cdot x_{P2}^3}{36} + \left(\frac{y_{P2} \cdot x_{P2}}{2} \right) \cdot x_{tP2}^2 = \frac{78,11 \cdot 40,66^3}{36} + \frac{78,11 \cdot 40,66}{2} \cdot 16,48^2 = 577129,06 \text{ mm}^4$$

$$J_{yT(P3)} = \frac{y_{P3} \cdot x_{P3}^3}{12} + (y_{P3} \cdot x_{P3}) \cdot x_{tP3}^2 = \frac{13,32 \cdot 40,66^3}{12} + 13,32 \cdot 40,66 \cdot 23,26^2 = 367630,61 \text{ mm}^4$$

$$J_{yT(P4)} = \frac{y_{P4} \cdot x_{P4}^3}{12} + (y_{P4} \cdot x_{P4}) \cdot x_{tP4}^2 = \frac{89,93 \cdot 73,32^3}{12} + 89,93 \cdot 73,32 \cdot 34,64^2 = 10865802,42 \text{ mm}^4$$

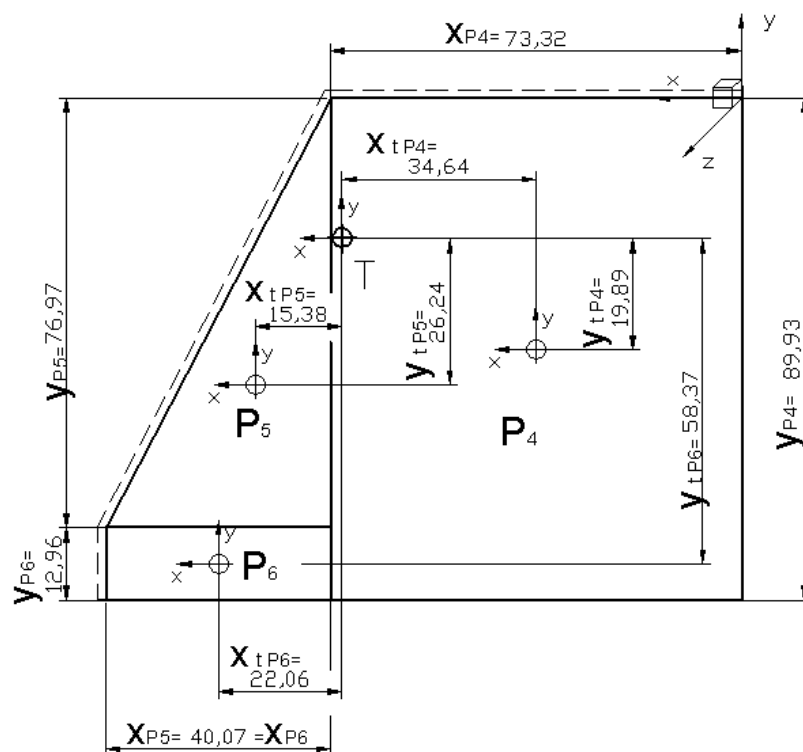
$$J_{yT(P5)} = \frac{y_{P5} \cdot x_{P5}^3}{36} + \left(\frac{y_{P5} \cdot x_{P5}}{2} \right) \cdot x_{tP5}^2 = \frac{76,97 \cdot 40,07^3}{36} + \frac{76,97 \cdot 40,07}{2} \cdot 15,38^2 = 502328,89 \text{ mm}^4$$

$$J_{yT(P6)} = \frac{y_{P6} \cdot x_{P6}^3}{12} + (y_{P6} \cdot x_{P6}) \cdot x_{tP6}^2 = \frac{13,58 \cdot 40,07^3}{12} + 13,58 \cdot 40,07 \cdot 22,06^2 = 337614,98 \text{ mm}^4$$

$$J_{yT} = J_{yT(P1)} + J_{yT(P2)} + J_{yT(P3)} - J_{yT(P4)} - J_{yT(P5)} - J_{yT(P6)} =$$

$$= 11045235,58 + 367630,61 + 577129,06 - 10865802,42 - 502328,89 - 337614,98 =$$

$$J_{yT} = 284248,96 \text{ mm}^4$$



Obr. 8.2.2.1. Rozměrové hodnoty ploch P4, P5, P6,

8.2.3. Výpočet kvadratického deviačního momentu

$$J_{yxT(P1)} = J_{txy(P1)} + x_{P1} \cdot y_{P1} \cdot x_{tP1} \cdot y_{tP1} = 0 + 91,43 \cdot 74,23 \cdot 19,14 \cdot 34,18 = 4439991,84 \text{ mm}^4$$

$$J_{yxT(P2)} = J_{txy(P2)} + \frac{x_{P2} \cdot y_{P2}}{2} \cdot x_{tP2} \cdot y_{tP2} = 0 + \frac{78,11 \cdot 40,66}{2} \cdot 25,49 \cdot 16,48 = 667069,46 \text{ mm}^4$$

$$J_{yxT(P3)} = J_{txy(P3)} + x_{P3} \cdot y_{P3} \cdot x_{tP3} \cdot y_{tP3} = 0 + 13,32 \cdot 40,66 \cdot 58,19 \cdot 23,26 = 733043,36 \text{ mm}^4$$

$$J_{yxT(P4)} = J_{tyx(P4)} + x_{P4} \cdot y_{P4} \cdot x_{tP4} \cdot y_{tP4} = 0 + 89,93 \cdot 73,32 \cdot 19,89 \cdot 34,64 = 4542968,40 \text{ mm}^4$$

$$J_{yxT(P5)} = J_{tyx(P5)} + \frac{x_{P5} \cdot y_{P5}}{2} \cdot x_{tP5} \cdot y_{tP5} = 0 + \frac{76,97 \cdot 40,07}{2} \cdot 26,24 \cdot 15,38 = 622344,71 \text{ mm}^4$$

$$J_{yxT(P6)} = J_{tyx(P6)} + x_{P6} \cdot y_{P6} \cdot x_{tP6} \cdot y_{tP6} = 0 + 13,58 \cdot 40,07 \cdot 58,37 \cdot 22,06 = 700671,28 \text{ mm}^4$$

$$\begin{aligned} J_{yxT} &= J_{yxT(P1)} + J_{yxT(P2)} + J_{yxT(P3)} - J_{yxT(P4)} - J_{yxT(P5)} - J_{yxT(P6)} = \\ &4439991,84 + 667069,46 + 733043,36 - 4542968,40 - 622344,71 - 700671,28 \\ J_{yxT} &= -25879,72 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

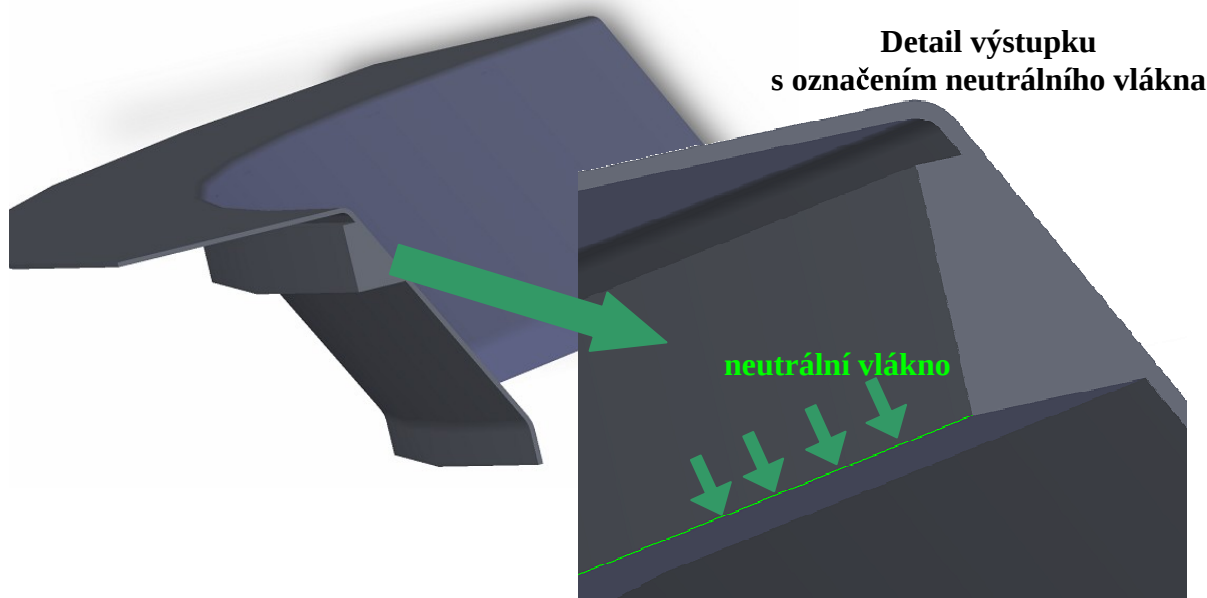
8.2.4. Výpočet kvadratického polárního

$$J_{pT} = J_{xT} + J_{yT} = 227788,30 + 284248,96 = 512037,26 \text{ mm}^4$$

8.3. Poloha neutrálního vlákna

Neutrální vlákno prochází těžištěm součásti, tedy neprochází průřezem profilu. Pro zjištění délky neutrálního vlákna byl vymodelován profil v programu SolidWorks 2005. Aby změření tohoto vlákna bylo vůbec možné, byl přimodelován výstupek na profilu, jehož hrana prochází těžištěm. Tento oblouk byl následně změřen a udává délku neutrálního vlákna.

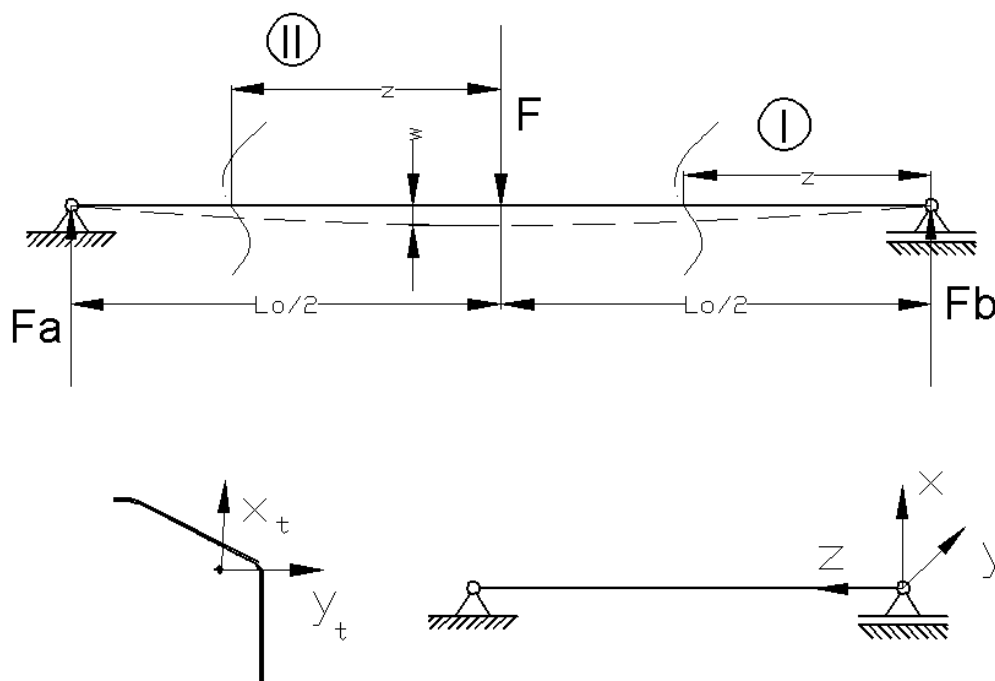
Délka neutrálního vlákna $L_{n.v.} = 1213,80 \text{ mm}$



Obr. 8.3. Poloha neutrálního vlákna na profilu

8.4. Výpočet ohybové síly na mezi kluzu dle pružnosti pevnosti

Pro výpočet sil a průhybu je počítáno s délkou polotovaru $L_0 = L_{n.v.} = 1213,80 \text{ mm}$. Tato hodnota, je délka rozvinu neutrálního vlákna a taktéž délka polotovaru pro ohyb profilu.



Obr. 8.4. Profil uložený jako nosník na dvou podporách

8.4.1. Statické rovnice rovnováhy

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \Rightarrow F - F_a - F_b = 0 \\ \sum M_a &= 0 \Rightarrow F \cdot (L_0 / 2) - F_b \cdot (L_0) = 0 \Rightarrow F_b = F / 2 \\ F_a &= F - F_b = F - (F / 2) = (F / 2)\end{aligned}$$

8.4.2. Výpočet ohybového napětí respektive pružné ohybové síly

Obecný vztah pro výpočet ohybového napětí zahrnuje obecný ohybový moment a rozkládá ho do x-ové a y-lonové složky.

$$\sigma_0 = \frac{M_0}{W_0} = \frac{M_y \cdot J_{yx} + M_x \cdot J_{yx}}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot y_{\max} - \frac{M_x \cdot J_{yx} + M_y \cdot J_x}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot x_{\max}$$

Dále bude uvažován stav základního ohybu kde $M_x = 0$

$$\sigma_0 = \frac{M_y \cdot J_{yx}}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot y_{\max} - \frac{M_y \cdot J_x}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot x_{\max}$$

Cílem tohoto výpočtu je vyhodnotit ohybovou sílu na mezi kluzu tedy pružnou ohybovou sílu, proto za $\sigma_0 \leftarrow \sigma_k$ je dosazena mez kluzu a ohybová síla je vyjádřena z ohybového

momentu na základě znalostí statické rovnováhy v nosníku. $M_y = \frac{F \cdot L_0}{4}$

Tedy dále lze psát:

$$\sigma_k = \frac{F \cdot L_0}{4} \cdot \left(\frac{J_{yx}}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot y_{\max} - \frac{J_x}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot x_{\max} \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = \frac{\sigma_k \cdot 4}{L_0 \cdot \left(\frac{J_{yx}}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot y_{\max} - \frac{J_x}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot x_{\max} \right)}$$

$$F = \frac{215 \cdot 4}{1213,80 \cdot \left(\frac{-25879,72}{(-25879,72)^2 - 284248,96 \cdot 227778,30} \cdot y_{\max} - \frac{227778,30}{(-25879,72)^2 - 284248,96 \cdot 227778,30} \cdot x_{\max} \right)}$$

Z důvodu nesymetričnosti profilu je tento výpočet složitější, protože je potřeba určit hodnoty $y_{\max}$, $x_{\max}$ tedy tato ohýbací síla bude jiná v tlakové a jiná v tahové části.

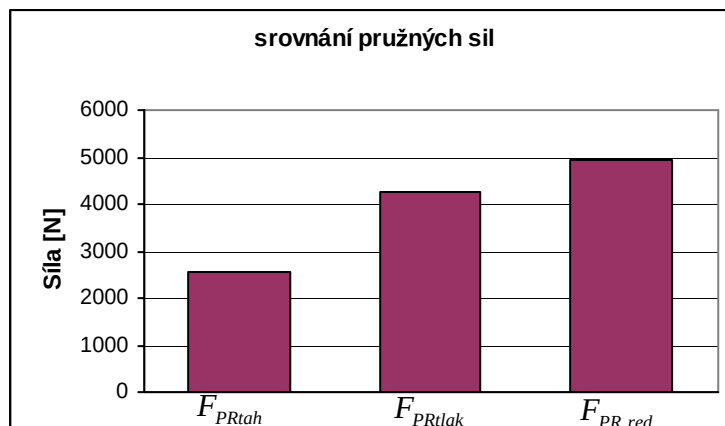
Následující tab. 10 zobrazuje hodnoty pružných sil pro obě části profilu, které byly vypočteny dosazením různých $y_{\max}$, $x_{\max}$ do vzorce pro výpočet ohybové síly.

	$x_{\max}$	$y_{\max}$	Ohybová síla pružná
Tahová část	71,30mm	64,85	$F_{PRtah} = 2533,58N$
Tlaková část	43,95	26,58	$F_{PRtlak} = 4243,40N$

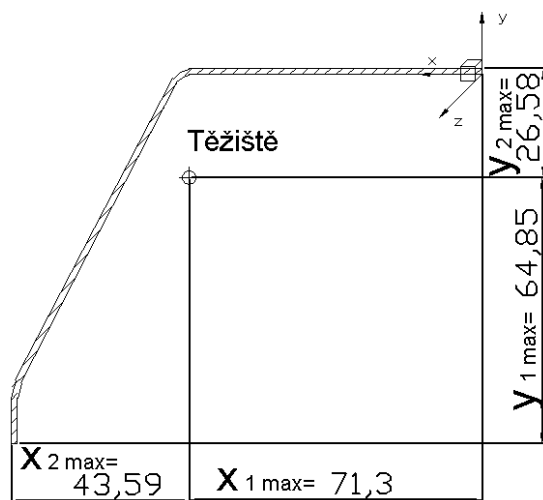
Tab. 10 Tabulka Pružných ohybových sil pro tahovou a tlakovou oblast profilu

Pro zavedení vlivu tlakové i tahové oblasti na pružnou sílu je zavedena pružná síla redukováná, která je určena vztahem:

$$F_{PR red} = \sqrt{(F_{PRtah}^2 + F_{PRtlak}^2)} = \sqrt{(2533,58^2 + 4243,40^2)} = \underline{\underline{4942,20N}}$$



Obr 8.4.2.1. Srovnávací graf velikosti pružných ohybových sil

Obr. 8.4.2.2. Označení hodnot $x_{\max}$ a $y_{\max}$ na průřezu profilu

8.5. Výpočet pružného průhybu w

U zadaného profilu by bylo komplikované počítat maximální rádius ohybu dle konvenčních vztahů. Aby bylo podmínky překročení minimálního poloměru dosaženo je proveden následně výpočet průhybu až do meze kluzu dle Castiglianovy věty.

8.5.1. Výpočet ohybových momentů a následných parciálních derivací pro úseky I a II

Úsek I

$$M_o = -F_b \cdot z$$

$$\frac{\partial M_o}{\partial F} = 0$$

Úsek II

$$M_o = -F_b \cdot (z + L_o / 2) + F \cdot z$$

$$\frac{\partial M_o}{\partial F} = z$$

8.5.2. Výpočet průhybu w v bodě působení síly F

$$w = \frac{\partial W}{\partial F} = \int_0^z \frac{M_o}{E \cdot J_y} \cdot \frac{\partial M_o}{\partial F} dz = \int_0^{L_o/2} \frac{-F_b \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot \frac{\partial M_o}{\partial F} dz + \int_0^{L_o/2} \frac{-F_b \cdot (z + L_o / 2) + F \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot \frac{\partial M_o}{\partial F} dz$$

$$w = \frac{\partial W}{\partial F} = \int_0^{L_o/2} \frac{-F_b \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot 0 \cdot dz + \int_0^{L_o/2} \frac{-F_b \cdot (z + L_o / 2) + F \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz$$

$$w = \frac{\partial W}{\partial F} = \int_0^{L_o/2} \frac{-F_b \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz + \int_0^{L_o/2} \frac{-F_b \cdot L_o / 2}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz + \int_0^{L_o/2} \frac{F \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz$$

$$F_b = F / 2$$

$$w = \frac{\partial W}{\partial F} = \int_0^{L_0/2} \frac{-(F/2) \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz + \int_0^{L_0/2} \frac{-F/2 \cdot L_0/2}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz + \int_0^{L_0/2} \frac{F \cdot z}{E \cdot J_y} \cdot z \cdot dz$$

$$w = \left[\frac{-(F/2) \cdot z^3}{3 \cdot E \cdot J_y} \right]_0^{L_0/2} + \left[\frac{-(F/2) \cdot (L_0/2) \cdot z^2}{2 \cdot E \cdot J_y} \right]_0^{L_0/2} + \left[\frac{F \cdot z^3}{3 \cdot E \cdot J_y} \right]_0^{L_0/2}$$

$$w = \frac{-(F/2) \cdot (L_0/2)^3}{3 \cdot E \cdot J_y} + \frac{-(F/2) \cdot (L_0/2) \cdot (L_0/2)^2}{2 \cdot E \cdot J_y} + \frac{F \cdot (L_0/2)^3}{3 \cdot E \cdot J_y}$$

$$w = \frac{1}{E \cdot J_y} \cdot \left[\frac{F}{3} (L_0/2)^3 - \frac{F}{6} (L_0/2)^3 - \frac{F \cdot L_0}{3} (L_0/2)^3 \right]$$

$$w = \frac{1}{2 \cdot 10^5 \cdot 284248,96} \cdot \left[\frac{F}{3} (1213,80/2)^3 - \frac{F}{6} (1213,80/2)^3 - \frac{F \cdot 1213,80}{8} (1213,80/2)^2 \right]$$

Tato rovnice slouží pro výpočet průhybu při dosazení síly při napětí do meze kluzu. Vypočtené pružné ohybové síly v tahové a tlakové oblasti a síly redukované jsou dosazeny za F a následně je vypočítán je průhyb w. Hodnoty jsou uvedeny v tab. 11.

Ohybová síla pružná	Průhyb
$F_{PRtah} = 2533,58N$	$w = 0,83 \text{ mm}$
$F_{PRtlak} = 4243,40N$	$w = 1,39 \text{ mm}$
$F_{PRred} = 4942,20N$	$w = 1,62 \text{ mm}$

Tab. 11 Tabulka pružných ohybových sil a průhybu

8.5.3. Výpočet průhybu dle lit.[26]

Další možnou variantou je výpočet průhybu dle přibližného vzorce, který je uveden ve strojnických tabulkách [26]

$$w' = \frac{F \cdot L_0^3}{48 \cdot E \cdot J_y} = \frac{F \cdot 1213,80^3}{48 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 284248,96}$$

Vypočtené hodnoty v jednotlivých oblastech jsou uvedeny v tab. 12. Stejně jako v bodu 8.5.2. Se do výše uvedeného vzorce za hodnotu F dosazují hodnoty jednotlivých sil.

Ohybová síla pružná	Průhyb dle Castigliana	Průhyb dle lit. [26]
$F_{PRtah} = 2533,58N$	$w = 0,83 \text{ mm}$	$w' = 1,66 \text{ mm}$
$F_{PRtlak} = 4243,40N$	$w = 1,39 \text{ mm}$	$w' = 2,78 \text{ mm}$
$F_{PR red} = 4942,20N$	$w = 1,62 \text{ mm}$	$w' = 3,24 \text{ mm}$

Tab. 12 Srovnávací tabulka pružných ohybových sil a průhybů dle Castigliana a lit. [26]

Pro informaci je provedena záměna v dosazení kvadratického momentu. Pokud se dosadí místo J_y J_x hodnoty průhybu jsou uvedeny v tab. 13

$$w'' = \frac{F \cdot L_0^3}{48 \cdot E \cdot J_x} = \frac{F \cdot 1213,80^3}{48 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 227778,30}$$

Ohybová síla	Průhyb dle Castigliana	Průhyb dle lit. [26]
$F_{PRtah} = 2533,58N$	$w = 1,04 \text{ mm}$	$w'' = 2,07 \text{ mm}$
$F_{PRtlak} = 4243,40N$	$w = 1,74 \text{ mm}$	$w'' = 3,47 \text{ mm}$
$F_{PR red} = 4942,20N$	$w = 1,62 \text{ mm}$	$w'' = 4,04 \text{ mm}$

Tab. 13 Srovnávací tabulka pružných ohybových sil a průhybů se záměnou kvadrat. momentů

8.6. Výpočet pružné ohybové síly dle teorie ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění

Pro srovnání vypočtených pružných ohybových sil na základě pružnosti pevnosti je v tomto bodě řešen pružný ohyb na základě teorie ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění. Celý výpočet rozdělujeme na tři fáze. Pružný ohyb, pružně-plastický ohyb a ideálně plastický ohyb. Tento výpočet je zaměřen na fázi pružného ohybu. Pro výpočet je nutno znát vztahy pro deformaci v krajních vláknech tlakových:

$$\varepsilon_{1stlak} = \frac{x_{\max 2}}{\rho} \quad (8.6.1)$$

a v krajních vláknech tahových:

$$\varepsilon_{1stah} = \frac{x_{\max 1}}{\rho} \quad (8.6.2)$$

Následně z Hookova zákona je odvozen vztah pro napětí v tlakových krajních vláknech:

$$\sigma_{1stlak} = E \cdot \frac{x_{\max 2}}{\rho} \quad (8.6.3)$$

a v tahových krajních vláknech:

$$\sigma_{1s\ tah} = E \cdot \frac{x_{\max 1}}{\rho} \quad (8.6.4)$$

Pokud tyto rovnice dosadíme do rovnice pro ohybový moment, můžeme následně vypočítat ohybové momenty.

$$M_0 = \frac{E \cdot J_y}{\rho} \quad (8.6.5)$$

8.6.1. Výpočet ohybového momentu a ohybové síly ve fázi pružného ohybu

Pro tento případ je potřeba přijmout předpoklad že $\sigma_{1s} = \sigma_k = Re \doteq R_{p0,2}$

Parametry v tlakové oblasti

$$M_{0tlak} = \frac{E \cdot J_y}{\rho} = \frac{E \cdot J_y}{E \cdot x_{\max 2}} \cdot \sigma_k = \frac{J_y}{x_{\max 2}} \cdot \sigma_k = \frac{284248,96}{43,59} \cdot 215 = \underline{\underline{1402007,95 Nmm}}$$

$$F'_{PRtlak} = \frac{4 \cdot M_{0tlak}}{L_{n.v.}} = \frac{4 \cdot 1402007,95}{1213,8} = \underline{\underline{4620,23 N}}$$

Parametry v tahové oblasti

$$M_{0tah} = \frac{E \cdot J_y}{\rho} = \frac{E \cdot J_y}{E \cdot x_{\max 1}} \cdot \sigma_k = \frac{J_y}{x_{\max 1}} \cdot \sigma_k = \frac{284248,96}{71,3} \cdot 215 = \underline{\underline{857132,21 Nmm}}$$

$$F'_{PRtah} = \frac{4 \cdot M_{0tah}}{L_{n.v.}} = \frac{4 \cdot 857132,21}{1213,8} = \underline{\underline{2824,62 N}}$$

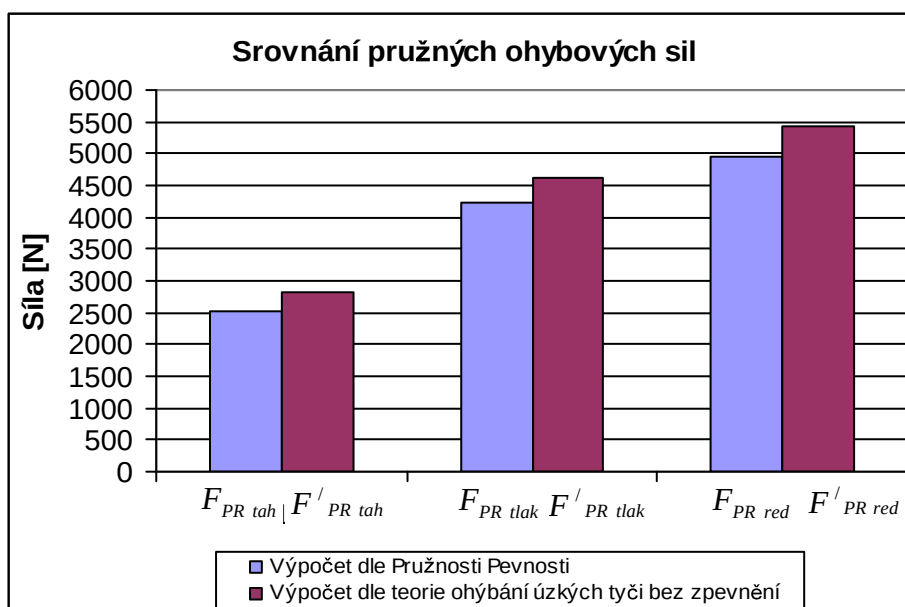
Tyto vypočítané hodnoty sil ve fázi pružného ohybu se liší od hodnot vypočtených metodou v bodě 8.4.2. o cca 300N v tahové části a o cca 380N v tlakové části. Proto usuzuji, že zvolené metody výpočtu jsou správné.

Výpočet redukované pružné ohybové síly

$$F'_{PRred} = \sqrt{\left((F'_{PRtah})^2 + (F'_{PRtlak})^2\right)} = \sqrt{(4620,23^2 + 2824,62^2)} = \underline{\underline{5415,26 N}}$$

Pružná ohybová síla	Výpočet dle Pružnosti Pevnosti	Výpočet dle teorie ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění
<i>tahová oblast</i>	2533,58 N	2824,62 N
<i>tlaková oblast</i>	4243,40 N	4620,23 N
<i>redukováná síla</i>	4942,20 N	5415,26 N

Tab. 14 Srovnávací tabulka pružných ohybových sil

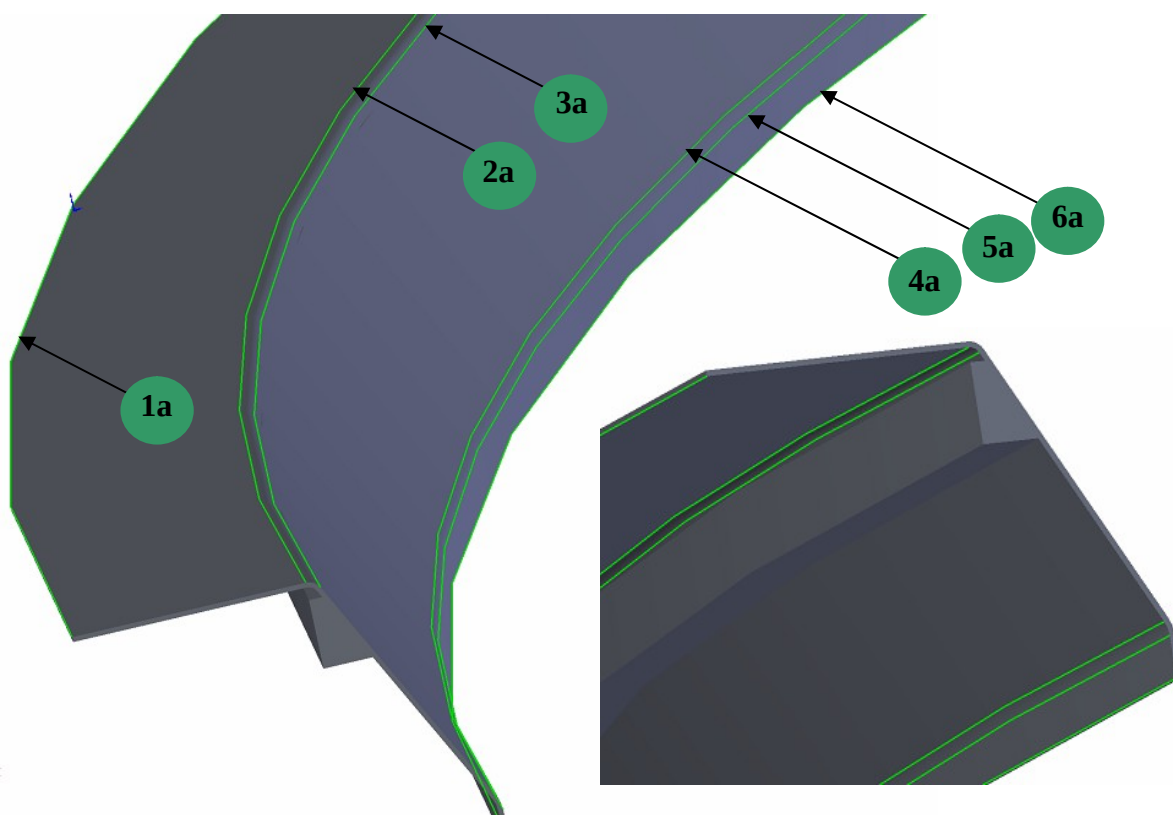


Obr. 8.6.1. Srovnání pružných ohybových sil

8.7. Deformace podél průřezu profilu

Pro zjištění deformací podél průřezu byl proveden podobný postup jako u neutrálního vlákna. Na vymodelovaném profilu byly změřeny délky některých oblouků a následně byla vypočítána deformace v některých místech průřezu.

8.7.1. Vlákná na vnější a vnitřní straně profilu



Obr. 8.7.1. Charakteristická vlákna na průřezu

Hodnoty délek vnitřních vláken jsou označeny úplně stejným systémem s rozdílem značení písmena (1b,2b,3b,4b,5b,6b)

Tabulka délek a vypočítaných deformací

Oblouk	Délky oblouků [mm]	Deformace ε [-]
neutrální vlákno	1213,80	-
1a	1252,37	0,031776
2a	1213,69	-0,000091
3a	1211,53	-0,001870
4a	1190,80	-0,018949
5a	1190,22	-0,019427
6a	1190,3	-0,019361
1b	1252,37	0,031776
2b	1213,69	-0,000091
3b	1212,25	-0,001277
4b	1191,52	-0,018356
5b	1191,03	-0,018759
6b	1191,03	-0,018759

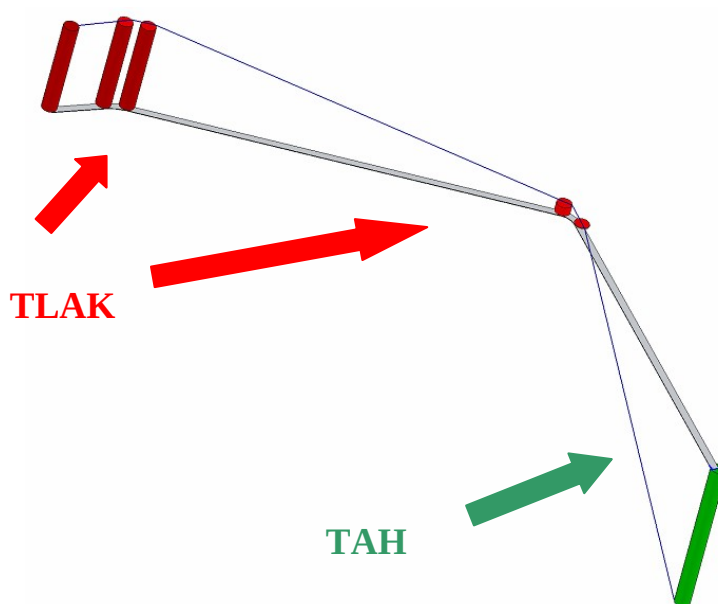
Tab. 15 Tabulka délek oblouků a vypočítaných deformací

8.7.2. Vzorový výpočet deformace

$$\varepsilon_{1a} = \frac{L_{1a} - L_{n.o.}}{L_{n.o.}} = \frac{1252,37 - 1213,80}{1213,80} = 0,031776$$

8.7.3. Průběh deformací podél průřezu profilu

Graficky je tato tabulka zobrazena na obr. 8.7.3. Jsou zde zaznamenány deformace pouze na vnější ploše profilu. Zelený sloupec znamená tahové deformace a sloupce červené deformace tlakové. Jednotlivé sloupce jsou propojeny přímkami, aby byl zřejmý hrubý odhad deformací v celém průřezu.



Obr. 8.7.3. Průběh poměrné deformace podél průřezu profilu

8.8. Výpočet skutečného ohybového napětí z aproximačních diagramů

Pro výpočet skutečného ohybového napětí je uvažována maximální deformace zjištěná z bodu 8.7.2. Jejíž hodnota je $\varepsilon = 0,031776$

8.8.1. Výpočet logaritmické deformace

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) = \ln(1 + 0,031776) = \underline{\underline{0,0313}}$$

8.8.2. Výpočet skutečného ohybového napětí pomocí Hollomonova aproximace

$$\bar{\sigma}_1 = K \cdot \varphi^n = 1275 \cdot 0,0313^{0,45} = \underline{\underline{268,23MPa}}$$

8.8.3. Výpočet skutečného ohybového napětí pomocí jedno-přímkové aproximace

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_{ke} + D\varphi$$

Výpočet extrapolované meze kluzu

$$\sigma_{ke} = \frac{1-n}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{1-0,45}{1+0,45} \cdot 1275 \cdot 0,45^{0,45} = \underline{\underline{337,64MPa}}$$

Výpočet modulu zpevnění pro jedno-přímkovou aproximaci

$$D = \frac{2}{1+n} \cdot K \cdot n^n = \frac{2}{1+0,45} \cdot 1275 \cdot 0,45^{0,45} = \underline{\underline{1227,77MPa}}$$

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_{ke} + D\varphi = 337,64 + 1227,77 \cdot 0,0313 = \underline{\underline{376,07MPa}}$$

8.8.4. Výpočet skutečného ohybového napětí pomocí dvou-přímkové aproximace

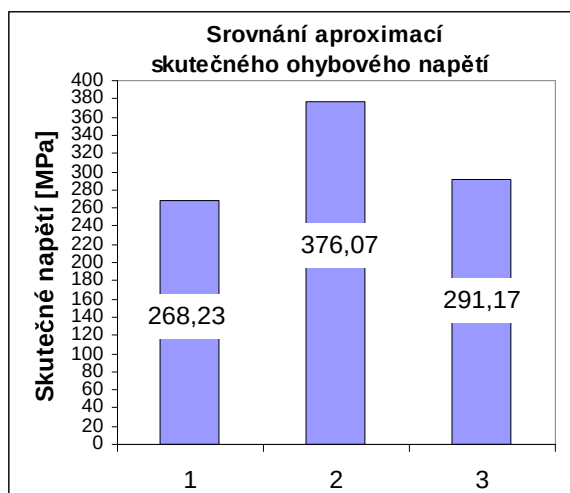
$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D'\varphi$$

Výpočet Modulu zpevnění pro dvou-přímkovou aproximaci

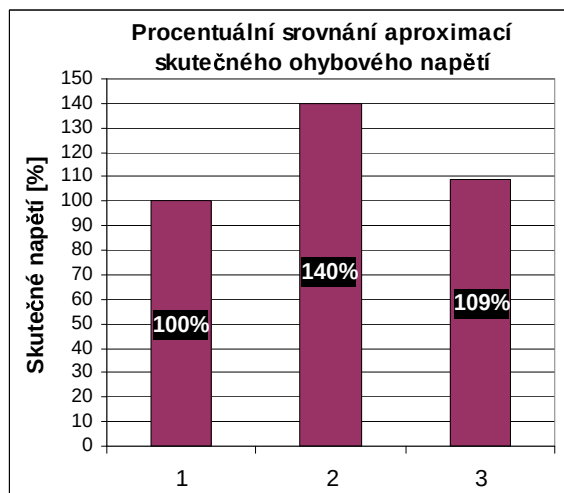
U oceli AISI 304 se uvažuje mez kluzu jako smluvní mez kluzu tedy $R_{p0,2} = 215MPa$

$$D' = K \cdot n \cdot \left[\frac{K(1-n)}{R_{p0,2}} \right]^{\frac{1-n}{n}} = 1275 \cdot 0,45 \cdot \left[\frac{1275(1-0,45)}{215} \right]^{\frac{1-0,45}{0,45}} = \underline{\underline{2433,62MPa}}$$

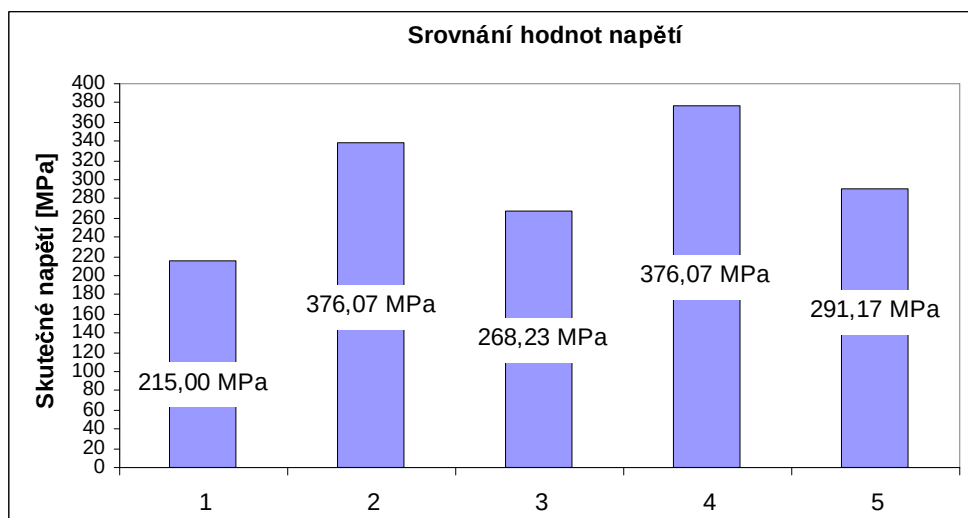
$$\bar{\sigma}_3 = R_{p0,2} + D'\varphi = 215 + 2433,62 \cdot 0,0313 = \underline{\underline{291,17MPa}}$$



1 - Hollomonova aproximace
2 - Jedno-přímková aproximace
3 - Dvou-přímková aproximace
Obr. 8.8.1. Srovnání aproximací



1 - Hollomonova aproximace
2 - Jedno-přímková aproximace
3 - Dvou-přímková aproximace
Obr. 8.8.2. Procentuální srovnání aproximací



1 - Mez kluzu; 2 - Extrapolovaná mez kluzu; 3 - Skutečné ohybové napětí dle Hollomonovy aproximace;
4 - Skutečné ohybové napětí dle jedno-přímkové aproximace;
5 - Skutečné ohybové napětí dle dvou-přímkové aproximace

Obr. 8.8.1. Srovnání hodnot napětí

8.9. Výpočet ohybové síly ze skutečného ohybového napětí

$$F = \frac{\bar{\sigma} \cdot 4}{L_0 \cdot \left(\frac{J_{yx}}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot y_{\max} - \frac{J_x}{J_{yx}^2 - J_y \cdot J_x} \cdot x_{\max} \right)}$$

$$F = \frac{\bar{\sigma} \cdot 4}{1213,80 \cdot \left(\frac{-25879,72}{(-25879,72)^2 - 284248,96 \cdot 227778,30} \cdot y_{\max} - \frac{227778,30}{(-25879,72)^2 - 284248,96 \cdot 227778,30} \cdot x_{\max} \right)}$$

Dosažením hodnot $x_{\max}$, $y_{\max}$ a $\bar{\sigma}$ do výše uvedeného vzorce získáme hodnoty uvedené v tab. 16

Napětí	$x_{\max}$	$y_{\max}$	Ohybová síla plastická
Hollomonova aprox. $\bar{\sigma}_1 = 268,23 \text{ MPa}$	71,30mm	64,85	$F_{PLtah} = 3160,85 \text{ N}$
	43,95	26,58	$F_{PLtlak} = 5293,98 \text{ N}$
Redukovaná ohybová síla plastická pro Hollomonova aproximaci $F_{PL\ red} = \sqrt{\left(F_{PLtah}\right)^2 + \left(F_{PLtlak}\right)^2} = \sqrt{3160,85^2 + 5293,98^2} = \underline{\underline{6165,81 \text{ N}}}$			
Jedno-přímková aprox. $\bar{\sigma}_2 = 376,07 \text{ MPa}$	71,30mm	64,85	$F'_{PLtah} = 4431,65 \text{ N}$
	43,95	26,58	$F'_{PLtlak} = 7422,39 \text{ N}$
Redukovaná ohybová síla plastická pro Jedno-přímkovou aproximaci $F'_{PL\ red} = \sqrt{\left(F'_{PLtah}\right)^2 + \left(F'_{PLtlak}\right)^2} = \sqrt{4431,65^2 + 7422,39^2} = \underline{\underline{8644,73 \text{ N}}}$			
Dvou-přímková aprox. $\bar{\sigma}_3 = 291,17 \text{ MPa}$	71,30mm	64,85	$F''_{PLtah} = 3431,18 \text{ N}$
	43,95	26,58	$F''_{PLtlak} = 5746,75 \text{ N}$
Redukovaná ohybová síla plastická pro Dvou-přímkovou aproximaci $F''_{PL\ red} = \sqrt{\left(F''_{PLtah}\right)^2 + \left(F''_{PLtlak}\right)^2} = \sqrt{3431,18^2 + 5746,75^2} = \underline{\underline{6693,14 \text{ N}}}$			

Tab. 16 Tabulka hodnot ohybové plastické síly pro jednotlivé aproximace

Výsledky plastických ohybových sil vypočtených z jednotlivých aproximací vyšly s určitými rozdíly. V bodě 2.2., jsou tyto aproximace teoreticky vysvětleny a je zřejmé v jakých oblastech technologie je třeba použít jednotlivé aproximace. Tedy Jedno-přímková aproximace není vhodná pro výlisky s malými deformacemi, u kterých se jedná o volný ohyb. Proto Jedno-přímková aproximace není pro případ součásti řešené v této diplomové práci vhodná. Pro další výpočty bude jako plastická ohybová síla uvažována, síla vypočítaná Dvou-přímkovou aproximací. $F''_{PL\ red} = \underline{\underline{6693,14 \text{ N}}}$

8.10. Výpočet celkové síly pro ohyb

Stejně tak jako celková deformace se skládá z deformace pružné a plastické, tak i pro výpočet celkové ohybové síly je potřeba vzít v úvahu tuto superpozici.

$$F_{oC} = F_{PR} + F_{PL}$$

V tab. 17 jsou uvedené hodnoty ohybových sil pro všechny jednotlivé parciální ohybové síly. Pro přehlednost již v tabulce nejsou uvedeny parciální pružné ohybové síly vypočítané dle teorie ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění. Jako hlavní výstupní informace z tabulky 17 jsou brány hodnoty superpozic redukovaných ohybových sil pružných a plastických.

Napětí	Ohybová síla plastická	Ohybová síla pružná dle pružnosti pevnosti	Celková ohybová síla
Hollomonova aprox.	$F_{PLtah} = 3160,85N$	$F_{PRtah} = 2533,58N$	$F_{oCtah} = 5694,43N$
	$F_{PLtlak} = 5293,98N$	$F_{PRtlak} = 4243,40N$	$F_{oCtlak} = 9537,38N$
	$F_{PLred} = 6165,81N$	$F_{PRred} = 4942,20N$	$F_{oCred} = 11108,01N$
	Ohybová síla plastická	Ohybová síla pružná dle teorie ohýbání úzkých tyčí	Celková ohybová síla
	$F_{PLred} = 6165,81N$	$F'_{PRred} = 5415,26N$	$F^{*}_{oCred} = 11581,07N$
Jedno-přímková aprox.	$F'_{PLtah} = 4431,65N$	$F_{PRtah} = 2533,58N$	$F'_{oCtah} = 6965,23N$
	$F'_{PLtlak} = 7422,39N$	$F_{PRtlak} = 4243,40N$	$F'_{oCtlak} = 11665,79N$
	$F'_{PLred} = 8644,73N$	$F_{PRred} = 4942,20N$	$F'_{oCred} = 13586,93N$
	Ohybová síla plastická	Ohybová síla pružná dle teorie ohýbání úzkých tyčí	Celková ohybová síla
	$F'_{PLred} = 8644,73N$	$F'_{PRred} = 5415,26N$	$F^{*'}_{oCred} = 14059,99N$
Dvou-přímková aprox.	$F''_{PLtah} = 3431,18N$	$F_{PRtah} = 2533,58N$	$F''_{oCtah} = 5964,76N$
	$F''_{PLtlak} = 5746,75N$	$F_{PRtlak} = 4243,40N$	$F''_{oCtlak} = 9990,15N$
	$F''_{PLred} = 6693,14N$	$F_{PRred} = 4942,20N$	$F''_{oCred} = 11635,34N$
	Ohybová síla plastická	Ohybová síla pružná dle teorie ohýbání úzkých tyčí	Celková ohybová síla
	$F''_{PLred} = 6693,14N$	$F'_{PRred} = 5415,26N$	$F^{*''}_{oCred} = 12108,40N$

Tab. 17 Tabulka ohybových sil

Jako směrodatná celková síla je uvažována hodnota síly $F^{*''}_{oCred} = 12108,40N$. Důvody této volby jsou následující. Tato síla je superpozicí pružné redukované síly vypočítané z teorie ohýbání úzkých tyčí a ohybové síly plastické vypočítané z dvou-přímkové aproximace. Pružná síla vypočítaná teorie ohýbání úzkých tyčí byla zvolena, protože její hodnota je větší než u síly vypočítané z pružnosti pevnosti. Volba plastické ohybové síly z dvou-přímkové aproximace byla zdůvodněna výše.

8.11. Výpočet kalibrační síly

Kalibrační síla se volí mnohem vyšší než síla ohybová. Pro výpočet kalibrační síly může být použit postup, který uvádí Dvořák [1]. Ale u tohoto případu je kalibrační síla volena dle vzorce:

$$F_k = F^{*''}_{oCred} \cdot 2,5 = 12108,40 \cdot 2,5 = \underline{\underline{30271N}}$$

8.12. Výpočet maximální ohybové síly pro návrh stroje

$$F_{max} = F^{*''}_{oCred} + F_k = 12108,40 + 30271 = \underline{\underline{42379,4N}}$$

Dle této maximální síly bude následně navržen stroj pro ohýbání profilu.

8.13. Výpočet odpružení

Odpružováním se již nepřímo zabýval bod 8.4., kde se počítal průhyb a pružná síla na mezi kluzu. V tomto bodě je přímo vypočítána konkrétní hodnota odpružení pro ohyb zadaného profilu.

$$\hat{\beta} = \alpha_1 - \alpha_2 = \frac{M_0 \cdot L_0}{E \cdot J_y} = \frac{\left(\frac{F_{oc} \cdot L_0}{2} \right) \cdot L_0}{E \cdot J_y} = \frac{\left(\frac{9990,15 \cdot 1213,8}{4} \right) \cdot 1213,8}{2 \cdot 10^5 \cdot 284248,96} = \underline{\underline{0,0647}}$$

$$\beta = \frac{\hat{\beta} \cdot 180}{\pi} = \frac{0,0647 \cdot 180}{\pi} = \underline{\underline{3^{\circ}42'}}$$

S touto hodnotou odpružení je potřeba následně počítat při návrhu konstrukce nástroje a návrhu ohybové síly. Tedy odpružení je eliminováno kalibrační silou a konstrukčními úpravami na nástroji.

9. Návrh tvářecího nástroje a stroje

9.1. Návrh tvářecího nástroje

9.1.1. Návrh lisovacího nástroje

Konstrukce lisovacího nástroje je provedena následovně. Jednou z hlavních částí nástroje je základová deska, která je upnuta ke stolu hydraulického lisu. K základové desce je upevněna ohybnice pomocí šesti šroubů. K základové desce je také připevněn zakládací doraz pomocí šroubů. Horní část nástroje je připevněna k beranu lisu pomocí stopky. Stopka, spolu s ohybníkem je smontována do tří desek, které jsou sešroubovány šrouby.

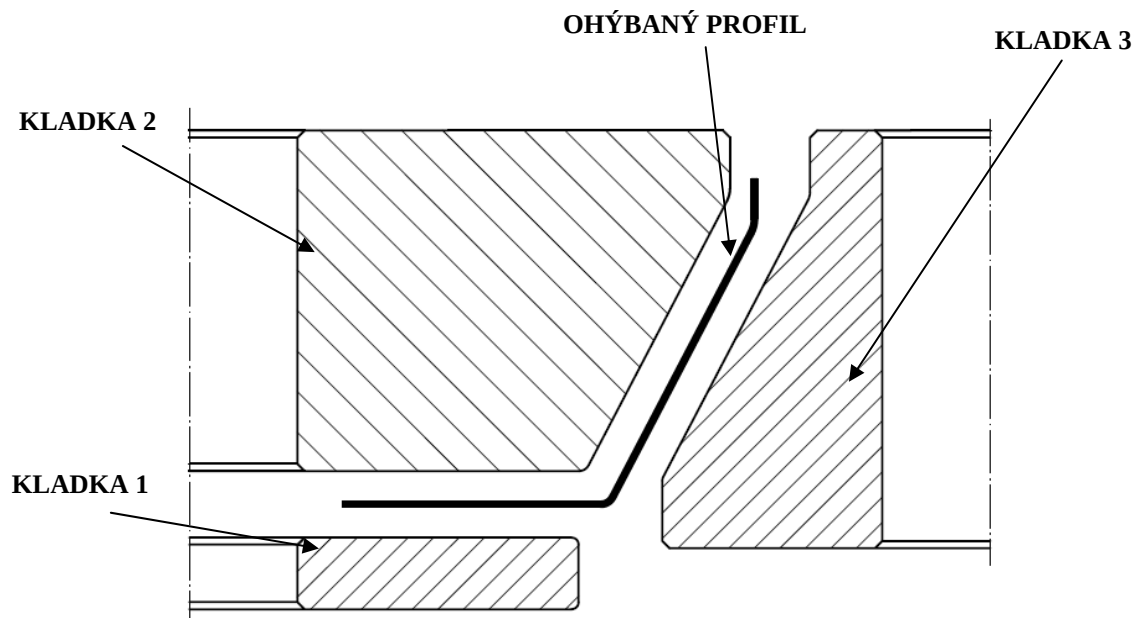
Vedení horní části a spodní části nástroje je provedeno pomocí kluzného vedení. Kluzné vedení se skládá ze čtyř vodících sloupků, které jsou zalisovány do přírub vedení, jenž jsou přišroubovány, k základové desce. V horní části vedení jsou připevněna kluzná pouzdra, která vymezují polohu horní a spodní části nástroje. Aby nedocházelo k zvlnění, nebo jiným vadám výlisku je zkonstruován speciální přidržovač, který je umístěn ve spodní části nástroje. Pomocí talířových pružin, rozmístěných po celé délce přidržovače, je přidržovač přitlačován k ohýbanému profilu tak aby nedošlo ke zkroucení ohýbaného profilu. Pro zamezení odření profilu je v přidržovači pryžová vložka. Po provedení ohybu a následné kalibrace je hotový výlisek vyhozen pomocí vyhazovačů umístěných v ohybnici.

V průběhu ohybu jsou vyhazovače stlačovány a pružiny se deformují. Po ukončení tvářecí operace se mohou pružiny uvolnit a následně pomocí vyhazovačů vyhodit hotový ohnutý profil z ohybnice. Ocelové pružiny mohou být zaměněny za pryžové pružiny.

Aby byla možná jednoduchá manipulace s nástrojem, jsou jak v horní části tak ve spodní části nástroje přišroubovány úchytky pro jeřáb. Dle možnosti manipulační jednotky je možné využít čtveřici podélných či příčných úchytů.

9.1.2. Návrh zakružovacích kladek

Konstrukce tvarových kladek je velice jednoduchá. Jedná se o válce z nástrojové oceli, jejichž tvar je zhotoven pro daný zadaný profil. Výhodou této zvolené konstrukce je možnost ohybu větších tloušťek při zachování vnitřních rozměrů profilu. Tedy je možné ohýbat profily s tloušťkou steny $t = (1,5 - 7)\text{mm}$, které mají stejné vnitřní rozměry. Jako spodní kladky zakružovačky slouží Kladka 1 a Kladka 2. Mezi tyto kladky je zasunut rovný profil. Následně horní kladka - Kladka 3 se posouvá směrem k spodním kladkám a ohýbá profil do požadovaného tvaru.



Obr. 9.1.2. Schéma uspořádání nástrojů pro zakružování

9.2. Návrh tvářecího stroje [28] [29]

9.2.1. Návrh tvářecího stroje pro ohýbání na lisovacím nástroji

Pro variantu ohýbání profilu na lisovacím nástroji volím hydraulický lis **CYS 320** firmy **ŠMERAL BRNO a.s.** Tento hydraulický lis volím dle maximální ohybové síly pro návrh stroje $F_{\max} = 42379,4\text{N}$. Jak je zřejmé, tento stroj je velice předimenzován, jelikož jeho jmenovitá tvářecí síla je mnohonásobně větší. Tento fakt je způsoben velikostí nástroje. Jelikož rozměry nástroje jsou značné díky velikosti ohýbaného profilu, musí být hydraulický lis volen taktéž dle maximálních rozměrů stolu. Toto kritérium se stalo řídicí ve volbě hydraulického lisu **CYS 320**. Bližší informace o tomto stroji jsou v příloze 2.

9.2.2. Návrh tvářecího stroje pro ohýbání zakružováním

Pro variantu ohýbání profilu technologií zakružování volím stroj **HPK 60** firmy **FERMAT CZ s.r.o.** Tato zakružovačka profilů je volena dle vhodnosti použití pro různé profily, které jsou rozměrově podobné zadanému profilu. Bližší informace o tomto stroji jsou v příloze 3.

10. Technicko – ekonomické zhodnocení

10.1. Technické zhodnocení

Celý proces výroby ohýbání profilu je velice komplikovaný. Počínaje výrobou profilu přes samotný ohyb profilu. Nesymetričnost a komplikovaný tvar průřezu ohnutého profilu vnáší do výroby mnoho problémů, které je zapotřebí řešit.

Vhodné technologie pro výrobu takto ohnutého profilu jsou ohýbání a zakružování. Posouzení jednotlivých technologických postupů pro obě varianty je již provedeno v bodě 7.2.

Výroba ohnutého profilu bude prováděna dle rozměrů výkresu součásti. Díky jednoduchosti tvaru ohybu a nízkým požadavkům na přesnost není potřeba malých tolerancí a je tedy vyrobitelná bez omezení.

Po provedení ohybu (u zakružování po provedení odstřižení přídatku na délku) není potřeba provádět další operace. Tedy ohnutý profil se již dále nezpracovává, ani není nijak povrchově upravován.

10.2. Ekonomické zhodnocení

10.2.1. Varianta 1 - ohýbání na lisovacím nástroji

10.2.1.1. Nezávislé náklady

Cena nástroje

Cenu lisovacího nástroje jsem vyhodnotil dle konzultací odborníku z firmy Fritzmeier. Dle jejich zkušeností se zadáváním zakázek firmám, které vyrábí nástroje se cena lisovacího nástroje, pro zadaný ohyb profilu, vyrobeného v tuzemsku (ne v Praze), bude pohybovat kolem 600 000 Kč

Tedy $C_{n1} = 600000 \text{ Kč}$

10.2.1.2. Závislé náklady

Mezi závislé náklady je zahrnuta mzda pracovníka, spotřeba energie a cena za materiál. Je potřeba také zjistit čas výroby jednoho kusu na lisovacím nástroji.

Časy výroby

Po absolvování exkurze jsem byl seznámen s potřebnými časy na výrobu podobných dílů. Tedy výrobní čas na obdobné dílce 0,4-0,5min.

Volím čas $t_1 = 30\text{s}$

Přípravný čas činí zhruba 30 minut. Po vyrobení cca 1000 kusů by měl následovat interval pro kontroly, respektive opravy, pokud jsou nutné.

Po cca 10 000 vyrobených kusech by měla následovat střední oprava.

Cena materiálu polotovaru (rovného profilu) [30]

U volby ceny rovného profilu je volen následující postup. Jelikož je nebylo možné najít zadaný profil z materiálu X5CrNi18-9 muselo být provedeno zhodnocení ceny materiálu profilu od úplného začátku výroby.

Tedy je vycházeno z tabule plechu, která se nastříhá na pásy potřebné délky a šířky. Tyto pásy jsou dále zpracovány na ohraňovacím lisu do tvaru zadaného profilu.

Cena tabule plechu

Volím tabuli plechu materiálu X5CrNi18-10 o rozměrech 1,5x1250x2500

Materiál tabule plechu je téměř totožný s ocelí X5CrNi18-9 proto je provedena tato volba.

Tedy $C_{T1} = 4837,50 \text{ Kč}$

Cena pásu plechu

Je potřeba zjistit maximální počet potřebných pásů plechu, které je možné vyrobít z této tabule. Délka rozvinutého profilu je 172,6 mm.

S připočtením přídavek na stříhání, volím šířku pásu plechu 178 mm.

Počet pásů plechu vyrobených z jedné tabule:

$$N_{p1} = 2500 / 178 = 14,04 \text{ ks} \doteq 14 \text{ ks}$$

Cena materiálu jednoho pásu plechu:

$$C_{p1} = C_{T1} / N_{p1} = 4837,50 / 14 = 345,54 \text{ Kč}$$

Cena rovného profilu

Jelikož je komplikované zjistit cenu výroby jednoho profilu na ohraňovacím lisu je zvolen výpočet ceny rovného profilu následujícím způsobem.

1) Je zjištěna cena za kilogram tabule plechu a rozměrově podobného profilu podobného materiálu.

Cena pásu plechu 1000x2000x4 oceli 11 320.11: $C_{p1}^* = 29,33 \text{ Kč / Kg}$

Cena profilu L o rozměrech 70x70x4 oceli 11 375: $C_{pr1}^* = 36,16 \text{ Kč / Kg}$

2) Je vyhodnocen rozdíl v ceně za kilogram u profilu a tabule plechu

$$R_{cP-PR} = \frac{100}{C_{p1}^*} \cdot C_{pr1}^* - 100 = \frac{100}{29,33} \cdot 36,16 - 100 = 23,28\% \doteq 25\%$$

Tedy usuzuji, že cena ohybu na ohraňovacím lisu je 25% ceny materiálu proto musí být cena pásu plechu navýšena o 25%, aby se cena rovného profilu přiblížila reálnému stavu.

Cena jednoho rovného profilu:

$$C_{pr1} = C_{p1} + 0,25 \cdot C_{p1} = 345,54 + 0,25 \cdot 345,54 = 431,93 \text{ Kč} \doteq 435 \text{ Kč}$$

Náklady na energii stroje***Náklady na energii lisovacího stroje v Kč/s***

$$E_1 = \frac{P_{c1} \cdot C_{kWh} \cdot kv}{3600} = \frac{24 \cdot 5 \cdot 1,0}{3600} = 0,0333 \text{ Kč} / s$$

Náklady na energii lisovacího stroje v Kč/ks

$$E_1^* = \frac{P_{c1} \cdot C_{kWh} \cdot kv}{3600} \cdot t_1 = \frac{24 \cdot 5 \cdot 1,0}{3600} \cdot 30 = 1 \text{ Kč} / ks$$

Náklady na mzdy dělníka lisovacího stroje

Pro práci na lisovacím stroji není potřeba vysoce kvalifikovaného pracovníka, proto mzda tohoto dělníka bude nižší než u zakružovacího stroje. Pro ekonomické zhodnocení je tento výpočet proveden podle jednoduchého vzorce, kdy je vypočítána výše nákladů na mzdy za jednu sekundu.

Náklady na mzdy dělníka pro obsluhu lisovacího stroje v Kč/s

$$D_1 = \frac{HM}{3600} = \frac{80}{3600} = 0,0222 \text{ Kč} / s$$

Náklady na mzdy dělníka pro obsluhu lisovacího stroje v Kč/ks

$$D_1^* = \frac{HM}{3600} \cdot t_1 = \frac{80}{3600} \cdot 30 = 0,67 \text{ Kč} / ks$$

Výpočet celkových závislých nákladů

$$NZ_1 = C_{pr1} + E_1^* + D_1^* = 435 + 1 + 0,67 = 436,67 \text{ Kč} / ks$$

10.2.2. Varianta 2 - ohýbání na zakružovacím nástroji**10.2.1.1. Nezávislé náklady****Cena nástroje**

Cenu lisovacího nástroje jsem vyhodnotil dle pokynů odborníku z firmy Fritzmeier. Dle jejich zkušeností se zadáváním zakázek firmám, které vyrábí nástroje, se cena lisovacího nástroje, pro zadaný ohyb profilu, vyrobeného v tuzemsku (ne v Praze) bude pohybovat kolem 38 000 Kč

$$\text{Tedy } C_{n2} = 38000 \text{ Kč}$$

10.2.1.2. Závislé náklady

Mezi závislé náklady je zahrnuta mzda pracovníka, spotřeba energie a cena za materiál. Je potřeba také zjistit čas výroby jednoho kusu na lisovacím nástroji.

Časy výroby

Po absolvování exkurze jsem byl seznámen s potřebnými časy na výrobu podobných dílů. Tedy výrobní čas na obdobné dílce 1,5-2,0min. Tento čas je počítán s 4 průjezdy mezi zakružovacími válci.

Volím čas $t_2 = 120s$

Přípravný čas činí zhruba 30 minut. Po vyrobení cca 1000 kusů by měl následovat interval pro kontroly, respektive opravy, pokud jsou nutné.

Pokud by nedošlo ke kolizi, bylo by opotřebení minimální.

Cena materiálu polotovaru (rovného profilu) [30]

U volby ceny rovného profilu je volen následující postup. Jelikož je nebylo možné najít zadaný profil z materiálu X5CrNi18-9 muselo být provedeno zhodnocení ceny materiálu profilu od úplného začátku výroby.

Tedy je vycházeno z tabule plechu, která se nastříhá na pásy potřebné délky a šířky. Tyto pásy jsou dále zpracovány na ohraňovacím lisu do tvaru zadaného profilu. Protože u zakružování je potřeba přídavek 280mm na délku kvůli špatně ohnutým koncům, které se musí odstříhnout je potřeba zvolit tabuli plechu s jinými rozměry.

Cena tabule plechu

Volím Tabuli plechu materiálu X5CrNi18-10 o rozměrech 1,5x1500x3000

Materiál tabule plechu je téměř totožný s ocelí X5CrNi18-9 proto je provedena tato volba.

Tedy $C_{T2} = 6\,966,00\text{ Kč}$

Cena pásu plechu

Je potřeba zjistit maximální počet potřebných pásů plechu, které je možné vyrobit z této tabule. Délka rozvinutého profilu je 172,6 mm.

S připočtením přídavek na stříhání, volím šířku pásu plechu 178 mm.

Počet pásů plechu vyrobených z jedné tabule:

$$N_{p2} = 3000/178 = 16,85ks \approx 16ks$$

Cena materiálu jednoho pásu plechu:

$$C_{p2} = C_{T2} / N_{p2} = 6966/16 = 435,38Kč$$

Cena rovného profilu

Jelikož není známa a nemá být ani předmětem řešení diplomové práce cena výroby jednoho profilu na ohraňovacím lisu je zvolen výpočet ceny rovného profilu následujícím způsobem.

1) Je zjištěna cena za kilogram tabule plechu a rozměrově podobného profilu podobného materiálu.

Cena pásu plechu 1000x2000x4 oceli 11 320.11: $C_{p1}^* = 29,33 \text{ Kč} / \text{Kg}$

Cena profilu L o rozměrech 70x70x4 oceli 11 375: $C_{pr1}^* = 36,16 \text{ Kč} / \text{Kg}$

2) Je vyhodnocen rozdíl v ceně za kilogram u profilu a tabule plechu

$$R_{cP-PR} = \frac{100}{C_{p1}^*} \cdot C_{pr1}^* - 100 = \frac{100}{29,33} \cdot 36,16 - 100 = 23,28\% \doteq 25\%$$

Tedy usuzuji, že cena ohybu na ohraňovacím lisu je 25% ceny materiálu proto musí být cena pásu plechu navýšena o 25%, aby se cena rovného profilu přiblížila reálnému stavu.

Cena jednoho rovného profilu:

$$C_{pr2} = C_{p2} + 0,25 \cdot C_{p2} = 435,38 + 0,25 \cdot 435,38 = 544,23 \text{ Kč} \doteq 550 \text{ Kč}$$

Náklady na energii stroje pro zakružování

Náklady na energii stroje v Kč/s

$$E_2 = \frac{P_{c2} \cdot C_{kWh} \cdot kv}{3600} = \frac{1,5 \cdot 5 \cdot 1,0}{3600} = 0,0021 \text{ Kč} / \text{s}$$

Náklady na energii stroje v Kč/ks

$$E_2^* = \frac{P_{c2} \cdot C_{kWh} \cdot kv}{3600} \cdot t_2 = \frac{1,5 \cdot 5 \cdot 1,0}{3600} \cdot 120 = 0,25 \text{ Kč} / \text{ks}$$

Náklady na mzdy dělníka pro zakružování

Pro práci na zakružovačce je potřeba vysoce kvalifikovaného pracovníka, proto mzda tohoto dělníka bude vyšší než u dělníka pracujícího na lisovacím zařízení. Pro ekonomické zhodnocení je tento výpočet proveden podle jednoduchého vzorce, kdy je vypočítána výše nákladů na mzdy za jednu sekundu.

Náklady na mzdy dělníka pro obsluhu zakružovačky v Kč/s

$$D_2 = \frac{HM}{3600} = \frac{120}{3600} = 0,0333 \text{ Kč} / \text{s}$$

Náklady na mzdy dělníka pro obsluhu zakružovačky v Kč/ks

$$D_2^* = \frac{HM}{3600} \cdot t_2 = \frac{120}{3600} \cdot 120 = 4 \text{ Kč} / \text{ks}$$

Výpočet celkových závislých nákladů

$$NZ_2 = C_{pr2} + E_2^* + D_2^* = 550 + 0,25 + 4 = 554,25 \text{ Kč} / \text{ks}$$

10.2.3. Výpočet počtu kusů se stejnými náklady pro obě varianty výroby

Celý výpočet vychází z myšlenky rovnosti součtů nákladů závislých a nezávislých pro obě technologie výroby. Tedy základní rovnice:

$$C_{n1} + NZ_1 \cdot n_m = C_{n2} + NZ_2 \cdot n_m$$

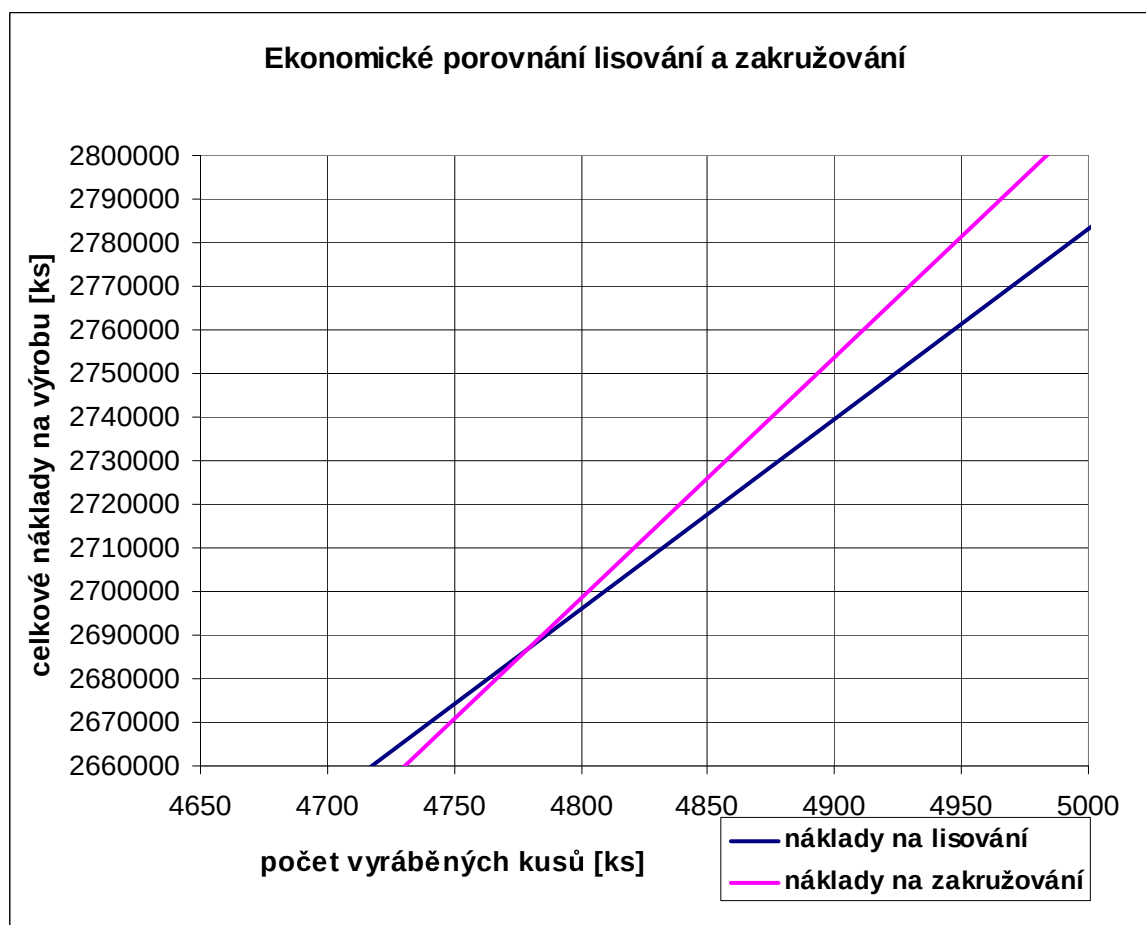
Odvození vzorce pro mezní počet vyrobených kusů:

$$C_{n1} + NZ_1 \cdot n_m = C_{n2} + NZ_2 \cdot n_m$$

$$C_{n1} - C_{n2} = (NZ_2 - NZ_1) \cdot n_m$$

$$n_m = \frac{C_{n1} - C_{n2}}{(NZ_2 - NZ_1)}$$

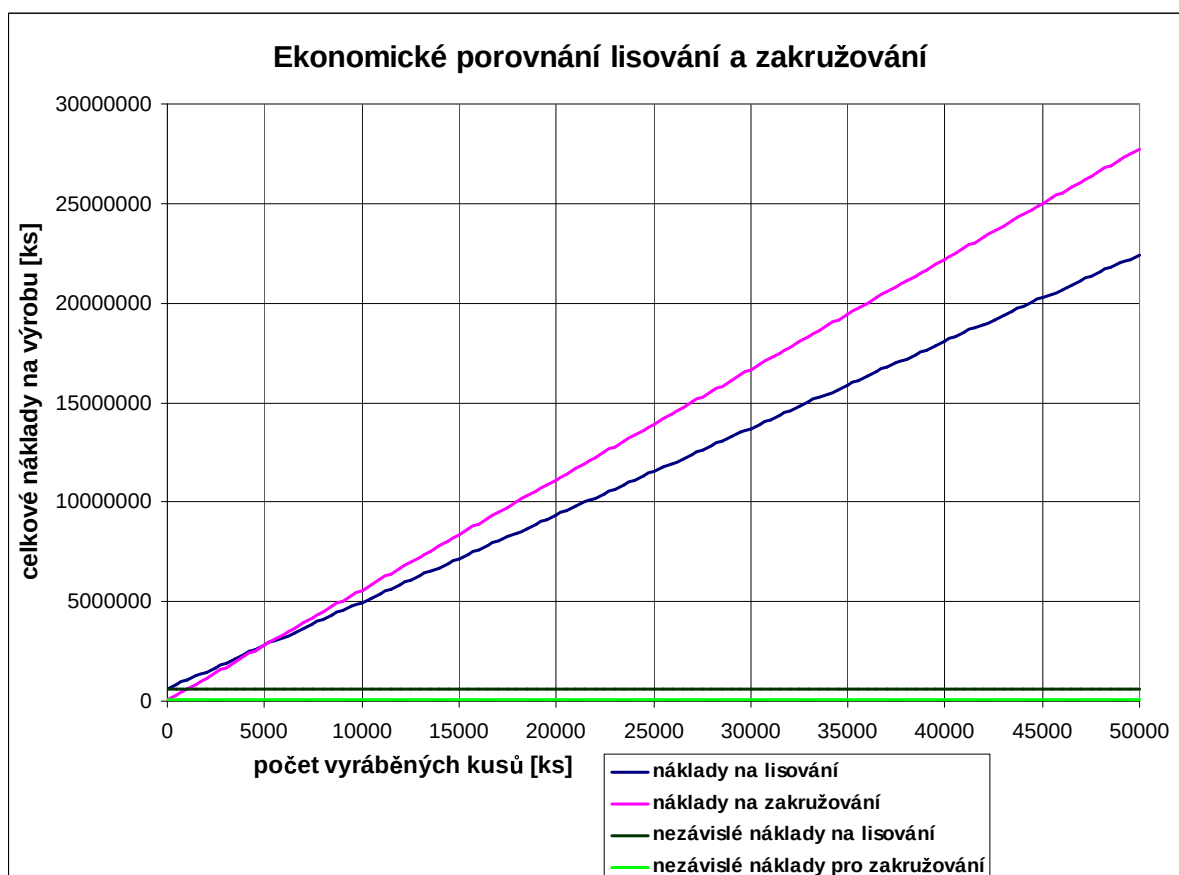
$$n_m = \frac{C_{n1} - C_{n2}}{(NZ_2 - NZ_1)} = \frac{600000 - 38000}{(554,25 - 436,67)} \doteq 4780 \text{ ks}$$



Obr. 10.2.3.1. Ekonomické porovnání lisování a zakružování v intervalu 4650-5000 vyrobených kusů

Hodnota mezního počtu kusu znamená, že pokud je výrobní dávka menší než 4780 ks je výhodnější použít pro ohyb profilu technologii zakružování.

Pokud výrobní dávka je větší než 4780 ks je již ekonomicky výhodnější zvolit technologii ohýbání v lisovacím nástroji. Tento poznatek se může jevit jako zavádějící jelikož cena nástroje na kladky je cca 6% ceny nástroje na lisování, proto by se mohlo zdát, že výrobní dávka musí být mnohem větší. Ale přídavek na délku, který musí být u zakružování, velice zvýší cenu materiálu, což taktéž sníží velikost výhodné dávky pro technologii zakružování. Dalším faktorem, který ovlivňuje ekonomiku, je čas výroby. Jelikož pro zakružování je potřeba čtyřnásobek času z důvodu opakovaných průjezdů mezi kladkami, je výrazně ovlivněna spotřeba energie a taktéž náklady na mzdy dělníka, který musí obsluhovat zakružovačku a musí mít mnohem větší zručnost než dělník na lisovacím stroji. Do ekonomického zhodnocení, již není započítáno následné odštíření přídavku na délku. Ani přípravné práce. Obr. 10.2.3.1. zobrazuje grafické zhodnocení nákladů na výrobu a taktéž průsečík přímek kde nastává mezní počet kusů n_m



Obr. 10.2.3.2. Ekonomické porovnání lisování a zakružování

Na obr. 10.2.3.2. je zobrazen tentýž graf pouze s větším počtem kusů kde jsou zobrazeny ještě nezávislé náklad pro jednotlivé operace.

11. Závěr

Tato diplomová práce má pro mě velký význam z mnoha důvodů. Jelikož jsem se za své studium setkal s technologiemi ohýbání profilu jen okrajově, znamenalo vypracování této diplomové práce pro mě seznámit se s něčím úplně novým, pro mne neznámým. Při shromažďování informací jsem byl poněkud znepokojen, jak málo literatury je této technologii věnováno. Tato skutečnost mně v mnohém vedla vymýšlet nové postupy při řešení jednotlivých úkolů a komplexně používat poznatky, které jsem mohl za své studium

získat. Po mnohých konzultacích a exkurzích vidím, že technologie ohýbání profilů je dlouhodobý proces, který potřebuje mnohé zkušenosti, dlouholetou praxi a nespočet pokusů. Jsem si vědom, že nejsem schopen dokonale pojmut proces ohýbání profilů, ale chtěl bych zhodnotit výsledky, kterých jsem dosáhl v této práci. V práci, která mně naučila, že na první pohled neřešitelné věci je možné vyřešit, že člověk se nesmí spokojit s omezenými informacemi, ale musí hledat a přemýšlet jak tyto informace rozšířit, spojit a vhodně použít pro řešení zadaného úkolu.

V první fázi jsem popsal základní potřebné informace z různých literárních pramenů pro řešení zadaného problému. Informace o technologiích ohýbání, respektive zakružování o ohýbání profilů. Tato literární studie se taktéž zabývá odpužením kovových materiálů a řeší jeho eliminaci. Taktéž je uvedena zmínka o deformaci kovů či aproximačních diagramech skutečného napětí.

V dalších bodech jsem popsal konkrétní řešení technologií ohybu profilu. Celou tuto část bych rozdělil na část výpočetní a technologickou. Ve výpočetní části jsem byl nucen v mnohém používat vlastních postupů pro výpočty jednotlivých parametrů. Hlavní část výpočtů je věnována výpočtům ohybové síly. Byl jsem nucen použít poznatku pružnosti pevnosti a teorie tváření. Ale ani ty nepostačily k tomu, abych zjistil celkovou ohybovou sílu pro daný profil. Nicméně pro vyřešení této situace jsem vymodeloval ohnutý profil v 3d programu SolidWorks zjistil přetvoření jednotlivých vláken, z nichž jsem vypočítal deformace. S pomocí maximální deformace a aproximačních diagramů jsem byl schopen určit skutečné napětí a následně ohybovou sílu. Podobně bylo zjišťováno odpužení, tedy pomocí průhybu nosníku dle pružnosti pevnosti a pomocí klasického výpočtu úhlu odpužení dle teorie tváření.

V části technologické jsem úzce spolupracoval s odporníky firmy Fritzmeier. Díky těmto konzultacím jsem mohl vyhodnotit technologické postupy pro obě technologie, z nichž vyplývá jedna zásadní věc. Technologie zakružování profilů není vhodná pro velkosériovou výrobu naopak technologie ohýbání v lisovacím nástroji bude mít mnohem více nákladné strojní zařízení, ale výhodou bude jednoduchost a mnohem větší rychlost výroby. Pro variantu technologie ohýbání v lisovacím nástroji volím stroj **CYS 320**. Pro variantu technologie zakružování volím stroj **HPK 60**. Taktéž z tohoto hlediska je zřejmé, že pro velkosériovou výrobu bude vhodná varianta technologie ohýbání v lisovacím nástroji.

Téměř vše v této společnosti řídí peníze, proto i v této práci jsem se snažil přibližně zhodnotit vliv financí na tyto dvě varianty výroby. Po mnohých konzultacích jsem provedl kalkulace cen nástrojů, aby se tyto čísla, blížily čím jak nejvíce realitě. Následně jsem vyhodnotil cenu materiálu, energie a mzdu dělníka. Tyto informace jsem komplexně zhodnotil a vypočítal mezní počet kusů součástí, jenž činí 4780 ks. Pokud je výrobní série menší než tento počet kusů je vhodné zvolit technologii zakružování, pokud je výrobní série větší je výhodnější zvolit variantu ohýbání v lisovacím nástroji.

Součástí této diplomové práce je výkresová dokumentace.

Pokud by bylo možné zabývat se ještě nadále tímto zadaným problémem a měl bych čas pro jeho řešení obsahovala by tato práce další možné varianty vytvoření ohybu na zadaném profilu. Například použitím technologie vypínání profilů, nabalováním profilů či použitím pryžových pouzder, kterými by byl obalen profil a následně by se zakružoval na univerzálních kladkách. Následně by bylo potřeba vytvořit mnoho pokusů, jimiž by se ověřily výhody a nevýhody jednotlivých technologií či variant technologických postupů.

Seznam použitých symbolů a zkratek

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
a	mm	minimální délka ramene při ohybu
b	mm	šířka pásu
b_1	mm	šířka pásu plechu po ohybu
b_z	mm	délka ohybu při zakružování
c	mm	posun neutrální osy
C	-	koeficient pro výpočet minimálního poloměru ohybu
C_{n1}	Kč	cena nástroje pro lisování
C_{n2}	Kč	cena nástroje pro zakružování
C_{T1}	Kč	cena tabule plechu pro variantu 1
C_{T2}	Kč	cena tabule plechu pro variantu 2
C_{p1}	Kč	cena materiálu jednoho pásu plechu pro variantu 1
C_{p2}	Kč	cena materiálu jednoho pásu plechu pro variantu 2
C_{p1}^*	Kč/Kg	cena pásu plechu 1000x2000x4 oceli 11 320.11
C_{pr1}^*	Kč/Kg	cena profilu L o rozměrech 70x70x4 oceli 11 375
C_{pr1}	Kč	cena jednoho rovného profilu pro variantu 1
C_{pr2}	Kč	cena jednoho rovného profilu pro variantu 2
D	MPa	modul zpevnění pro jednopřímkovou aproximaci
D'	MPa	modul zpevnění pro dvoupřímkovou aproximaci
D_k	mm	průměr zakružovacího válce
D_z	mm	vnitřní průměr zákružku
D_1	Kč/s	náklady na mzdy dělníka pro obsluhu lisovacího stroje
D_1^*	Kč/ks	náklady na mzdy dělníka pro obsluhu lisovacího stroje
D_2	Kč/s	náklady na mzdy dělníka pro obsluhu zakružovačky
D_2^*	Kč/ks	náklady na mzdy dělníka pro obsluhu zakružovačky
E	MPa	modul pružnosti v tahu
E_1	Kč/s	náklady na energii lisovacího stroje
E_1^*	Kč/ks	náklady na energii lisovacího stroje
E_2	Kč/s	náklady na energii zakružovačky
E_2^*	Kč/ks	náklady na energii zakružovačky
f	-	součinitel tření
F	N	univerzální ohybová síla, která je použita ve výpočtech pro výpočet jednotlivých ohybových sil
F_a	N	reakce v rotační vazbě nosníku
F_b	N	reakce v posuvné vazbě nosníku
F_o	N	ohybová síla
F_p	N	síla přidržovače
F_{zk}	N	přítlačná síla ohybového válce
F_{zkB}	N	přítlačná síla ohybového válce dle Boljanoviče
$F_{PR tlak}$	N	pružná ohybová síla v tlakové oblasti
$F_{PR tah}$	N	pružná ohybová síla v tahové oblasti
F_{PL}	N	plastická ohybová síla

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
F_{PR}	N	pružná ohybová síla
F_{oC}	N	celková ohybová síla
F_{opr-pp}	N	pružně plastická ohybová síla
F'_{PRtlak}	N	pružná ohybová síla tlaková vypočítaná dle teorie ohýbání úzkých tyči bez zpevnění
F'_{PRtah}	N	pružná ohybová síla tahová vypočítaná dle teorie ohýbání úzkých tyči bez zpevnění
F'_{PRred}	N	pružná ohybová síla redukováná vypočítaná dle teorie ohýbání úzkých tyči bez zpevnění
F_{PRred}	N	pružná ohybová síla redukováná
F_{PLred}	N	plastická ohybová síla redukováná dle Hollomonovy aproximace
F'_{PLred}	N	plastická ohybová síla redukováná dle jedno-přímkové aproximace
F''_{PLred}	N	plastická ohybová síla redukováná dle dvou-přímkové aproximace
F_{oCred}	N	celková ohybová síla redukováná dle Hollomonovy aproximace a pružnosti pevnosti
F^*_{oCred}	N	celková ohybová síla redukováná dle Hollomonovy aproximace a teorie ohýbání úzkých tyči bez zpevnění
F'_{oCred}	N	celková ohybová síla redukováná dle jedno-přímkové aproximace a pružnosti pevnosti
$F^{*'}_{oCred}$	N	celková ohybová síla redukováná dle jedno-přímkové aproximace a teorie ohýbání úzkých tyči bez zpevnění
F''_{oCred}	N	celková ohybová síla redukováná dle dvou-přímkové aproximace a pružnosti pevnosti
$F^{*''}_{oCred}$	N	celková ohybová síla redukováná dle dvou-přímkové aproximace a teorie ohýbání úzkých tyči bez zpevnění
F_k	N	kalibrační síla
F_{max}	N	maximální síla pro volbu stroje
h	mm	hloubka ohybnice
$J_{xT(P1)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P1 v těžišti T v ose x
$J_{xT(P2)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P2 v těžišti T v ose x
$J_{xT(P3)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P3 v těžišti T v ose x
$J_{xT(P4)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P4 v těžišti T v ose x
$J_{xT(P5)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P5 v těžišti T v ose x
$J_{xT(P6)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P6 v těžišti T v ose x
J_{xT}	mm ⁴	kvadratický moment průřezu prof. v těžišti T v ose x
$J_{yT(P1)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P1 v těžišti T v ose y
$J_{yT(P2)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P2 v těžišti T v ose y
$J_{yT(P3)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P3 v těžišti T v ose y
$J_{yT(P4)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P4 v těžišti T v ose y
$J_{yT(P5)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P5 v těžišti T v ose y
$J_{yT(P6)}$	mm ⁴	kvadratický moment plochy P6 v těžišti T v ose y

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
J_{yT}	mm^4	kvadratický moment průřezu prof. v těžišti T v ose y
$J_{xyT(P1)}$	mm^4	kvadratický deviační moment plochy P1 v těžišti T
$J_{xyT(P2)}$	mm^4	kvadratický deviační moment plochy P2 v těžišti T
$J_{xyT(P3)}$	mm^4	kvadratický deviační moment plochy P3 v těžišti T
$J_{xyT(P4)}$	mm^4	kvadratický deviační moment plochy P4 v těžišti T
$J_{xyT(P5)}$	mm^4	kvadratický deviační moment plochy P5 v těžišti T
$J_{xyT(P6)}$	mm^4	kvadratický deviační moment plochy P6 v těžišti T
J_{xyT}	mm^4	kvadratický deviační moment průřezu v těžišti T
J_{pT}	mm^4	kvadratický polární moment průřezu prof. v těžišti T
k	-	součinitel určující polhu neutrálního vlákna
K	MPa	materiálová konstanta
K'	-	koeficient pro zjištění odpružení
l_1	mm	délka plochy S_1
l_2	mm	délka plochy S_2
l_3	mm	délka plochy S_3
l_v	mm	vzdálenost středů poloměrů ohybnice u V ohybu
l_u	mm	vzdálenost středů poloměrů u U ohybu
L_{k1}	mm	vzdálenost budu dotyku válce a plechu od osy
L_{k2}	mm	vzdálenost os spodního a horního válce
L_0	mm	délka polotovaru
$L_{n.v.}$	mm	délka neutrálního vlákna
M_o	mm	ohybový moment
M_y	mm	ohybový moment v ose y
M_x	mm	ohybový moment v ose x
M_{oo}	Nmm	ohybový moment vnitřních sil při ostrém ohybu
M_{ov}	Nmm	ohybový moment vnitřních sil při volném ohybu
$M_{oo/ov}$	Nmm	ohybový moment vnitřních sil v oblasti $\frac{R_2}{t} = (6-12)$
M_{opr}	Nmm	ohybový moment pružný
M_{opl}	Nmm	ohybový moment plastický
M_{opp}	Nmm	ohybový moment pružně plastický
M_{ozk}	Nmm	ohybový moment při zakružování
M_{0tlak}	Nmm	pružný ohybový moment v tlakové oblasti
M_{0tah}	Nmm	pružný ohybový moment v tahové oblasti
n	-	exponent zpevnění
N	mm	přídavná tahová síla
N_{p1}	ks	počet pásů plechů z jedné tabule pro variantu 1
N_{p2}	ks	počet pásů plechů z jedné tabule pro variantu 2
NZ_1	Kč/ks	celkové závislé náklady pro variantu 1
NZ_2	Kč/ks	celkové závislé náklady pro variantu 2
n_m	ks	mezní počet kusů
P_1	-	označení plochy pro výpočet kvadrat. momentů
P_2	-	označení plochy pro výpočet kvadrat. momentů
P_3	-	označení plochy pro výpočet kvadrat. momentů
P_4	-	označení plochy pro výpočet kvadrat. momentů
P_5	-	označení plochy pro výpočet kvadrat. momentů

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
P_6	-	označení plochy pro výpočet kvadrat. momentů
r_p	mm	poloměr pohyblivé čelisti s ohledem na pružení
R_1	mm	vnější poloměr ohybu
R_2	mm	nitřní poloměr ohybu
R_0	mm	poloměr ohybu neutrálního vlákna
R_{min}	mm	minimální poloměr ohybu
R_{max}	mm	maximální poloměr ohybu
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
R_k	mm	poloměr ohybnice
R'_k	mm	poloměr zakružovací kladky
R_{cP_PR}	%	rozdíl v ceně za kilogram u profilu a tabule plechu
S_1	mm ²	plocha části profilu označené jako S_1
S_2	mm ²	plocha části profilu označené jako S_2
S_3	mm ²	plocha části profilu označené jako S_3
T	-	označení těžiště
t	mm	tloušťka plechu
t_1	mm	tloušťka pásu plechu po ohybu
t_1	s	čas tvářecí operace jednoho kusu na lisovacím nástroji
t_2	s	čas tvářecí operace jednoho kusu na lisovacím nástroji
U_x	mm ³	statický moment v ose x
U_y	mm ³	statický moment v ose y
W_0	mm ³	průřezový modul v ohybu
w	mm	průhyb nosníku na mezi pružnosti
W	J	energie napjatosti
w'	mm	pružný průhyb nosníku dle lit.[26]
w''	mm	Průhyb dle lit. [26] při záměně J_y na J_x
x	-	součinitel posunutí neutrálního vlákna
x_{max}	mm	vzdálenost neutrálního vlákna od povrchu v ose x
x_t	mm	souřadnice těžiště v ose x
x_1	mm	poloha těžiště plochy S_1 v ose x
x_2	mm	poloha těžiště plochy S_2 v ose x
x_3	mm	poloha těžiště plochy S_3 v ose x
x_{p1}	mm	šířka plochy P_1
x_{p2}	mm	šířka plochy P_2
x_{p3}	mm	šířka plochy P_3
x_{p4}	mm	šířka plochy P_4
x_{p5}	mm	šířka plochy P_5
x_{p6}	mm	šířka plochy P_6
x_{tp1}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_1 k těžišti T v ose x
x_{tp2}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_2 k těžišti T v ose x
x_{tp3}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_3 k těžišti T v ose x
x_{tp4}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_4 k těžišti T v ose x
x_{tp5}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_5 k těžišti T v ose x
x_{tp6}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_6 k těžišti T v ose x
y	mm	ponoření horního válce mezi válce podpěrné
y_{max}	mm	vzdálenost neutrálního vlákna od povrchu v ose y
y_t	mm	souřadnice těžiště v ose y

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
y_1	mm	poloha těžiště plochy S_1 v ose y
y_2	mm	poloha těžiště plochy S_2 v ose y
y_3	mm	poloha těžiště plochy S_3 v ose y
y_{p1}	mm	délka plochy P_1
y_{p2}	mm	délka plochy P_2
y_{p3}	mm	délka plochy P_3
y_{p4}	mm	délka plochy P_4
y_{p5}	mm	délka plochy P_5
y_{p6}	mm	délka plochy P_6
y_{tp1}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_1 k těžišti T v ose y
y_{tp2}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_2 k těžišti T v ose y
y_{tp3}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_3 k těžišti T v ose y
y_{tp4}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_4 k těžišti T v ose y
y_{tp5}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_5 k těžišti T v ose y
y_{tp6}	mm	vzdálenost těžiště plochy P_6 k těžišti T v ose y
z_z	-	součinitel ztenčení
z_r	-	součinitel rozšíření původního průřezu
α	°	úhel ohybu
α_1	°	úhel ohybu před odpružením
α_2	°	úhel ohybu po odpružení
β	°	úhel odpružení
$\hat{\beta}$	rad	úhel odpružení
ε_m	-	poměrná deformace při σ_m
$\varepsilon_{o\max}$	-	maximální poměrná ohybová deformace
$\varepsilon_{t\max}$	-	maximální poměrná tahová deformace
ε_{celk}	-	celková poměrná deformace
ε_{tdod}	-	dodatková poměrná tahová deformace
$\varepsilon_{celk}^{'}$	-	celková poměrná deformace po přidání ε_{tdod}
ε_c	-	součet pružné a plastické poměrné deformace
ε_{pr}	-	pružná poměrná deformace
ε_{pl}	-	plastická poměrná deformace
ε_{max}	-	mezní poměrná deformace
ε_{min}	-	minimální poměrná deformace
ε_{1stlak}	-	deformace v krajních vláknech tlakových
ε_{1stah}	-	deformace v krajních vláknech tahových
ε_{1a}	-	deformace vypočítána z prodloužení oblouku 1a
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	-	hlavní poměrné deformace
φ	-	logaritmické přetvoření
μ	-	Poissonova konstanta
ρ_k	mm	poloměr zakřivení
ρ_e	mm	poloměr elastického zakřivení při zakružování

SYMBOL	JEDNOTKA	POPIS
ρ_p	mm	konečný poloměr zakřivení při zakružování
ρ_1	mm	zakřivení před odpružením
ρ_2	mm	zakřivení po odpružení
σ_{ke}	MPa	extrapolovaná mez kluzu
σ_o	MPa	ohybové napětí
σ_m	MPa	skutečná mez pevnosti
σ_{ke}	MPa	mez kluzu u skutečného tahového diagramu
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	hlavní napětí
$\sigma_{1s\ tlak}$	MPa	napětí v krajních vláknech tlakových
$\sigma_{1s\ tah}$	MPa	napětí v krajních vláknech tahových
$\bar{\sigma}$	MPa	skutečné deformační napětí
$\bar{\sigma}_1$	MPa	skutečné ohybové napětí dle Hollomonovy aproximace
$\bar{\sigma}_2$	MPa	skutečné ohybové napětí dle jedno-přímkové aproximace
$\bar{\sigma}_3$	MPa	skutečné ohybové napětí dle dvou-přímkové aproximace

Literatura

- [1] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Brno: Akademické nakladatelství cerm,s.r.o., 2001. 238 s. ISBN 80-214-2032-4.
- [2] KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha : ČVUT Praha , 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
- [3] DVOŘÁK, Milan. *Technologie tváření, Plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství cerm,s.r.o., 2003.169 s. ISBN 80-214-2340-4
- [4] KRÍŽ, Rudolf . *Strojírenská příručka 8. svazek : V-Tváření, W- Výrobky se slinovaných prášků, X- Výrobky z plastů, Z- Svařování součástí, Z- Protikorozi ochrana materiálu*. Praha : Scientia, 1998. 255 s. ISBN 80-7183-054-2.
- [5] KOČMAN, Karel. *Aktuální příručka pro technický úsek : Svazek 8. Tváření*. Praha : Dashöfer , 2001. 300 s. ISBN 80-902247-2-5.
- [6] FREMUNT, Přemysl. *Konstrukční oceli*. Brno : CERM, 1996. 261 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [7] NOVOTNÝ, K.: *Tvářecí nástroje*. VUT Brno, 1992, skripta
- [8] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Brno : CERM, 2004. 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [9] STROŽEV, Michail Vasilievič. *Teória tvárnenia kovov*. Bratislava : Alfa, 1978. 486 s.
- [10] BOLJANOVIC, V. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. 1.st. ed. New York: Industrial Press. 2004. 219p. ISBN 0-8311-3182-9
- [11] ZAKIROV, Il'dus Muchametgalewich. *Rotary Shaping With The use of elastic medium*. Bratislava : STU Bratislava, 1997. 183 s. ISBN 80-227-0953-0.
- [12] [online] URL <<http://www.wila.nl>> [cit. 2008-1-20]
- [13] [online] URL <<http://www.isel.co.jp/english/ben/ben.htm>> [cit. 2008-1-22]
- [14][online]URL<http://www.kurimoto.co.jp/english/Products/pressmachine/bendrolling/BendingRoll_01.htm> [cit. 2008-2-16]
- [15] [online] URL <<http://www.bertschrolls.com/AngleRolls.html>> [cit. 2008-3-26]
- [16][online]URL<http://www.bystronic.com/cutting_and_bending/com/en/products/bending/index.php?navid=51&nl=2>[cit. 2008-2-5]
- [17] [online] URL <<http://www.cyrilbath.com/stretchforming.html>> [cit. 2008-4-7]
- [18] SAMEK, R. *FORM 95 : Vztahy mezi ohybovými momenty vnitřních sil a deformačním napětím*. In. FORM 1995. M.Forejt. 2th International Conference FORM. 1st ed. Brno, Brno University of Technology 1995, volume 1, p.7-12. ISBN 80-214-0664-X.

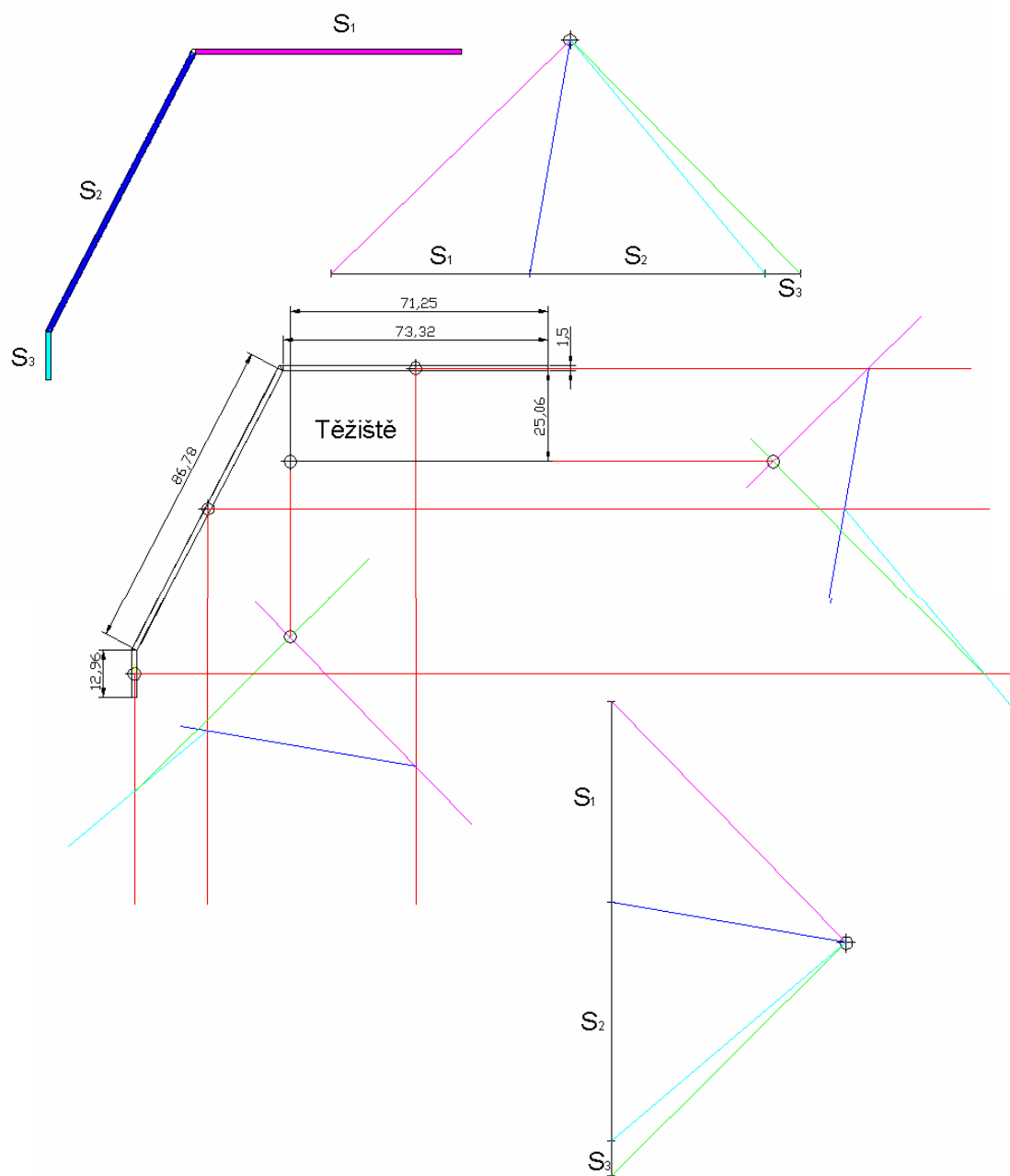
- [19] [online] URL <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/index.htm>> [cit. 2008-1-28]
- [20] [online] URL <www.flowtech.cz> [cit. 2008-1-10]
- [21] [online] URL <http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm> [cit. 2008-3-18]
- [22] E. M. A. R. C. S. P. A., Vinovo, IT;. Způsob a zařízení pro ohýbání profilovaného kovového prvku. Deviser: Passone, P. Int. B 21 D 7/03. *Patent Italy, 2001-2619, 2002-2-13.*
- [23] [online] URL< <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=12674> > [cit. 2008-3-18]
- [24] Ginzburg, Steel-rolling Technology: Theory and Practice, CRC Press, 1989. 745 s. ISBN 0824781244
- [25] Marciniak, Mechanics of Sheet Metal Forming, Butterworth-Heinemann, 2002. 211 ISBN 0750653000
- [26] Leinveber, Strojnické Tabulky, Albra, 908 s. ISBN 80-7361-011-6
- [27] [online] URL< <http://www.fritzmeier.cz/> > [cit. 2008-4-8]
- [28] [online] URL< http://www.smeral.cz/data.php?data=program1_6 > [cit. 2008-5-12]
- [29] [online] URL< <http://www.fermatmachinery.com/cs/16-zakruzovacky-profilu/75-hpk60.html> > [cit. 2008-5-12]
- [30] [online] URL< <http://62.168.62.45/cze/velkoobchod/sortiment.php> > [cit. 2008-5-1]

Seznam použitých příloh

- Příloha 1 - Grafické určení těžiště profilu
Příloha 2 - Technické parametry hydraulického lisu CYS 320
Příloha 3 - Technické parametry zakružovačky HPK 60
Sestava nástroje pro ohyb profilu - č.v. S0-50/51-20/01
Sestava nástroje pro ohyb profilu – č.v. S0-50/51-20/02
Výkres kladky 1 – č.v. V4-50/51-20/01
Výkres kladky 2 – č.v. V3-50/51-20/02
Výkres kladky 3 – č.v. V3-50/51-20/03
Výkres ohnutého profilu – č.v. V3-50/51-20/04

Příloha 1

Grafické určení těžiště profilu



Příloha 2 [28]**Technické parametry hydraulického lisu CYS 320**

Technické parametry / Typy – řada CYS a CYC		CYS 320
Jmenovitá tvářecí síla	kN	3200
Zdvih	mm	200
Sevření (minimální vzdálenost beranu a stolu)	mm	560
Zpětná síla	kN	960
Pracovní rychlost	mm/s	5
Přibližovací rychlost	mm/s	15
Zpětná rychlost	mm/s	24
Průchod (mezi sloupy)	mm	2130
Rozměr stolu	mm	2000x1010
Rozměr beranu	mm	2000x1000
Výška lisu	mm	4640
Výkon elektromotoru	kW	24
Systém řízení	SIEMENS - SIMATIC S 7	
Mazací systém	DELIMON	
Hydraulický systém	HYDROCOM - ULBRYCH	



Příloha 3 [29]**Technické parametry zakružovačky HPK 60****Standardní výbava**

- Tři poháněné zakružovací válce.
- Svařovaný rám stroje.
- Hydraulicky ovládaný zdvih horního válce.
- Hřídele jsou vyrobeny z materiálu vysoké pevnosti
- Standardní válce a vodící válec ze speciální oceli (viz Přehled sortimentu zakružovaček).
- Válce jsou vytvrzené a následně broušené.
- Brzdný motor.
- Horizontální nebo vertikální pracovní pozice.
- Přenosný ovládací panel.
- Ovládání nožními pedály.
- Návod k obsluze.

**Základní technické parametry HPK 60**

Průměr hřídelů [mm]	60
Průměr spodních válců [mm]	215
Průměr horního válce [mm]	215
Síla hydrauliky [t]	16
Pracovní rychlost [m/min]	4
Výkon motoru [kW]	1,5
Délka [mm]	830
Šířka [mm]	1140
Výška [mm]	1650
Hmotnost [kg]	860

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.