

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav strojírenské technologie

Optimalizace procesu ohýbání dutých profilů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Jan Malý
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Vedoucí práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.
Praha 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Jana MALÉHO

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Optimalizace procesu ohýbání dutých profilů

Název anglicky: Optimization of the process bending hollow profiles

Zásady pro vypracování:

1. Úvod, seznámení s problematikou.
2. Základní principy ohýbání se zaměřením na duté profily.
3. Popis strojního vybavení.
4. Analýza vybraného dílu.
5. Návrh optimalizace procesu.
6. Závěrečné zhodnocení.

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Konzultant:

Datum zadání diplomové práce: 30. 10. 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 18. 12. 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou nebo bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové nebo bakalářské práci.

Zadání diplomové práce převzal dne:

.....
Student



.....
Vedoucí ústavu





.....
Děkan

V Praze

dne 23. 10. 2015

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství
Téma diplomové práce: Optimalizace procesu ohýbání dutých profilů
Autor diplomové práce: Jan Malý
Vedoucí diplomové práce: Ing. František Tatiček, Ph.D.

Rozsah diplomové práce: Počet stran: 73
Počet obrázků: 53
Počet tabulek: 9

Anotace:

První část diplomové práce se zabývá základními principy ohýbání a definicí základních pojmů. Dále jsou zmíněny materiálové vlastnosti, které mají vliv na ohýbání dutých profilů (např. plastičnost a technologická tvařitelnost). Následuje popis nutně řešených aspektů u ohybu, jako jsou poloha neutrální vrstvy, minimální a maximální poloměr ohybu, určení délky polotovaru. Je popsána problematika odpružení materiálu při ohybu. Dále je vysvětlena obecná problematika ohybu trubek (např. deformace průřezu při ohybu). Také je uvedeno rozdělení způsobu ohýbání podle momentů a sil působících na trubku při ohybu. Podrobně je popsán proces ohýbání trubek navíjením. Další část se zabývá popisem řešeného dílu a popisem stroje na ohýbání trubek.

V praktické části se autor zabývá optimalizací procesu ohýbání. Je zde uveden popis přípravy nástroje a zhotovení prvních zkušebních vzorků. Následuje identifikace vad a jejich označení. Dále jsou uvedeny návrhy pro odstranění příčin vzniku vad. Po realizaci navržených úprav a odzkoušení ve výrobě je zhodnoceno, zda tyto návrhy vedly k optimalizaci procesu ohýbání. Následně jsou vytvořeny nové návrhy, které mohou vést k dalšímu zlepšení procesu ohýbání u vybraného dílu.

Klíčová slova:

plošné tváření, tvařitelnost, plastičnost, ohýbání, odpružení, optimalizace výrobního procesu

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Manufacturing Technology

Branch: Manufacturing and Materials Engineering
Theme of MSc work: Optimisation of bending pipes
Author of MSc work: Jan Malý
Leader of MSc work: Ing. František Tatiček, Ph.D.

Intensity of MSc work: Number of pages: 73
 Number of pictures: 53
 Number of tables: 9

Annotation:

The first part of the thesis deals with the basic principles of bending and its definition of basic concepts. The following part describes aspects necessarily solved by bending as a position of neutral layer, maximal and minimal bend radius, determination of the length of semi-finished product. Follows description of the springback issue in the bending process and bending process in general. In the thesis is also the description of the categories in terms of bending moments and bending forces. It also describes in detail the process of winding tube bending. Another section describes selected component, and the description of bending device.

In the practical part of the thesis, the author deals with the optimization of the bending process. It describes the preparation of tools and description of the production of the first test samples. Followed by the identification of defects and their designation with elimination of the causes of defects. Implementation of the designed modifications and testing in production is evaluated whether these changes leads to the optimization of the bending process. In the final part of the thesis are summarized the results, which could lead to improvement of the bending process on a selected component.

Keywords:

sheet metal forming, formability, plasticity, bending, springback, optimalization of production process

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 12. 1. 2016

.....
Bc. Jan Malý

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. za odborné vedení této práce a cenné připomínky při jejím vypracování. Dále bych rád poděkoval firmě AGROSTROJ Pelhřimov, a.s. a jejím pracovníkům za pomoc a poskytnuté rady k vypracování této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé mé rodině a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

1 Úvod a seznámení s problematikou	9
2 Základní principy ohýbání a definice základních pojmů	10
2.1 Teoretické aspekty při ohýbání dutých profilů	10
2.2 Nutně řešené aspekty u ohybu	14
2.3 Obecná problematika ohybu trubek	20
2.4 Metody ohýbání trubek	23
3 Analýza vybraného ohýbaného dílu a popis strojního vybavení	29
3.1 Popis řešeného dílu	29
3.2 Popis stroje na ohýbání	31
3.3 Popis procesu ohýbání trubky na stroji ELECT150	39
4 Návrh optimalizace procesu	40
4.1 Příprava nástroje a ohýbání prvních zkušebních vzorků	40
4.2 Identifikace vad a jejich označení	42
4.3 Návrhy pro odstranění příčin vzniku povrchových vad	48
4.4 Zhotovení první sady výrobků a zhodnocení provedených úprav	53
4.5 Zhotovení druhé sady výrobků a vyhodnocení vzniklých komplikací	59
4.6 Shrnutí dosavadních poznatků a návrh dalších opatření	61
5 Závěr	69
6 Seznam použité literatury	70
7 Seznam použitých symbolů	72
8 Přílohy	73

1 Úvod a seznámení s problematikou

Technologie tváření je jedna ze základních výrobních technologií. Jedná se o velice produktivní metodu zpracování materiálu a má velice široké uplatnění. Jelikož pocházím z města Pelhřimov, naskytla se mi možnost řešit odbornou práci pro firmu AGROSTROJ Pelhřimov, a.s.. Jedná se o společnost, která po desítky let patří k největším zaměstnavatelům v okrese Pelhřimov. Zároveň patří k největším strojírenským podnikům v České republice se zaměřením na výrobu strojů pro zemědělství. Vlastní práce se týká problematiky ohýbání dutých profilů, konkrétně se jedná o díl určen pro zemědělský stroj.

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

V rámci diplomové práce jsem řešil ve firmě AGROSTROJ Pelhřimov, a.s. problematiku ohýbání dutého profilu čtvercového průřezu (čtvercová trubka). Jedná se o výrobu součásti ze slitiny hliníku EN AW 6060, která je určena pro zemědělský stroj ROLLANT 455/454 UNIWRAP od firmy CLAAS. Polotovarem je bezešvá čtvercová trubka, vyrobená dle normy EN 755 o jmenovitých rozměrech průřezu $80 \times 80 \text{ mm}$ a tloušťce stěny $t = 6 \text{ mm}$. Na daném dílu se provádí jeden ohyb o 90° s vnitřním poloměrem $R = 470 \text{ mm}$. Požadavky zákazníka jsou kladeny především na přesnou geometrii a také na kvalitu povrchu. Po finální úpravě balotínování musí mít výrobek dokonalý povrch bez známky otlaků a poškrábání, jelikož se jedná o pohledový díl. Ohýbání daného dílu se bude realizovat metodou navíjení na ohýbací segment na stroji ELECT 150. Nástroj pro ohýbání daného dílu byl dodán od firmy OMNI-X CZ s.r.o.

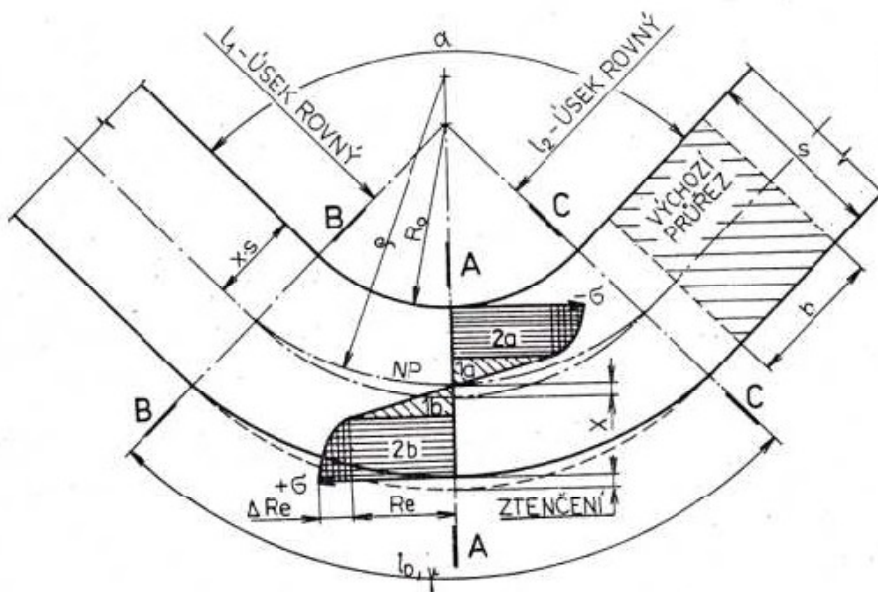
Cílem práce je provedení optimalizace výroby pro dodržení požadavků na tolerance rozměrů a dále realizaci opatření, která minimalizují možnost vzniku otlaků a mechanického poškození povrchu součásti.

2 Základní principy ohýbání a definice základních pojmů

Při každém tváření jde zejména o to, udělit příslušnému tělesu trvalou změnu tvaru. Tehdy mluvíme o plastické deformaci, na jejíž vyvolání je třeba překonat jisté mezní napětí (v nejjednodušším případě tzv. mez kluzu). Není-li této podmínky dosaženo, dojde jen k pružné deformaci a po jejím ukončení se těleso vrátí ke svému původnímu tvaru. Viditelným cílem tváření je tedy dát tělesu požadovaný tvar a rozměry. Deformační chování materiálů se pak zaměřuje na další dva aspekty tváření. Zprvu jde o to, aby při tváření nedošlo k porušení soudržnosti materiálu (tedy ke vzniku trhlin či lomů). Zadruhé jde o to, že tvářením a s ním spojenými procesy lze optimalizovat strukturu materiálu (zejména velikost zrna) a tím dosáhnout požadovanou kombinaci užitečných vlastností výrobku (např. pevnost a vrubovou houževnatost).

2.1 Teoretické aspekty při ohýbání dutých profilů

Tvářecí proces ohýbání je trvalá plastická deformace materiálu, která je doprovázena pružnou deformací. Tato pružná deformace se označuje jako odpružení a způsobuje problémy z hlediska dodržení přesnosti. Ohýbat lze za studena i za tepla. Ohýbání se většinou provádí za studena, tj. za teplot výrazně nižších než je teplota rekrytalizace ($T \leq 0,3 \cdot T_{TAV}$). Vrstva materiálu na vnitřní straně ohybu je stlačována (pěchována) a zkracována ve směru podélném a prodlužována v příčném směru. Naopak na vnější straně ohybu je vrstva materiálu tažena a ztenčována v podélném směru. U ohybu se mění křivost součásti natrvalo za působení lokálních sil nebo ohybových momentů. U ohybu dojde k pružně-plastickým deformacím. Výskyt pružné deformace má vliv na změnu tvaru po ukončení ohybu ve srovnání s geometrií ohýbadla po vyjmutí ohýbaného materiálu z nástroje. Přetvoření při ohýbání je velmi intenzivní a zasahuje poměrně malý objem materiálu, v němž jak u napětí, tak i u přetvoření se změní jejich velikost a smysl. Zásadní vliv na kvalitu ohybu mají tahová napětí, na která je kladen velký důraz, aby nedošlo k porušení ohýbaného materiálu → nemůže dojít k překročení tzv. kritické hodnoty. [3], [4], [6], [8]



Obrázek 2.1-01: Schéma rozložení a velikosti napětí v materiálu při procesu ohýbání [10]

Trubky se ohýbají za studena ručně v přípravcích (pouze za použití lidské síly) nebo strojně na ohýbacích strojích. Ohýbání za tepla probíhá při teplotě vyšší než je teplota rekystalizace. Za tepla se například ohýbají tvrdé a křehké materiály a průřezy, které mají velký odporový moment. Ručně se trubky ohýbají prostým ohnutím přes trn nebo podle šablony. Při ručním ohýbání se zpravidla nevyplňuje vnitřek trubky, a tím může docházet k určité deformaci daného průřezu. Deformace průřezu je ovlivněna především poloměrem ohybu. Proto se určuje minimální a maximální poloměr ohybu, který se počítá ze vztahu, kde se vychází z rozměrů polotovaru (průměr trubky, tloušťka stěny) a také z mechanických vlastností tvářeného materiálu. Část trubky, která je na vnější tažené části oblouku, se ohýbáním zeslabuje, a tím může dojít ke snížení pevnosti trubky. Aby se tak nestalo, je doporučen nejmenší poloměr ohybu, který musí být alespoň trojnásobkem vnějšího průměru trubky. Takto lze ohýbat i ocelové trubky menších průměrů, měděné a hliníkové trubky. [9], [10], [11]

2.1.1 Plastičnost a technologická tvařitelnost materiálu

Pokud se chceme zabývat tvářením materiálu, musí tento materiál splňovat požadavky na určité vlastnosti. Jedná se především o plastičnost a tvařitelnost materiálu.

Plastičnost je schopnost tvářeného materiálu se plasticky deformovat v rozsahu deformací od počátečních po mezní. Počáteční plastičnost vyjadřuje přechod od pružného do plastického stavu. Mezní plastičnost odpovídá podmínkám vzniku prvních trhlin. Jedná se o čistě materiálovou vlastnost, jejíž zkoumání by nemělo být ovlivněno tak přízemními faktory, jako je třeba tvar deformovaného tělesa. Jinak řečeno, plastičnost je funkcí materiálu, nikoli výrobní technologie. Plastičnost se zjišťuje za pomoci zkoušek, např. pěchovací, tahové a krutem v podmínkách jednoosé napjatosti. Plastičnost ovlivňují metalurgické vlastnosti kovu, teplota a rychlost deformace.

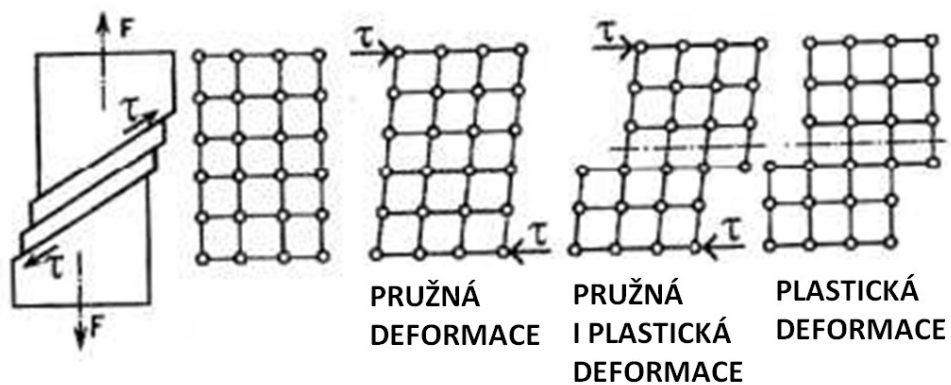
Deformace většinou nastávají na hranicích nebo uvnitř zrn. Plastická deformace se projevuje dvěma mechanismy a těmi jsou skluz a dvojčatění. Většinou dochází k rozvíjení u toho mechanismu, který vyžaduje při daných podmínkách nejmenší napětí. Při deformaci kovů dochází k různým typům poruch krystalové mřížky. Je důležité tyto poruchy rozeznávat, protože mají vliv na mechanické vlastnosti kovu. Hlavními poruchami jsou tzv. čárové poruchy, které se nazývají dislokace. Dislokace rozdělujeme na šroubové a hranové. Rozlišuje se plastičnost a tvařitelnost. Plastičnost je v omezeném rozsahu a to v oboru homogenní rovnoměrné deformace. [4],[11]

K posouzení plastičnosti se používají tahové a tlakové zkoušky. U zkoušky tahem jde především o určení meze kluzu, meze pevnosti v tahu, tažnosti, určení exponentu deformačního zpevnění a součinitele plastické anizotropie. Dále jde o určení poměru $R_{p0,2}/R_m$.

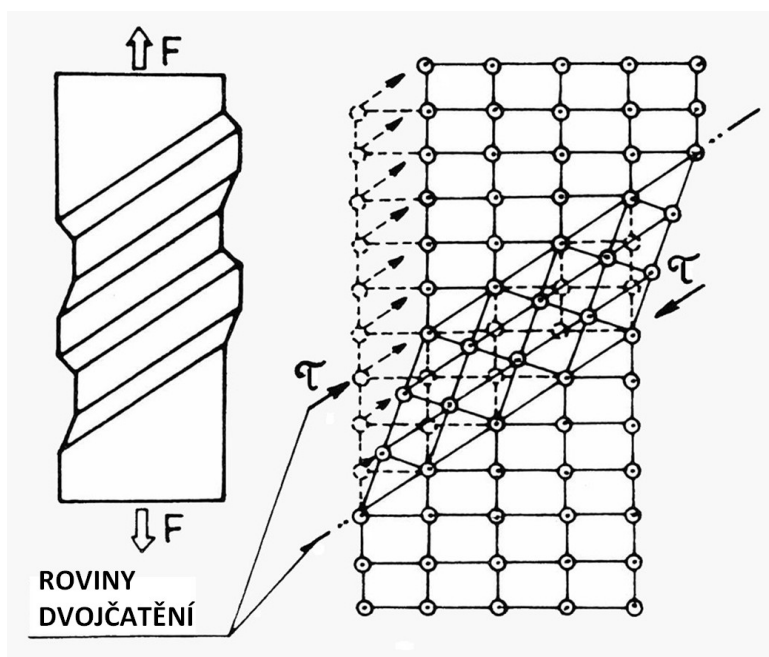
Pro využití v praxi je mnohem užitečnější *tvařitelnost*, tedy schopnost tělesa plasticky se deformovat za určitých podmínek tváření až do porušení soudržnosti (do vzniku kritických trhlin, resp. do lomu). Tvařitelnost závisí na plastičnosti, geometrii tvářeného tělesa a podmínkách tváření. Lze ji kvantifikovat např. po provedení různých technologických zkoušek (zkouška tahem). [12]

Pro ověření tvařitelnosti se používá jednoduchých zkoušek, ale mohou se využít i speciální, při kterých je snahou docílit vzniku trhliny. Hodnota parametru tvařitelnosti je závislá na druhu zkoušky. U některých zkoušek se jedná o počet cyklů (počet cyklů do vzniku trhliny), u dalších se může jednat o vzdálenost (dráha nástroje do vzniku trhliny při Erichsenově zkoušce hlubokotažnosti) apod. [13]

Deformační odpor [MPa] materiálu je vnitřní napětí, vznikající v tělese jako reakce na působení vnějších tvářecích sil. Toto vnitřní napětí musí být dostatečně velké, aby postačovalo k vyvolání plastické deformace. Přirozený deformační odpor je určován za specifických podmínek tzv. jednoosého stavu napjatosti (viz počáteční fáze zkoušky tlakem nebo tahem). [14]



Obrázek 2.1-02: Schematické znázornění pružné a plastické deformace monokrystalu skluzem. [4]



Obrázek 2.1-03: Schematické znázornění plastické deformace dvojčatěním. [4]

Tvařitelnost je ovlivněna následujícími vlastnostmi:

- materiálu (chemické struktury), fází, apod.
- teploty
- rychlosti deformace
- napěťového a deformačního stavu
- geometrického faktoru
- vnějšího prostředí

U technologických zkoušek tvařitelnosti je cílem stanovit přesnější ukazatele přetvoření při ohýbání profilů na požadovaný tvar. U tvařitelnosti se rozlišují dva typy tvorby defektů a to u objemového a plošného tváření. U plošného tváření dochází většinou ke ztrátě stability. Technologická tvařitelnost je dána součinem materiálového faktoru m_F a procesního faktoru p_F . Cílem technologické tvařitelnosti je optimální interakce součinu těchto faktorů → výroba tvářeného materiálu bez defektů.

$$TT = m_F \cdot p_F$$

Při ohýbání profilů se plastická deformace realizuje především kluzem v rovinách mřížky, tudíž skluz obvykle vznikne v rovinách obsahující nejvíce atomů tam, kde má skluzové napětí maximální hodnotu. [14]

2.2 Nutně řešené aspekty u ohybu

2.2.1 Poloha neutrální vrstvy

Velmi důležitý aspekt v procesu ohýbání je tzv. neutrální vrstva a určení její polohy. Při ohybu dochází k tomu, že na vnitřní straně vrstvy kovu vznikají tlaková napětí a na vnější straně tahová napětí. Tato napětí způsobují deformaci materiálu, tahová napětí způsobují prodlužování vláken a tlaková jejich zkracování. Neutrální vrstva se nachází ve středu těchto dvou oblastí, kde vlákna nejsou prodlužována ani zkracována. Poloha neutrální vrstvy je důležitá pro určení délky výchozího polotovaru ohýbané součásti. [2], [10], [15]

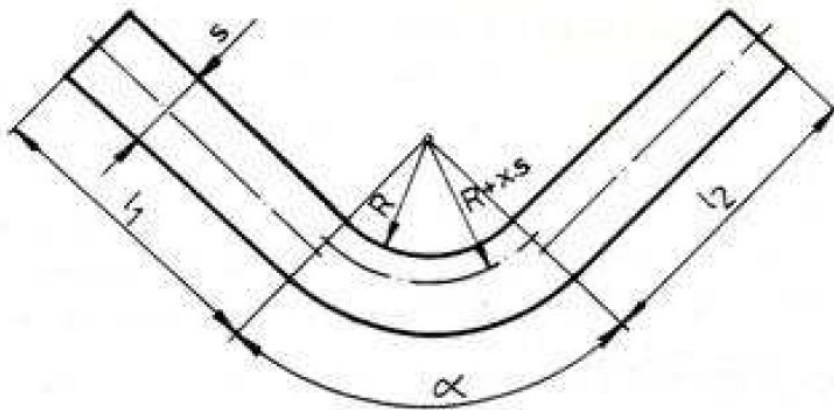
Osa těžiště ohýbaného materiálu nemusí být totožná s neutrální osou, protože se neutrální osa posouvá při ohybu směrem k vnitřní straně. Při určování polohy neutrální vrstvy, mohou nastat dva případy:

$$\frac{R_0}{s} \geq 12 - \text{s velkým poloměrem ohybu}$$

Poloměr neutrální plochy je $\rho = R_0 + \frac{s}{2}$ vzhledem k tomu, že dochází jen k malým pružně plastickým deformacím. V tomto případě lze uvažovat, že nedojde k posuvu neutrální plochy a tudíž zůstává uprostřed tloušťky z ohýbaného materiálu.

$$\frac{R_0}{s} \geq 6 - \text{s malým poloměrem ohybu}$$

Poloměr neutrální vrstvy je $\rho = R_0 + x \cdot s$ vzhledem k tomu, že dochází k pohybu neutrální vrstvy k vnitřnímu poloměru zaoblení, vzniká značná deformace a mění se tloušťka průřezu a také se stlačují vlákna (viz obrázek 2.2-01).



Obr. 2.2-01: Posunutí neutrální osy v místě ohybu [11]

2.2.2 Určení délky polotovaru [3], [9]

Při určení délky polotovaru se vychází z délky neutrální vrstvy. Při výpočtu lze rozdělit součást do rovných úseků a na ohýbané úseky, u kterých se na základě poloměru neutrální vrstvy vypočítá délka polotovaru. Při výpočtu délky polotovaru se nejprve určí poloměr neutrální vrstvy podle vztahu:

$$r_n = R_0 + x \cdot s \text{ [mm]}$$

V další fázi se vypočte délka neutrální vrstvy l_n , která je závislá na tloušťce ohýbaného materiálu, úhlu oblouku neutrální vrstvy a poloměru ohybu R_0 . Dle vzorce:

$$l_n = \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot \varphi \cdot r_n = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot (R_0 + x \cdot s) \text{ [mm]}$$

Celková délka se pak vypočte jako:

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

Jedná se o součet rovinných a ohýbaných úseků.

2.2.3 Určení minimálního a maximálního poloměru ohybu

a) Minimální poloměr ohybu

Minimální poloměr ohybu závisí na plastičnosti, anizotropii a kvalitě povrchu ohýbaného materiálu, dále na úhlu ohybu, šířce a tloušťce ohýbaného polotovaru. Hodnoty minimálních poloměrů jsou také závislé na výchozím stavu materiálu a na způsobu ohýbání. Způsob ohybu může být buď napříč anebo podél vláken. Preferovaná varianta je ohýbání ve směru napříč vláken. U málo plastických materiálů dochází při ohybu díky intenzivnímu deformačnímu zpevnění ke vzniku trhlin, proto se tyto materiály před ohýbáním žíhají. Vyžíhané materiály mají hodnotu minimálního poloměru ohybu menší než materiály stejné tloušťky, které jsou zpracovávány tvářením za studena. [3]

U minimálního poloměru ohybu ještě nedochází k porušení materiálu. K porušení materiálu může dojít vlivem zmenšování poloměru ohybu na vnější straně, kde převládá tahové napětí. [1]

Minimální poloměr ohybu lze vypočítat dle vzorce:

$$R_{min} = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{max}} - 1 \right) = C \cdot t \text{ [mm]}$$

Tabulka 2.2-01: Určení součinitele C [4]

Materiál	Měkká ocel	Měkká mosaz	Hliník	Dural	Měkká měď
Součinitel C	0,5 - 0,6	0,3 - 0,4	0,35	3 - 6	0,25

Hodnota C bývá závislá na tloušťce a kvalitě materiálu a mění se podle směru vláken.

b) Maximální poloměr ohybu

U maximálního poloměru ohybu dochází k trvalým deformacím v krajních vláknech na tahové straně. Je to největší poloměr, u kterého se po odlehčení materiál nevrátí do původního stavu. [4]

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

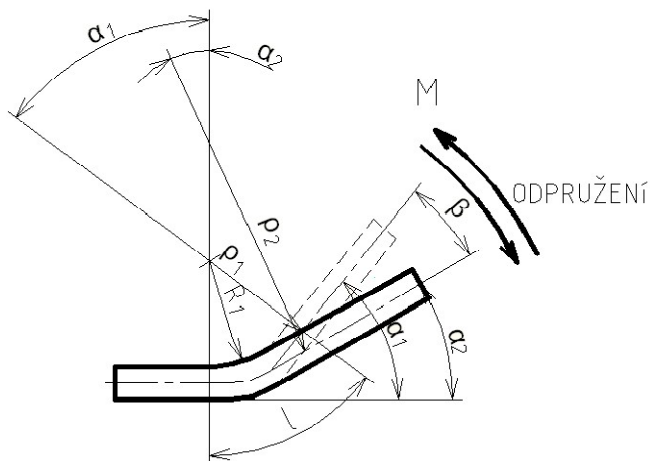
$$R_{max} = \frac{s}{2} \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) [mm]$$

V případě, že by tato podmínka nebyla splněna, by došlo k vratnému pružnému (elastickému) ději a ohýbaný materiál by se po odtížení narovnal. [9]

2.2.4 Odpružení při ohybu

Vzniká vlivem pružných napětí doprovázejících každé tváření za studena. Odpružení závisí především na velikosti dosažené deformace, na modulu pružnosti v tahu a také na poloměru ohybu. Čím je hodnota poloměru ohybu vyšší, je větší hodnota odpružení. Jak bylo výše zmíněno, u ohýbání dochází k pružně-plastickému přetvoření. Ohýbaný materiál má tendenci vracet se do původního stavu o určitý úhel odpružení β . Odpružení je nežádoucí a ovlivňuje výsledné rozměry výrobku. Při konstrukci ohýbacích nástrojů je nutné věnovat zvýšenou pozornost problematice odpružení. Posuzuje se tzv. úhel odpružení, který je rozdílem mezi úhlem ohybu α a stlačeným úhlem polotovaru $\acute{\alpha}$ ($\beta = \alpha - \acute{\alpha}$).

[1], [2], [4], [6], [9]



Obrázek 2.2-02: Schéma odpružení po ohybu [4]

Shrnutí zásadních vlivů na odpružení: [3]

- druh a mechanické vlastnosti materiálu (především modul pružnosti v tahu)
- tloušťka polotovaru a poloměr ohybu
- velikost úhlu ohybu
- metoda provedení ohybu
- tvar ohybu
- na konci ohýbání podle velikosti tlaku nástroje např. od vyrovnávací nebo kalibrovací síly

Velikost úhlu odpružení β se může zjistit buď z diagramu nebo výpočtem.

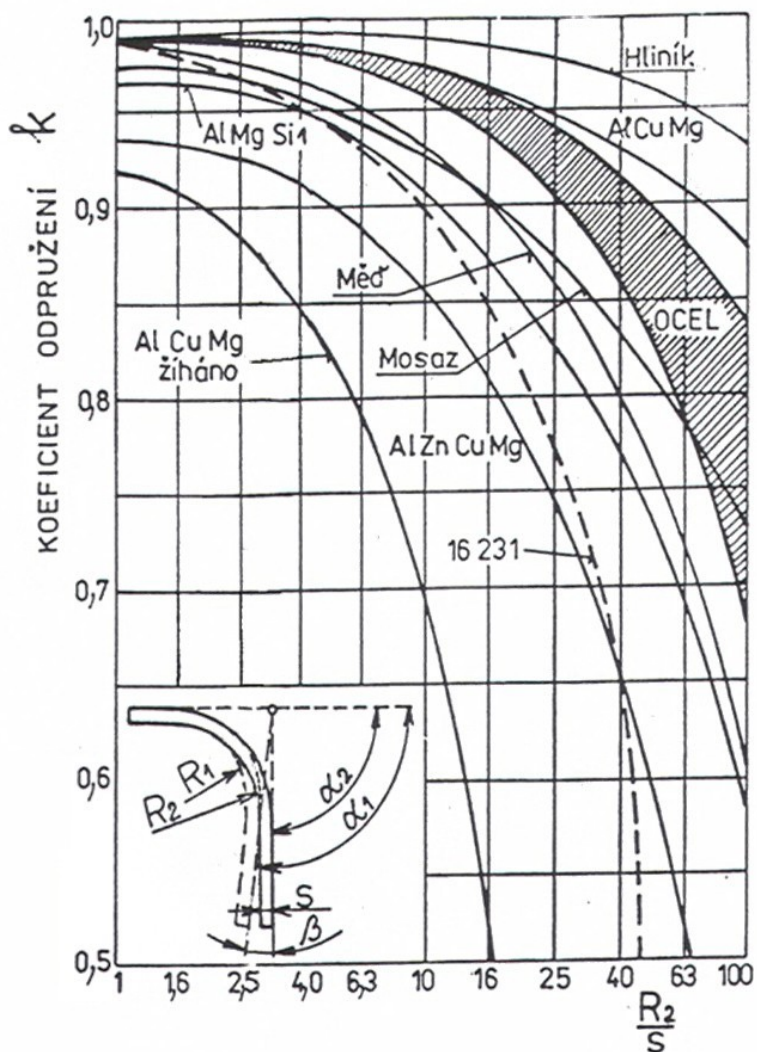
U diagramu se stanovuje odpružení z koeficientu :

$$k = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{r_1 + 0,5 \cdot t}{r_2 + 0,5 \cdot t}$$

$r_1; \alpha_1$ – je poloměr a úhel u ohýbacího nástroje

$r_2; \alpha_2$ – je konečný poloměr a úhel na výlisku

[10], [15], [16]



Obrázek 2.2-03: Diagram k určení koeficientu odpružení k [1]

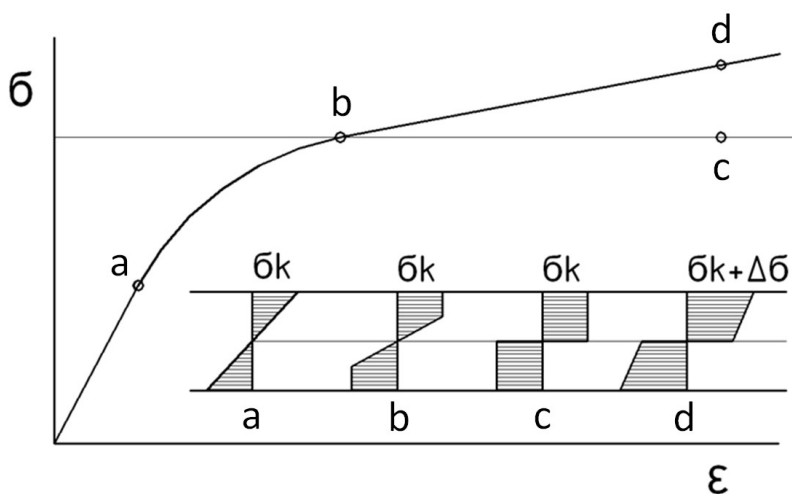
Hodnoty úhlu odpružení pro vybrané materiály jsou udány v následující tabulce 2.2-02.

Tabulka 2.2-02: Hodnoty úhlu odpružení vybraných materiálů [1]

Materiál	R/t	
	0,8 až 2	>2
Ocel $\sigma_{pt} < 320 \text{ MPa}$	1°	3°
Ocel $\sigma_{pt} = 320 \text{ až } 400 \text{ MPa}$	3°	5°
Ocel $\sigma_{pt} > 400 \text{ MPa}$	5°	7°
Mosaz měkká	1°	3°
Mosaz tvrdá	3°	5°
Hliník	1°	3°

2.3 Obecná problematika ohybu trubek

Tato kapitola věnuje pozornost obecné problematice ohybu trubek. Problematika ohybu kruhových trubek je celkem prozkoumána a jsou známa kritéria, která upozorňují na možnost vzniku defektů. O problematice defektů ohýbaných čtvercových trubek jsou k dispozici jen obecné informace, nicméně proces ohýbání z hlediska rozložení napětí a deformace se u trubek kruhových a čtvercovitých průřezů významně neodlišuje. [11]



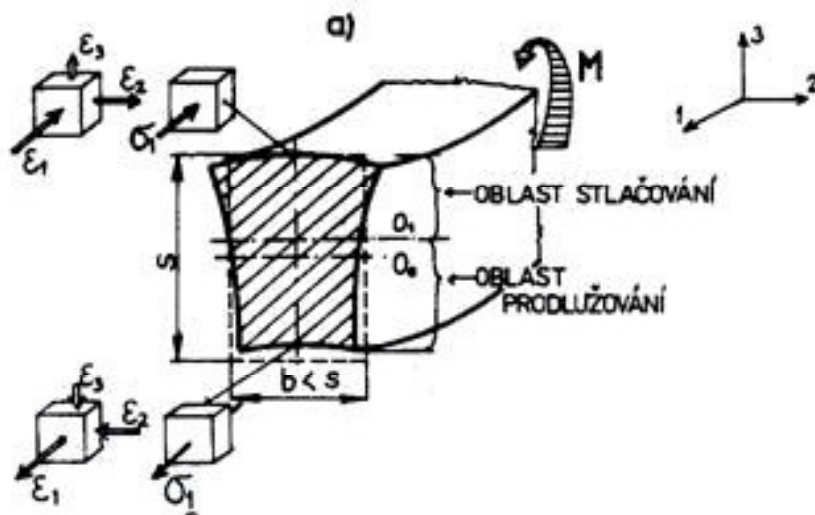
Obrázek 2.3-01: Rozložení napětí v příčném průřezu při ohybu materiálu [11]

2.3.1 Deformace průřezu při ohybu

a) Pásy a tyče

Při ohybu může dojít k deformaci průřezu, zejména u úzkých pásů, tyčí atd. Deformace průřezu tyče obdélníkového profilu pro $b \leq 3s$ je znázorněna na obr. 2.3-02. U širokých pásů ($b \geq 3s$) nedochází k deformaci, protože proti deformacím v příčném směru působí odpor materiálu velké šířky vzhledem k jeho malé tloušťce. [18], [19]

V neutrální ose, kde jsou σ a ϵ nulová, jsou vlákna bez napětí a bez deformace. Neutrální osa je na začátku ohýbání uprostřed průřezu, postupně se však se zmenšujícím poloměrem ohybu posouvá směrem k vnitřní straně ohybu.



Obrázek 2.3-02: Deformace průřezu během ohýbání pro rozdílné výšky a profily [11]

b) Trubky

Trubky se od pásu a tyčí odlišují tím, že nemají „plný průřez“, jde o duté, většinou tenkostěnné polotovary. V porovnání s geometrií průřezu tyče je u kruhové trubky b (šířka) = s (výška) = $\varnothing D$ (vnější průměr) a u čtvercové tyče $b = s = h$ (vnější rozměr čtvercové tyče). Na rozdíl od plného průřezu je deformace příčného řezu trubek ovlivněna tloušťkou stěny (t). U kruhového a čtvercového profilu se trubky z hlediska „borcení“ příčného průřezu odlišují.

Nicméně napětově-deformační stav uvedený na obr. 2.3-02 je možno částečně aplikovat i na analýzu problému „borcení“ příčného průřezu čtvercových trubek. [18], [19]

Parametry ohybu trubek kruhových

Hlavní technologické parametry při ohybu trubek jsou: [1]

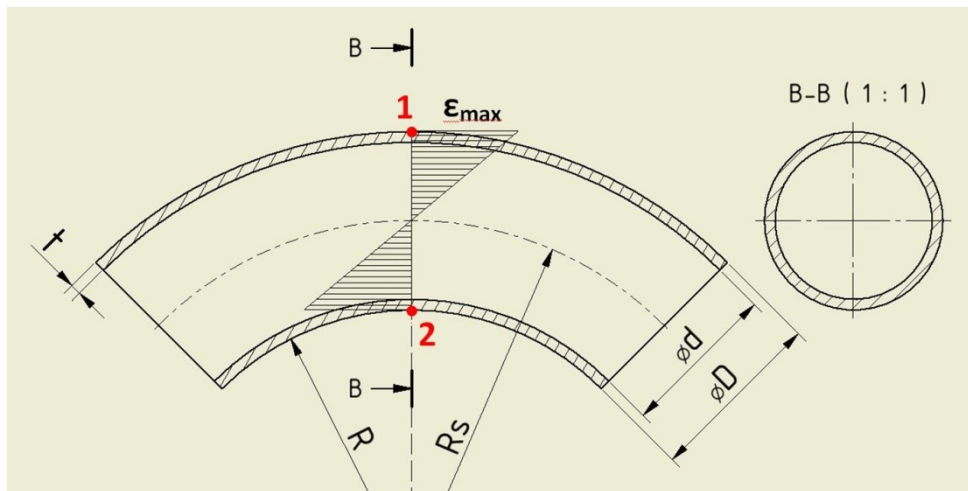
- Úhel ohybu

- relativní tloušťka stěny $\frac{S_0}{D}$

- relativní poloměr ohybu $\frac{R}{D}$

Tato technologická kritéria hodnotí stupeň obtížnosti procesu ohýbání. Hodnota relativní tloušťky stěny určuje hranici mezi tenkostěnnými a tlustostěnnými trubkami. Za tenkostěnnou trubku lze považovat tu, jejíž poměr je $\frac{S_0}{D} = \frac{1}{10}$ až $\frac{1}{20}$ v závislosti na tom, který defekt je sledován jako kritický pro součástku. Určení, jaký defekt je kritický, závisí na funkci součástky. [18], [19]

Na obrázku 2.3-04 je uvedena geometrie kruhové trubky a průběh přetvoření v osovém směru. Body 1 a 2 jsou kritická místa, kde může dojít k defektům. [18]



Obrázek 2.3-04: Průběh přetvoření kruhové trubky[18]

Stupeň obtížnosti procesu ohybu je možno hodnotit pomocí empirických technologických limitů, např. optimální proces vyžaduje, aby:

$$\frac{S_0}{D} \geq 0,1; \quad \frac{R}{D} \geq 3$$

Přijatelnému procesu vyhovují hodnoty:

$$\frac{S_0}{D} \geq 0,075; \quad \frac{R}{D} \geq 2,5$$

Nevhodné podmínky nastávají, když:

$$\frac{S_0}{D} \geq 0,05; \quad \frac{R}{D} \geq 2,5$$

V případech, kdy jsou nevhodné podmínky, se doporučuje použít výplně ke stabilizaci průřezu. Tím se oddálí ztráta stability vnitřní stěny.

Technologický parametr S_0/D resp. R/D souvisí s teoretickým poměrným poloměrem ohybu R_S/r , který je: [1]

$$\frac{R_S}{r} = \frac{\frac{2 \cdot R_S}{D} - 1}{1 - \frac{S_0}{D}}$$

Z uvedeného vyplývá závislost na technologických parametrech $\frac{S_0}{D}$ a $\frac{R}{D}$.

2.4 Metody ohýbání trubek

V následujícím textu uvedu rozdělení způsobů ohýbání podle momentů a sil působících na trubku při ohybu bez zřetele na to, zda se ohýbá zastudena nebo zatepla. Z tohoto hlediska je možno ohýbání trubek rozdělit do těchto osmy skupin: [20]

1) Ohýbání pouhým ohybovým momentem bez působení příčných sil kolmých k ose ohýbané trubky. Průběh momentu v celé délce ohybu trubky je konstantní, a proto by mělo nastat rovnoměrné ohýbání v celé délce L na stejný poloměr ohybu. To však platí pouze při pružném ohybu. Složitější je průběh ohybu po překročení meze kluzu, kdy se nepříznivě projeví různé nestejnorodosti materiálu i různé odchylky tvaru příčného řezu trubkou. Při ohýbání trubek dochází totiž k poměrně vysokému stupni tváření, a to zejména ve vnějších pásmech materiálu. Při překročení meze kluzu nastává nestejně prodlužování jednotlivých vláken ohýbané trubky (podobně jako tomu je při deformaci zkušební tyče při zkoušce tahem), a proto se trubka při ohybu bortí. Přispívají k tomu i síly, které se snaží průřez zploštit, čímž se zároveň mění průřezový modul ohýbané trubky. Proto není tento způsob pro ohýbání trubek vhodný a v praxi se ho málo používá. Hodí se pro ohýbání trubek velkých průměrů při malém zakřivení, tj. při velkém poloměru ohybu.

2) Ohýbání momentem vyvolaným příčnými silami působícími na ohýbanou trubku. Tento případ je z hlediska mechaniky stejný jako namáhání nosníku na dvou podporách. V tomto případě není velikost ohybového momentu stálá po celé délce

trubky, která má být ohýbána. Velikost ohybového momentu klesá z maxima pod zatěžující silou na nulu na podporách. Působíště sil vzhledem k trubce se nemění. Tohoto způsobu se používá při ohýbání trubek na lisech. Trubka mění tvar podle tvárníku. Nakonec se ještě tvárníkem a tvárnicí v příčném řezu kalibruje.

3) Ohýbání navíjením na tvarový segment. Ohyb probíhá postupně, příčné síly kolmé k ose trubky mění vzhledem k trubce svá působíště. Při ohýbání navíjením působí ještě osové síly vyvozené třením trnu a přitlačné lišty, které způsobují přídatný tah. Tento způsob je jedním z nejpoužívanějších při ohýbání zastudena u ohybů do 180°. Lze ho rozdělit na dvě skupiny:

- Ohýbání na trnu navíjením na segment

Ohýbání s opěrným trnem, při kterém se ohýbací segment otáčí a trubka na něm upnutá se k němu přitlačuje. Proti zploštění je trubka vyztužena trnem.

- Ohýbání bez trnu navíjením na segment

Při tomto způsobu se ohýbací segment nepohybuje a trubka je na tento segment dotlačována a navíjena tvarovou lištou nebo tvarovým kotoučem.

4) Ohýbání zakružováním mezi třemi nebo více kotouči. Ohybový moment je opět vyvozen silami kolmými k ose trubky, které vzhledem k trubce mění svá působíště. Trubka při ohýbání je buď ohýbacími kotouči vtahována, nebo je mezi kotouče vtlačována. Podle toho vznikají pak různé přídatné síly. Kromě ohýbacího momentu může působit na ohýbanou trubku i moment kroutící, takže je možno zakružovat i do tvaru šroubovice.

5) Ohýbaní vytlačováním ohýbané trubky, která je vedena vodítkem a otáčí se kolem pevného čepu. Ohybový moment je vyvozen příčnými silami, kolmými k ose ohýbané trubky za současného působení osové síly (tlaku), která vzniká při vytlačování trubky. Síly mění vzhledem k trubce svá působíště. Trubka se vytlačuje nejčastěji hydraulickým pístem. K vyztužení trubky proti zploštění a zborcení se používá trnu (článekového).

6) Ohýbání trubky jejím *převlékáním přes tvarový trn*. Při tomto způsobu ohýbání je průběh sil a momentů velmi složitý a významnou úlohu mají přitom síly vyvolené třením o trn. Ohýbá se nejčastěji zatepla. Po ohybu se kolena kalibrují v zápusťce na lisu.

7) *Ohýbání válčováním* určitých částí stěny trubky. Vyválčováním se stěna trubky v určitém místě sice zeslabí, ale zároveň protáhne. Tím je možno dosáhnout ohybů v různých prostorových tvarech.

8) *Ohýbání vytvořením záhybů*. Tento způsob je ohýbání momentem působeným příčnými silami. Ohýbá se zásadně zatepla. Na ohřátý výsek stěny trubky působí tlak, při kterém nejdříve vzniká pěchování a potom vybočení stěny trubky a vytvoření záhybu.

Jelikož je praktická část této práce zaměřena na ohýbání metodou navíjení na tvarový segment, budu se dále věnovat bližšímu seznámení pouze s touto ohýbací metodou.

2.4.1 Ohýbání trubek navíjením

Ohýbání trubek navíjením je určeno pro průměry trubek $D = (12 \div 80) \text{ mm}$ a provádí se na strojních ohýbačkách. Celý proces spočívá v navíjení trubky na segmentový kotouč, který stejně jako vodící lišta, musí mít odpovídající profil dle vnějšího průměru trubky. Vodící lišta může být pevná nebo pohyblivá. Nejprve se trubka, která prochází přes vodící lištu, upevní k segmentovému kotouči. Poté dochází k otáčení kotouče a tudíž k navíjení trubky na tento kotouč. Z toho vyplývá, že konečný tvar ohybku se odvíjí od tvaru kotouče. [1]

Kvalita ohybu se dá zvětšovat vkládáním kalibračních trnů a mechanických ohebných vložek (pružiny, silikonové, kovové nebo polyuretanové vložky) do trubek. Kalibrační trn většinou sahá až do místa ohybu. Pro trubky do průměru $D < 50 \text{ mm}$ je průměr trnu o $(0,5 \div 0,6) \text{ mm}$ menší než je vnitřní průměr trubky. Důležitým faktorem je mazání trnu, které se provádí buď ručně v místě ohybu nebo pomocí dutého trnu, kde se mazivo přivádí přes dutinu až do třecích ploch. Mezi nejpoužívanější maziva patří mazlavé mýdlo a další speciálně vyvinutá maziva. [17]

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

$$M = \left(k_1 + \frac{k_0}{2\rho_s} \right) \cdot W_0 \cdot R_e$$

Modul průřezu v ohybu pro kruhovou trubku:

$$W_0 = 0,1 \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$$

Tabulka 2.4-01: Hodnoty koeficientu k_1 [19]

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

Poznámka: t = tloušťka stěny trubky [mm]

2.4.2 Navíjení trubek bez trnu

Z hlediska sil a momentů se jedná o způsob, při kterém příčná síla, která s reakcí čepu stolu tvoří momentovou dvojici, mění vzhledem k trubce své působíště. Při ohýbání je trubka pevně uchycena k ohýbacímu segmentu (kotouči), ke kterému je trubka přitlačována tvarovým válečkem nebo lištou. Vhodnou volbou tvaru přitlačné lišty a ohýbacího segmentu je možno dosáhnout správného tvaru příčného řezu trubkou. [20]

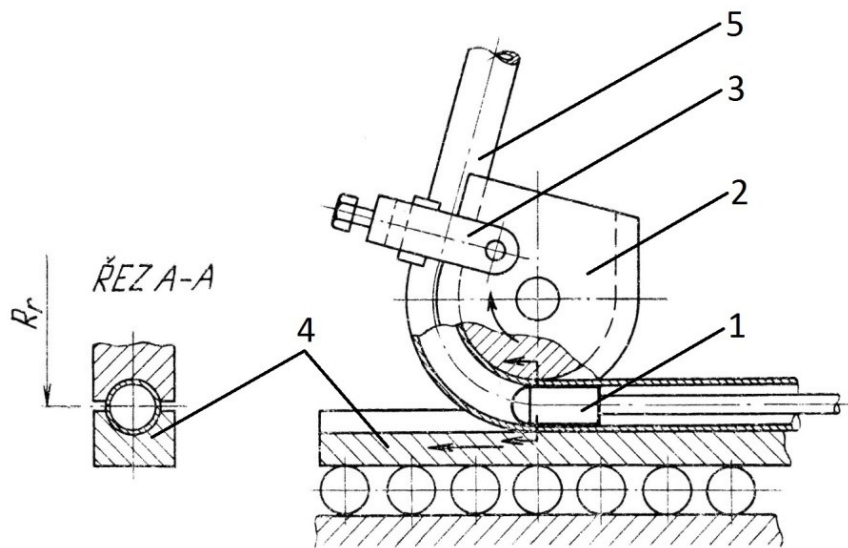
V praxi se ohýbání bez trnu volí hlavně tam, kde by při použití trnu vznikly potíže. Je to hlavně při výrobě hadů pro výrobu kotlů a různá topná zařízení, kde je snahou dosáhnout plynulé výroby s nejmenším počtem svarů. Minimální poloměry při ohýbání bez trnu jsou omezeny tvořením záhybů na vnitřní straně ohybu.

Výhody oproti ohýbání s trnem:

- zjednodušená manipulace (do trubky není třeba zavádět trn, proto je tento způsob vhodný tam, kde by bylo jeho použití obtížné nebo nemožné) menší spotřeba energie (odpadá tření o trn)
- příznivější rozložení materiálu v příčném řezu (nedochází k tak intenzivnímu ztenčení stěny na vnějším poloměru ohybu jako při ohýbání s trnem)

2.4.3 Navíjení s opěrným trnem

Schéma tohoto způsobu je naznačeno na následujícím obrázku 2.4-01. Ohýbaná trubka (5) se nasune na trn (1) a upevní k ohýbacímu segmentu (2) upínacím zařízením (tzv. přítlakem) (3). Trn je ve směru své osy stavitelný. Je uchyten pevně v kozlíku, aby se po nastavení nemohl ve směru osy pohybovat. Při ohýbání je trubka opřena o opěrnou lištu (4). Moment potřebný k ohnutí trubky a k překonání všech třecích odporů se přenáší z posledního hnacího hřídele nebo kola na ohýbací segment buď přímo prostřednictvím klínů, nebo pomocí upínacích součástí. [20]

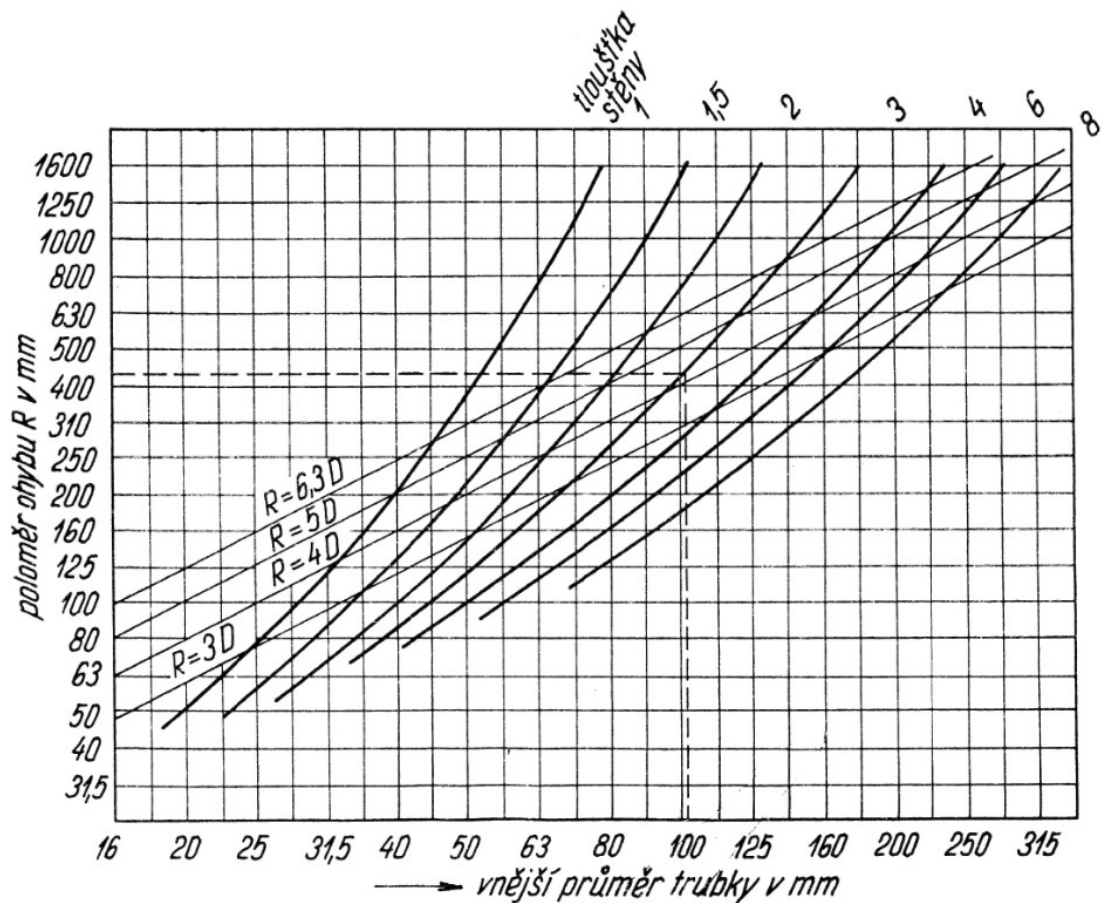


Obrázek 2.4-01: Schéma navíjení s trnem [20]

Ohýbací segment je buď litý, nebo sestavený z jednotlivých částí. Pomocí segmentů oválného tvaru se ohýbají trubky do 180°. Přitom konstrukce segmentu musí dovolit poněkud větší úhel ohybu, aby se vyrovnalo zpětné odpružení. Segment má na obvodu drážku podle vnějšího průměru ohýbané trubky. Pro každý průměr trubky a pro každý poloměr ohybu musí být zvláštní segment. To zvyšuje náklady na ohýbání, neboť ohýbací stroj musí být vybaven velkým počtem segmentů. Proto je důležité při konstrukci předepisovat pouze normalizované poloměry ohybu. Pro poměrné poloměry ohybu se používá zhruba celých násobků vnějšího průměru trubky.

Drážka v segmentu v místě upnutí trubky je nejdříve přímá a teprve za tímto místem se stáčí do oblouku o poloměru R . Upínací čelist má rovněž profil tvaru dle vnějšího průměru trubky. K segmentu je trubka přitlačována prostřednictvím čelistí šroubem nebo speciálním upínacím zařízením (přítlakem). Při ohýbání je trubka

k segmentu přitlačována lištou, která má rovněž profil doplňující se s drážkou segmentu. Opěrná lišta se nastavuje a přitlačuje ručně šroubem nebo hydraulicky. Lišta je obvykle pohyblivá, uložená ve vedení nebo na válečcích, aby její třecí odpory byly co nejmenší. Jeli lišta pevná, vznikají značně velké odpory třením. [19], [20]



Obrázek 2.4-02: Minimální poloměry ohybu pro ohýbání navíjením s trnem [20]

Výhodou této metody ohýbání je možnost dosažení malých poloměrů ohybu. Minimální poloměr ohybu pro ocelové trubky lze vyčíst z grafu (obr. 2.4-02). Je zde určen v závislosti na vnějším průměru trubky a na tloušťce stěny. Tento způsob je jedním z nejrozšířenějších způsobů ohýbání trubek vůbec. Byl pro něj zkonstruován velký počet ohýbacích strojů. Stroje se liší hlavně velikostí a pohonem, jinak jsou prakticky stejné. Různé bývá upínací zařízení, stupeň mechanizace a tvar trnu. Důležitý je správný tvar segmentu a trnu, jejich vzájemné nastavení a tolerance ohýbané trubky. [20]

3 Analýza vybraného ohýbaného dílu a popis strojního vybavení

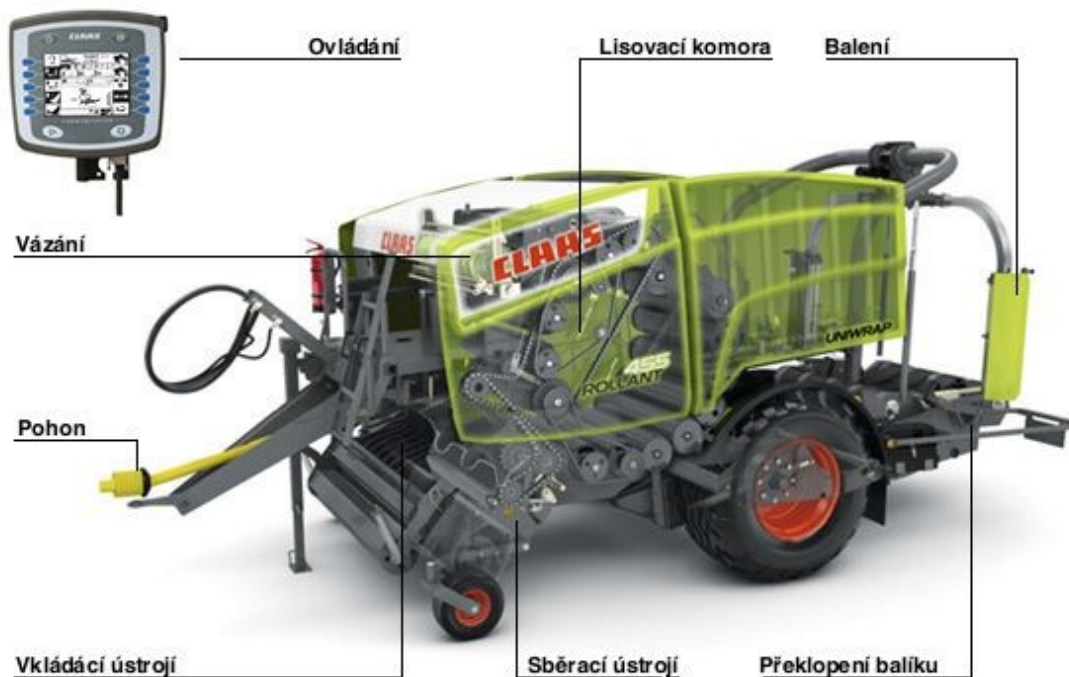
V této kapitole se budu nejdříve věnovat bližšímu popisu vybraného dílu. Následuje rozbor vlastností materiálu a jeho chemického složení. Dále zde bude popsán ohýbací stroj ELECT150 a jeho jednotlivé části.

3.1 Popis řešeného dílu

Jedná se o součást ze slitiny hliníku, která je určena na zemědělský stroj ROLLANT 455/454 UNIWRAP od firmy CLAAS (viz obrázek 3.1-01). Dodávaný polotovar je bezešvá čtvercová trubka vyrobená dle normy EN 755 o jmenovitých rozměrech 80 x 80 mm a tloušťce stěny $t = 6 \text{ mm}$, která je dodána v délce $l = 4500 \text{ mm}$. Tento polotovar je vyroben z materiálu **EN AW 6060** (slitina AlMgSi - ČSN 424401). Na daném dílu se provádí ohyb do úhlu 90° s vnitřním poloměrem ohybu $R = 470 \text{ mm}$. Po ohybu je každý díl kontrolován dle šablony a po kontrole následuje důkladné omaštění. Další operací je vyříznutí otvorů a zafrézování délky na stroji HEC1000. Poté se díl pošle na finální úpravu povrchu balotínováním. Požadavky zákazníka jsou kladeny hlavně na přesnou geometrii dle výkresu a také na kvalitu povrchu. Výrobek nesmí po finální úpravě balotínování vykazovat jakékoliv povrchové vady v podobě otlaků a škrábanců, jelikož se jedná o pohledový díl. Výkres řešeného dílu je přiložen v příloze.



Obrázek 3.1-01: Umístění řešeného dílu na zemědělském stroji do firmy CLAAS



Obrázek 3.1-02: Stroj ROLLANT 455/454 UNIWRAP od firmy CLAAS

3.1.2 Polotovar a vlastnosti materiálu EN AW 6060

Charakteristické vlastnosti materiálu EN AW 6060 a jeho použití:

Jedná se o slitinu hliníku s dobrou tvárností, lešitelností a odolností proti korozi, dobrou schopností elektrolytické oxidace, vhodný ke svařování. Plastické vlastnosti v žíhaném stavu jsou dobré, ve vytvrzeném stavu vyhovující. Tvařitelnost za teplot 450 - 500°C velmi dobrá. Korozní odolnost je velmi dobrá, neprojevuje se sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Obrobitelnost řeznými nástroji je nevyhovující v žíhaném stavu a vyhovující ve vytvrzeném stavu. [22]

Použití materiálu EN AW 6060: součásti se střední pevností dlouhodobě pracující při teplotách 50 až -70°C, u nichž se požaduje dobrá technologičnost, korozní odolnost a dekorativní vzhled. Použití na letadla, vozidla, ve stavebnictví, potravinářství, pro jemnou mechaniku, atd.

Tabulka 3.1-01: Chemické složení materiálu EN AW 6060 [22]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	ostatní	Al zbytek
min	0.30	0.05			0.40			0.05		
max	0.70	0.40	0.10	0.10	0.90	0.10	0.20	0.20	0.15	

Poznámka: hodnoty v tabulce jsou uvedeny v hm. %

Tabulka 3.1-02: Mechanické vlastnosti materiálu EN AW 6060 pro lisované trubky [22]

Stav materiálu	Tloušťka stěny t [mm]	R _m [MPa]		R _{p0,2} min. [MPa]	Tažnost A min. [%]	Tažnost A _{50mm} min. [%]	Tvrdost Typická hodnota HBW
		min.	max.				
T4	< 15	120	-	60	16	14	50
T5		160	-	120	8	6	60
T6		190	-	150	8	6	70
T66		215	-	160	8	6	75

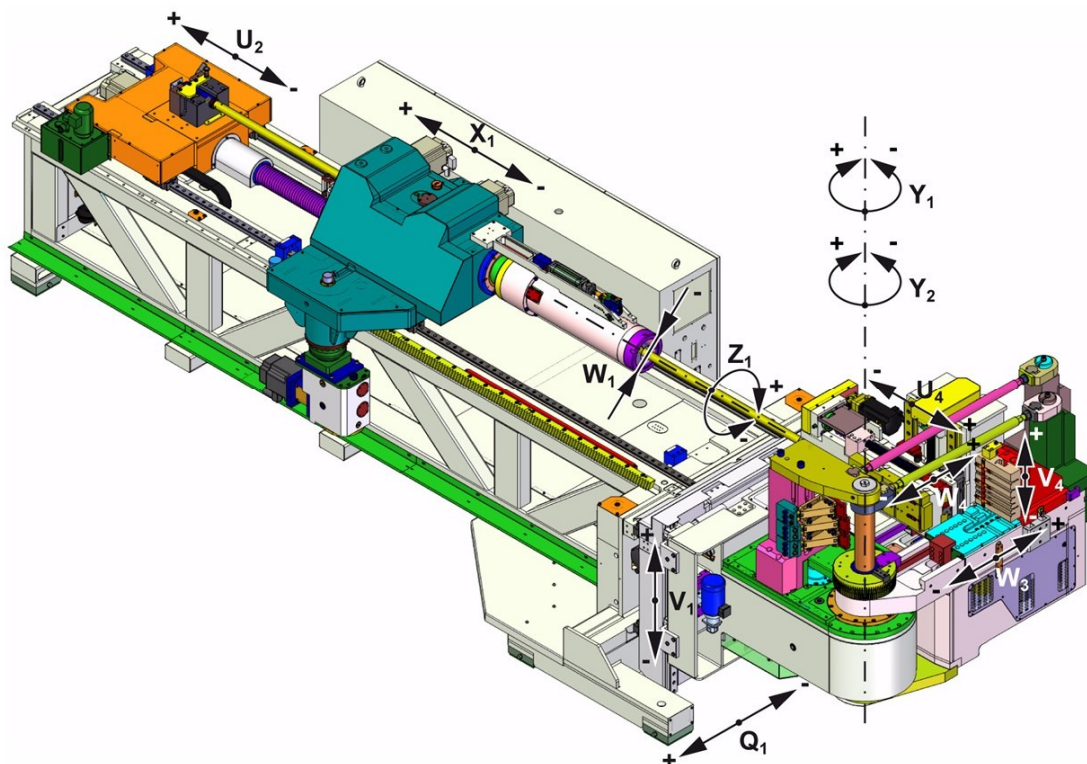
Tabulka 3.1-03: Pro dodávané polotovary se slitiny hliníku platí tyto související normy: [23]

EN 573-1 až 3	Chemické složení
EN 755-1	Technické dodací předpisy
EN 755-3 až 9	Mezní úchytky rozměrů a tvarů
EN 515	Hliník a slitiny hliníku – výrobky tvářené- označování stavů
EN 602	Chemické složení polotovarů určených k výrobě předmětů pro styk s potravinami
ČSN 42 4400, 24401	Slitiny hliníku AlMgSi

3.2 Popis stroje na ohýbání

Konfigurace stroje

Stroj ELECT150 (obrázek 3.2-01) byl navržen na ohýbání trubek, drátů a profilů kruhového, čtvercového či obdélníkového a také oválného průřezu. Je řízen jednotkou “Siemens SIMOTION” CNC prostřednictvím 12 pracovních os. Rozhraní obsluhy tvoří pult Simatic panel Pc 577B (s barevnou zobrazovací jednotkou a dotykovou obrazovkou, rozhraní s vestavěnou klávesnicí) a ovládací panel stroje MCP483. Stroj může nabídnout automatický nakládací systém (robot nebo nakladač) nebo jej lze nakládat a vykládat ručně. Stroj ELECT150 umožňuje předčasné vyjmutí trnu. Trn je mazán automaticky minerálním olejem. Přítomnost trubky je automaticky kontrolována lištou lokátoru. Kluzné systémy a šrouby s oběhem kuliček jsou mazány automaticky centralizovaným systémem mazání. Stroj je vhodný pro montáž do flexibilního výrobního systému v plné shodě s platnými předpisy úrazové prevence. Pracovní osy stroje jsou uvedeny na obrázku 3.2-01. [21]



Obrázek 3.2-01: Pracovní osy stroje ELECT150 [21]

Popis pracovních os stroje (viz obrázek 3.2-01):

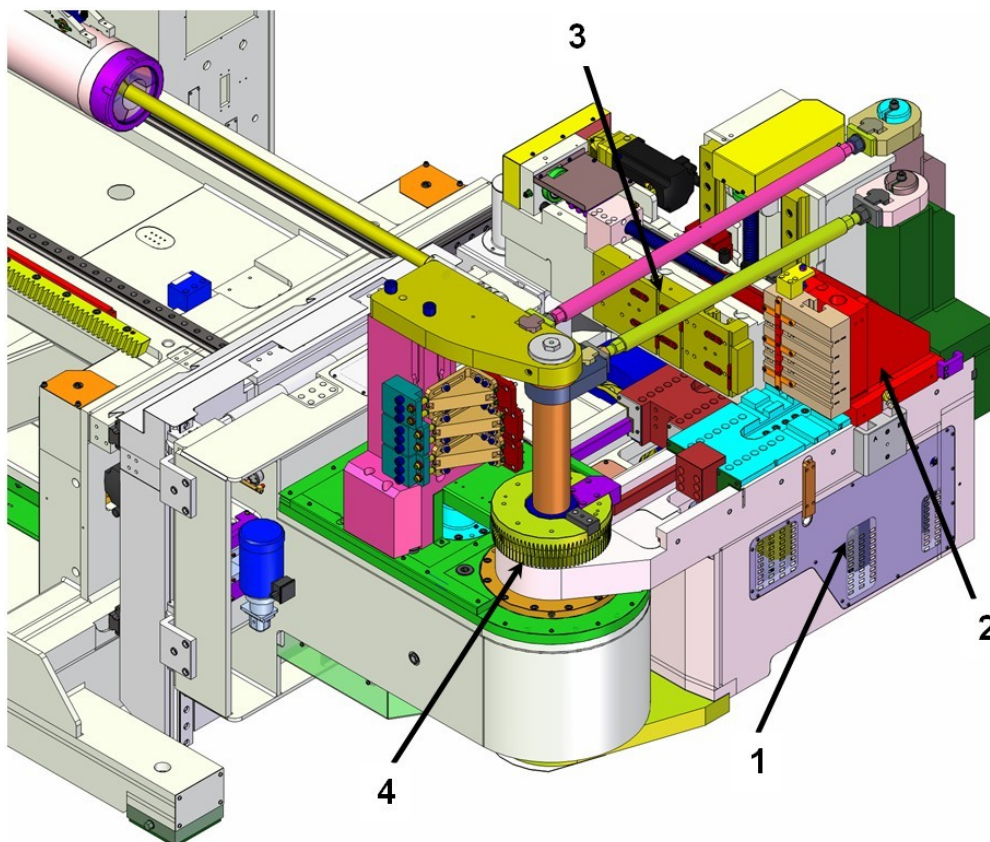
Osa X1	Posuvník vysunutí trubky
Osa Y1	Ohýbací rameno trubky
Osa Z1	Rovina otáčení trubky
Osa V1	Vertikální posun pro změnu průměrného poloměru
Osa Q	Horizontální posun hlavy pro změnu průměrného poloměru
Osa U2	Vytažení trnu
Osa W1	Zavření kleštiny
Osa W3	Upnutí trubky
Osa W4	Přítlačná čelist
Osa U4	Vodorovný posun pohyblivé přítlačné čelisti
Osa Y2	Návrat matrice
Osa V4	Vertikální pohyb přítlačné čelisti
	Podpěra trubky
	Doraz trubky

3.2.1 Ohýbací hlava (osy Q₁ / V₁ - viz obrázek 3.2-01)

Zařízení je uloženo na posuvníku. Příčný pohyb (osa Q₁) ovládá bezkartáčový motor se šroubem s kuličkovým uložením a hnacím řemenem. Vertikální pohyb zařízení (osa V₁) je realizován bezkartáčovým motorem s úhlovým reduktorem. Pohyb přenáší šroub s kuličkovým uložením. Reduktor i šroub je namontován přímo na vozíku příčného pohybu. [21]

Toto zařízení obsahuje všechny prostředky pro ohýbání trubek. Konkrétně:

- ohýbací rameno (1, obrázek 3.2-02) je pohyblivá součást, která určuje ohýbací pohyb a na níž je namontováno upínací zařízení;
- skluz svěráku (2, obrázek 3.2-02) pro přidržení trubky v matrici před ovinutím a začátkem ohýbání;
- opěrný skluz (3, obrázek 3.2-02), který spočívá na trubce a působí proti ohybové síle.
- návrat matrice (4, obrázek 3.2-02), který zadrží ohnutou trubku v matrici, až se rameno vrátí na konec ohýbací polohy.



Obrázek 3.2-02: Sestava ohýbací hlavy

Na hlavu lze nainstalovat až tři standardní matrice k provedení mnohočetných ohybů v automatickém cyklu. V některých případech lze využít celý dostupný prostor a použít další speciální nástroje až do max. počtu 8 ks. [21]

3.2.2 Sestava ohýbací hlavy (Osa Y₁ - viz obrázek 3.2-01)

Zařízením otáčí bezkartáčový motor s reduktorem. Ozubená kola na dolní úrovni se mažou v olejové lázni umístěné přímo v hlavě, zatímco další ozubená kola se mažou postřikem pomocí mazacího čerpadla, které čerpá olej z dolní části nádrže. [21]

3.2.3 Zařízení pro upnutí trubky (osa W₃ - viz obrázek 3.2-01)

Upínací pohyb (osa W₃) je dosažen kluznými segmenty (pro maximální tuhost) pomocí bezkartáčového motoru s reduktorem; pohyb se přenáší ozubeným převodem a vnitřními závity/šroubem s kuličkovým uložením. Sestava sevře trubku oproti rovné části matrice před zavínutím do hrdla matrice. [21]

3.2.4 Jednotka opěrného skluzu (osa W₄ - viz obrázek 3.2-01)

Jednotka umístí skluz proti trubce a působí proti vynaloženému ohýbacímu momentu. Pohyb (osa W₄) je dosažen kluznými segmenty a bezkartáčovým motorem; pohyb se přenáší ozubeným převodem a šroubem/závity kuličkového uložení (jako u upínací jednotky). Zařízení je opatřeno výztužnými příčkami. [21]

3.2.5 Sestava návratu matrice (Osa Y₂ - viz obrázek 3.2-01)

Její funkce je:

- vrátit matici na začátek ohýbacích podmínek;
- umístit matici do neutrální polohy, aby volně sledovala rychlost ohýbacího ramena;
- udržet matici v aretované poloze při návratu ramena po ohýbání a uvolnit ohnutou trubku z ramena;
- pootočit matici směrem „+“ pro usnadnění vyjmutí trubky z nástroje po ohnutí.

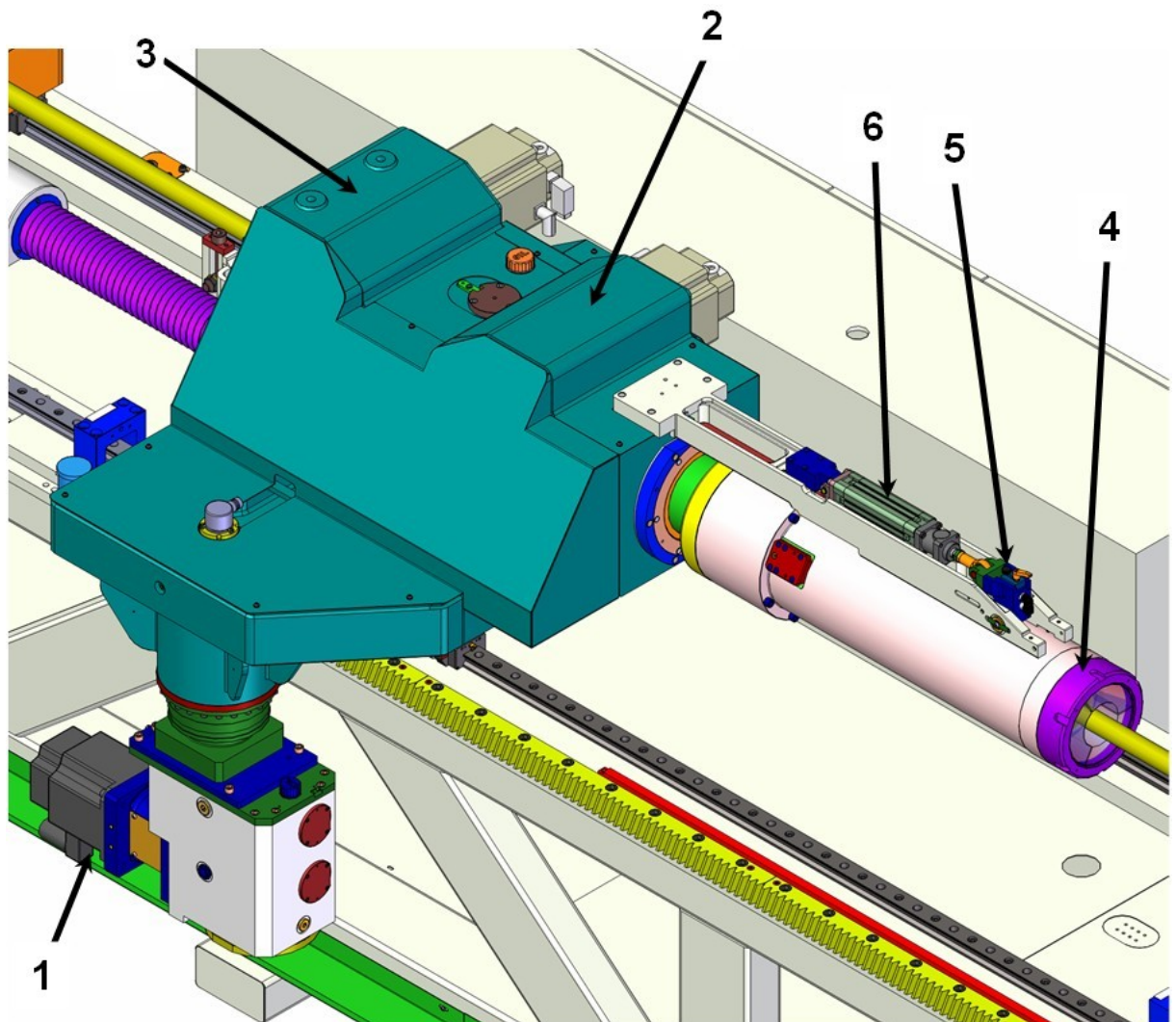
Matrice je poháněna třemi pohony s ozubenými koly pomocí převodového motoru a řetězového převodu umístěného v dolní části hlavy.

3.2.6 Soustava posuvníku (osy X₁/Z₁/W₁ - viz obrázek 3.2-01)

Soustava posuvníku obsahuje převodové motory osy X₁ (1, obrázek 3.2-03), převodový motor (2, obrázek 3.2-03) pro otáčecí osu Z₁, převodový motor (3, obrázek 3.2-03) pro zavření osy kleštiny W₁.

Osa X₁ posunuje trubku. Pohyb je zajištěn pastorkem se šroubovým ozubením (pro velmi tichý provoz) sledovaný bezkartáčovým motorem s planetovým redukčním soukolím, které je v záběru s ozubnicí připevněnou ke stojanu stroje. Pohyb ovládá převodník. Posuvník X klouže na držácích s válečkovým uložením. Posílení posuvníku zajišťuje příslušenství posilovače.

Osa Z₁ otáčí rovinu trubky prostřednictvím bezkartáčového motoru se šnekem a šikmým ozubením v olejové lázni řízeného převodníkem.



Obrázek 3.2-03: Soustava posuvníku (osy X₁ / Z₁ / W₁)

3.2.7 Jednotka kleštiny a lišty lokátoru (osa W₁ - viz obrázek 3.2-01)

Soustava kleštiny (4, obrázek 3.2-03) namontovaná na ose Z₁ umožňuje sevřít trubku tak, aby ji mohly posunovat osy X₁ a Z₁.

Osa W₁ uzavře kleštinu na trubce. Pohyb je realizován převodovým motorem ovládaným převodníkem a otevírací/zavírací pohyb je zajištěn šnekem/kolem se šikmými zuby a lichoběžníkovou šroubovicí v olejové lázni.

Osa Z₁ uchovává doraz trubky (5, obrázek 3.2-03) ovládaný pneumatickým válcem (6, obrázek 3-03), který lokalizuje trubku během vkládání a aktivuje kleštinu před začátkem ohýbacího cyklu.

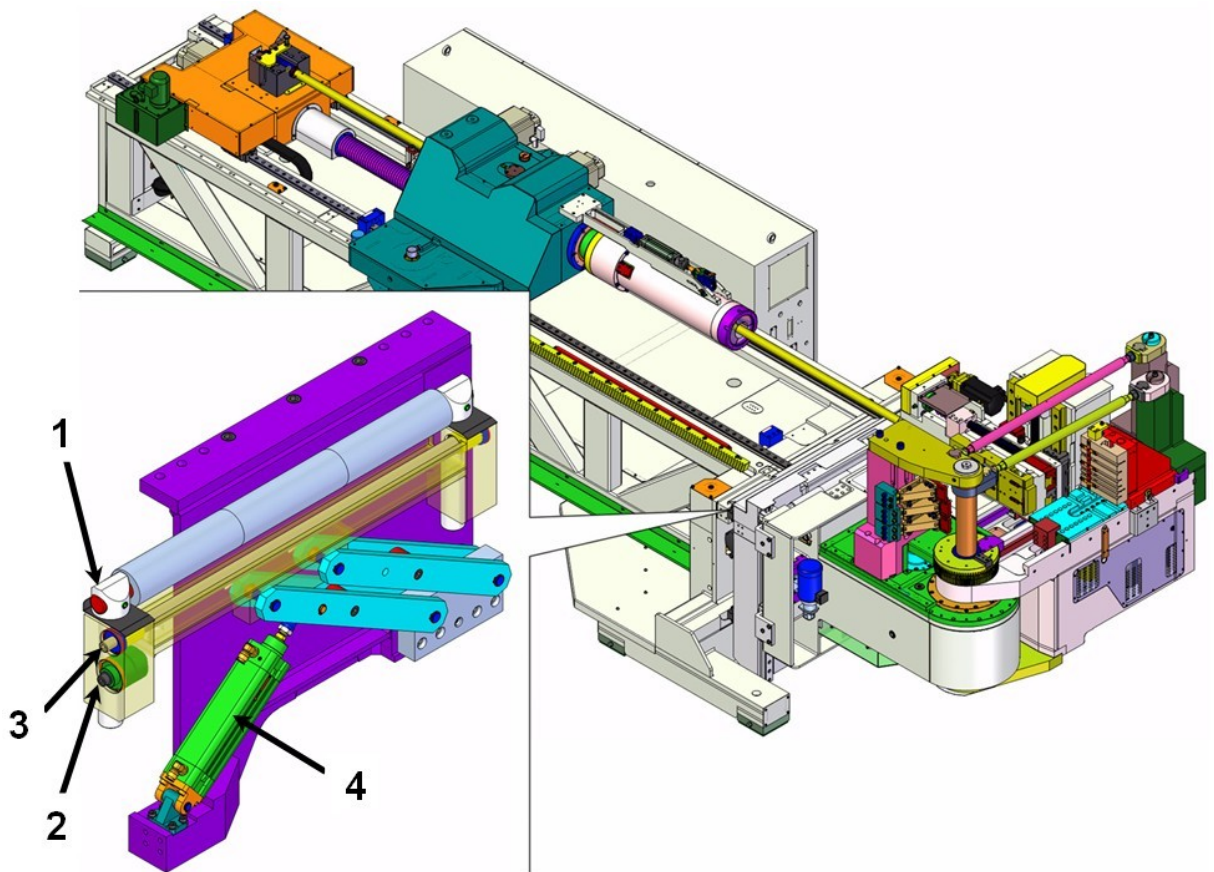
3.2.8 Jednotka vytahovače (osa U₂ - viz obrázek 3.2-01)

Jednotka vytahovače obsahuje posuvník, který se pohybuje na kluzných segmentech uložených na válečcích za posuvníkem osy X. Osa U₂ je poháněna bezkartáčovým motorem s planetovým soukolím pomocí šroubu s kuličkovým uložením. Rychlou spojovací jednotku s táhlem lze rozmontovat a přemístit tak, aby bylo možné zpracovávat trubky delší než je standardní délka bez trnu. [21]

3.2.9 Sestava podpěry trubky a táhla

Sestava podpěry trubky a řídicí tyče (1, obrázek 3.2-04) pro usnadnění zavedení trubky do svěráku a zamezení nadměrného ohybu přesahující trubky; toto zařízení lze použít k podepření samotné řídicí tyče během zkoušek nanečisto.

Podpěrné zařízení (1, obrázek 3.2-04) řízené pneumatickými válci (4, obrázek 3.2-04) se zdvihne tak, aby podepřelo trubku (nebo řídicí tyč); páka se automaticky vrátí do nízké polohy, jakmile vysunovací posuvník bude v přední poloze, aby nedošlo k nárazu páky do kleštiny. Toto zařízení se seřizuje manuálně. [21]



Obrázek 3.2-04. Sestava podpěry trubky a táhla

3.2.10 Elektrická soustava

Elektrický systém stroje lze rozdělit na tři samostatné části:

- elektrická skříň;
- ovládací panel s tlačítky a obrazové rozhraní;
- elektrická instalace na stroji.

Elektrická skříň je rozdělena na dvě části:

- První část obsahuje elektroniku, a to: CNC, napájecí moduly pro ovládání motoru a nastavení; napájecí zdroj 600 V DC a odrušovací filtr.
- Druhá část obsahuje zařízení elektrického rozvodu, a to: hlavní vypínač; pojistky a třífázové vypínače zemní ochrany; řídicí relé a dálkové spínače; časovač odjištění stroje; ovládací panely nouzového vedení; měřidlo; síťový transformátor 220 V a různé svorkovnice; desku vstupů/výstupů a napájecí zdroj 24 Vdc.

Ovládací panel CNC je umístěný na pultu před oddělenou zónou a obsahuje všechny optické indikátory a ovládací prvky. Panel s různými ovládacími prvky je také před vymezenou zónou. Elektroinstalace na stroji obsahuje: hnací motory; koncové spínače detekce a indikátorů a snímače hladiny kapalin. [21]

3.2.11 Mazání trnu

Sestava trnu je promazávána automaticky jednotkou řízenou CNC. Elektrické impulsy aktivují tok maziva. Množství výstupního maziva se nastavuje příslušným kohoutkem. Typ použitého maziva v zařízeních s minerálním olejem závisí na druhu zpracovávaných trubek.

3.2.12 Mazání součástí stroje

Součásti stroje, které je nutno promazávat:

- lineární kluzné dráhy a šrouby kuličkového uložení jsou mazány pomocí centrálního systému mazání.
- celý oběh s válečkovým uložení, kde se požaduje manuální mazání tukem (každých 200 hodin), jak je uvedeno na kartách údržby.
- bronzové ložisko příčky se maže tukem ručně (připojením přípravku ke speciální maznici)
- soukolí a řetěz návratu matrice, kde se požaduje manuální mazání tukem (sprejem nebo štětcem), jak je uvedeno na kartách údržby
- dvě jednotky (plus jedna volitelná) vyžadují pravidelné doplňování oleje;
- ozubená dráha osy X₁, převod osy W₃ a převod osy W₄, které jsou mazány pomocí zásobníku maziva.

3.3 Popis procesu ohýbání trubky na stroji ELECT150

Stroj ELECT150 je připraven pro manuální nakládání nebo alternativně na použití automatického nakládacího a vykládacího systému (robotů nebo nakladačů). Seřízení se provádí předběžně podle trubky, která se má ohýbat (např. sestava kleštiny, trnu, matric a bloků vhodných pro požadovaný ohýbací cyklus). Kleština se umísťuje v místě, které je nejbližší ohýbací hlavy. Tuto polohu lze naprogramovat podle mechanických rozměrů stroje a nástrojů. Trubku naloží operátor nebo automatický systém (na přední stranu stroje), poté se vloží do svěráku, přičemž zastavovací zařízení ovládané pneumatickým válcem poklesne za účelem detekce upnutí trubky ve svěráku.

Koncový spínač detekuje přítomnost dílu, vyšle signál pro zavření svěráku a upnutí samotné trubky (osa W_1 - viz obr. 3.2-01). V tomto okamžiku se zastavovací zařízení přemístí nahoru a umožní otáčení osy Z během dalších kroků cyklu (v klidové poloze je zastavovací zařízení uloženo ve svěráku, jakmile detekuje naložení trubky strojem). Operátor v tomto okamžiku stiskne tlačítko START pro spuštění automatického cyklu. Osy $X_1 - Z_1$ soustavy vozíku se stahují podél osy X_1 a táhnou trubku do stroje podle indikací pracovního programu pro obnovení původního spuštění podmínek ohýbacího cyklu. Upínací zařízení přitiskne trubku s matricí tak, aby ji bylo možno během ohýbacího procesu táhnout. Ohýbací rameno se otáčí kolem osy matrice a navíjí trubku kolem samotné matrice a vytváří požadovaný ohyb.

Při ohýbacím cyklu se trubka porovnává se zařízením nainstalovaném na opěrném skluzu, které doprovází trubku během jejího ohýbání. Trn v trubce zamezuje při ohýbání tvoření rýh, deformací nebo ovalizaci. Je promazáván centralizovaným systémem minerálním olejem, rostlinným olejem, tukem podle namontovaného volitelného zařízení. Změna ohýbání se provádí ve dvou krocích - pohybem sestavy hlavy vertikálně a pohybem hlavy ke středu hrdla matrice na střed trubky. Na konci ohýbacího cyklu se stroj automaticky zastaví. Kleštiny a přítlačná čelist se otevřou a stroj trubku vyloží. [21]

4 Návrh optimalizace procesu

Praktická část této práce je zaměřena na optimalizaci tvářecího procesu ohýbání u vybraného dílu. To znamená, optimalizovat proces ohýbání tak, aby byly náklady co nejnižší a čas na výrobu co nejkratší. Zároveň musí být zaručena požadovaná kvalita výrobku. Je snahou minimalizovat počet vyrobených neshodných kusů a zajistit, aby proces ohýbání u každého ohybu měl stejný průběh bez komplikací. V tomto případě jde nejen o zhotovení přesného ohybu s předepsanou geometrií, ale také je kladen důraz na kvalitu povrchu součásti. Po finální úpravě balotínování musí mít výrobek dokonalý povrch bez známky otlaků a poškrábaní, jelikož se jedná o pohledový díl.

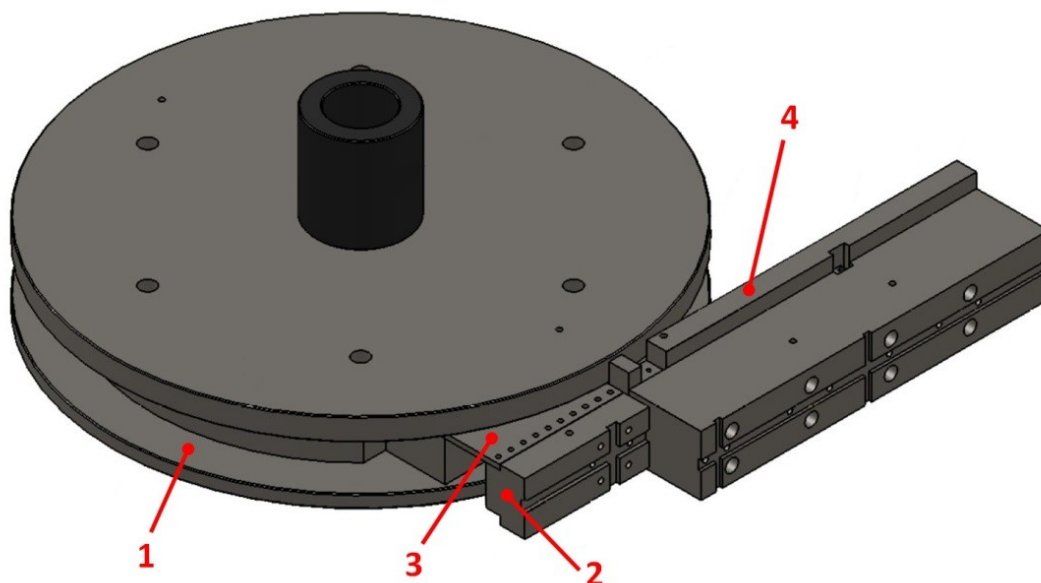
4.1 Příprava nástroje a ohýbání prvních zkušebních vzorků

Nejdříve bylo odmontováno nářadí z předchozí operace. Dále bylo potřeba namontovat nářadí na stroj dle výkresu sestavy, který je přiložen v příloze. Příprava nářadí a procesu ohýbání byla provedena v mé přítomnosti a za pomoci pracovníka z firmy R.D.I. s.r.o. (prodejce stroje ELECT150), pracovníka z firmy OMNI - X CZ, s.r.o. (výrobce nářadí), dále technologa a pracovníka obsluhy stroje z firmy AGROSTROJ Pelhřimov, a.s.. Po správném usazení ohýbacího segmentu následovala montáž dalších částí nástroje jako přítlak, přítlačná lišta atd. Dále bylo provedeno očištění všech částí nástroje smetáčkem a čistým hadrem.

Pro lepší představu a orientaci v textu jsou na následujícím obrázku sestavy nástroje označeny základní části (viz obr. 4.1-01).

Legenda k obrázku 4.1-01:

- 1) Ohýbací segment
- 2) Přítlak
- 3) Závěr přítlaku
- 4) Přítlačná lišta

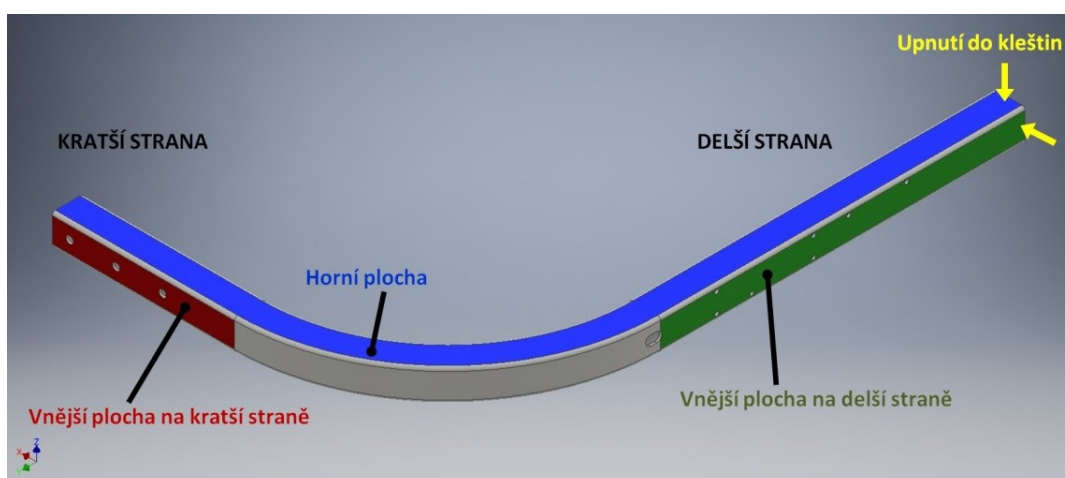


Obrázek 4.1-01: Sestava použitého nástroje na ohýbání

Následujícím krokem byla provedena úprava softwaru stroje. Po úpravě softwaru byl uříznut malý kus polotovaru o délce $l \approx 400$ mm, který byl vložen do kleštin za účelem automatického naladění přidržovací síly kleštin.

V tento moment byl stroj s nástrojem připraven na ohnutí prvních zkušebních vzorků. Mazání nástroje bylo provedeno pro první zkušební vzorky ručním nanesením syntetické tvářecí kapaliny. Tato syntetická tvářecí kapalina byla dodána od firmy BBL a její označení je BBL ALC. Poté následovalo ohnutí prvních zkušebních ohybů.

Pro lepší orientaci jsou v této práci označeny strany součásti (kratší, delší) a plochy součásti (horní, vnější, dolní, vnitřní) - viz následující obrázek 4.1-02.



Obrázek 4.1-02: Označení jednotlivých částí výrobku

4.2 Identifikace vad a jejich označení

První zkušební vzorky byly kontrolovány pomocí šablony a také byly vizuálně kontrolovány povrchové vady.

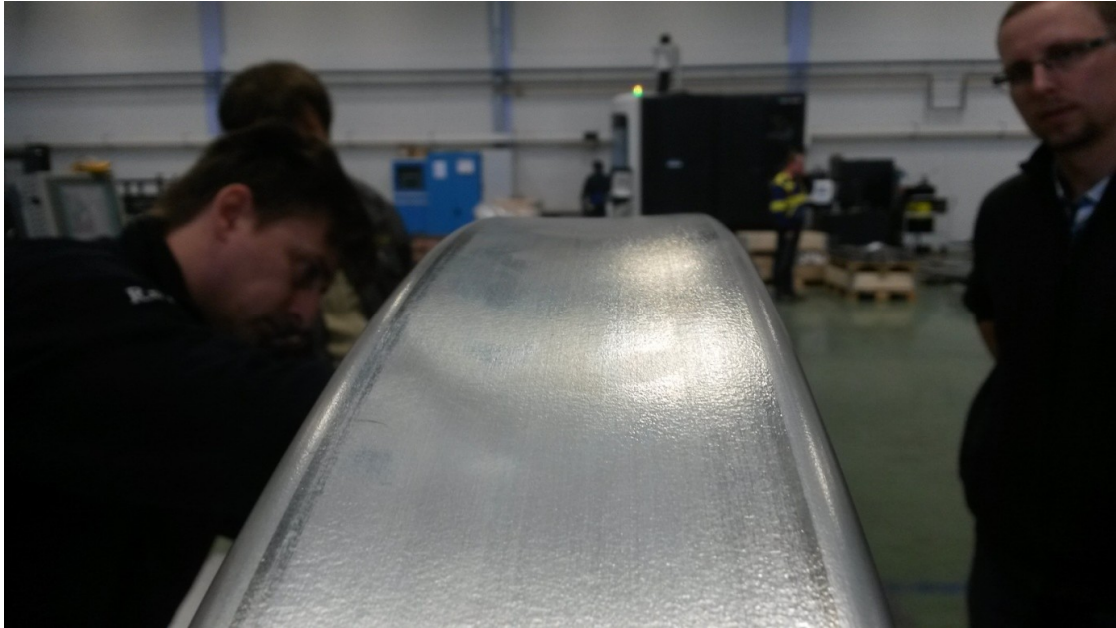
4.2.1 Určení geometrických vad zkušebních vzorků a ověření vhodnosti maziva

Po zhotovení prvního zkušebního ohybu byl zkušební vzorek přiložen ke kontrolní šabloně. Při kontrole pomocí šablony byly zjištěny geometrické vady. Úhel ohybu byl větší než požadovaných 90°. Dále bylo zjištěno, že byla špatně nastavená délka za ohybem (délka kratší strany byla o 15mm kratší). Kratší strana zkušebního vzorku přiložená k šabloně je znázorněna na obrázku 4.2-01.



Obrázek 4.2-01: Fotografie kontroly součásti podle šablony

Také bylo pozorováno malé propadnutí plochy na vnější straně ohybu, které bylo dle požadavků zákazníka ještě přijatelné (znázorněno na Obr. 4.2-02). Toto propadnutí nebylo vzhledem ke své zanedbatelnosti označeno jako vada.



Obrázek 4.2-02: Fotografie propadnutí plochy na vnější ploše součásti

Před zhotovením druhého zkušební vzorku byly provedeny změny v softwaru stroje. Po změnách v softwaru stroje byl zhotoven druhý zkušební ohyb.

Po přiložení druhého zkušební vzorku ke kontrolní šabloně bylo zjištěno, že úhel ohybu byl oproti prvnímu pokusu naopak moc ostrý a jeho úhel byl menší než požadovaných 90° . Délka za ohybem byla podle šablony stále krátká (kratší o 5 mm). Opět byly provedeny úpravy v softwaru stroje.

Po opětovné úpravě softwaru byl zhotoven třetí zkušební ohyb. Při kontrole třetího zkušební vzorku dle šablony bylo zjištěno, že tento vzorek svou geometrií vyhovuje požadavkům. Úhel ohybu byl přesně 90° a délka kratší strany byla o 4 mm delší. Tato délka může být zkrácena na požadovanou délku a geometrie vzorku bude zcela vyhovující dle požadavků zákazníka.

Při vyjímání všech třech zkušebních vzorků však nastaly komplikace s vysunutím ohnuté čtvercové trubky z trnu, které spočívaly v lepení základního materiálu na hrany trnu. Tyto problémy byly spojeny s použitým mazivem, které bylo po zhotovení prvních třech vzorků a vizuální kontrole trnu označeno jako nevyhovující.

Na následujícím obrázku (Obr. 4.2-03) je dobře vidět, jak se slitina hliníku "přilepuje" na hrany trnu a tvoří tak nárůstek, který komplikoval vyjmutí výrobku z nástroje.



Obrázek 4.2-03: Fotografie trnu po zhotovení prvních třech zkušebních ohybů

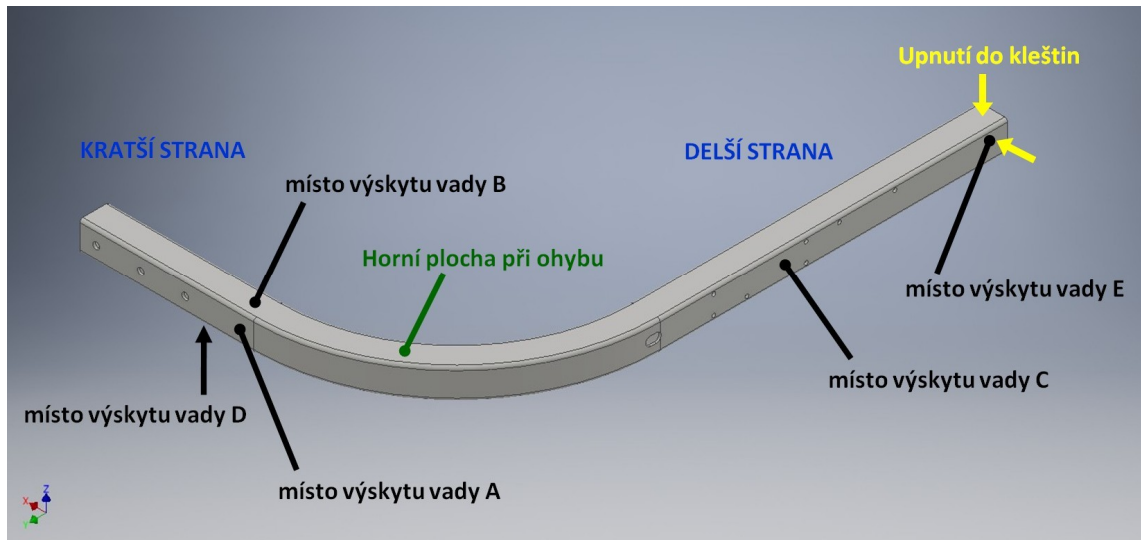
Vzhledem k výše uvedeným komplikacím bylo změněno mazivo ze syntetické tvářecí kapaliny BBL ALC na plastické mazivo MOGUL 3 s obsahem chemicky čistého grafitu. Pro ověření použitelnosti maziva MOGUL G3 a správnosti nastavení stroje pro zhotovení vyhovujícího ohybu, byl zhotoven ještě čtvrtý zkušební vzorek.

Před vložením polotovaru na čtvrtý zkušební ohyb byl trn znovu ručně očištěn, aby byly odstraněny zbytky přilepeného základního materiálu. Čtvrtý zkušební vzorek měl dle kontroly pomocí šablony vyhovující geometrii. Také použité mazivo MOGUL G3 se osvědčilo, jelikož se výrobek odebíral z nástroje velice hladce a bez komplikací. Proto bylo stávající nastavení stroje a použité mazivo označeno za vhodné vzhledem k dodržení předepsané geometrie. Žádný ze zkušebních vzorků však nevyhověl z hlediska povrchových vad. Zkušební vzorky vykazovaly závažné povrchové vady související se vznikem otlaků, kterými se bude zabývat následující text.

4.2.2 Identifikace povrchových vad a jejich označení

Po zhotovení prvních zkušebních ohybů bylo patrné, že na vzorcích vznikly povrchové vady převážně v podobě otlaků. Na všech zkušebních vzorcích byly vady pozorovatelné na stejných místech. Tyto vady byly způsobené s velkou pravděpodobností použitým nástrojem. Na kratší straně vzorku byly povrchové vady způsobeny přitlakem a závěrem přitlaku. Na delší straně vzorku byly vady způsobeny

přítlačnou lištou. Podle místa výskytu jsem tyto povrchové vady označil jako vada A až vada E. To je znázorněno na následujícím obrázku 4.2-04.



Obrázek 4.2-04: Označení povrchových vad vzhledem k místu výskytu

a) Označení vady A:

Jako vada A byl označen otlak na vnější ploše kratší strany (viz Obr. 4.2-04). Tato vada byla pravděpodobně způsobena tlakem a tvarem přítlaču. Vzhled této vady je vyznačen v červených oválech na následujícím obrázku 4.2-05.

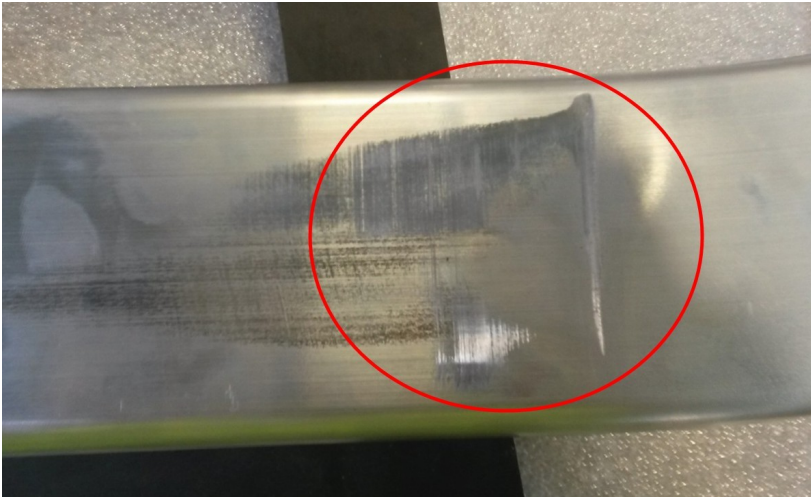


Obrázek 4.2-05: Vada A - otlak na vnější ploše kratší části

Povrchová vada způsobená od přítlaču, byla poměrně hluboká a vzhledem k požadavkům zákazníka byla v této podobě nepřijatelná. Proto musel být navrhnut postup pro odstranění příčin vzniku této vady.

b) Označení vady B:

Jako vada B byla označena povrchová vada na horní ploše kratší strany vzorku, ta byla pravděpodobně způsobena od závěru přitlaku. Tato vada je zobrazena na obrázku 4.2-06 a je vyznačena červeným oválem.



Obrázek 4.2-06: Vada B - otlak na horní ploše kratší části

Zmiňovaná povrchová vada byla vzhledem k požadavkům zákazníka příliš hluboká a muselo být rozhodnuto o odstranění příčin vzniku této vady.

c) Označení vady C:

Jako vada C byl označen otlak na vnější ploše delší strany. Tato vada byla pravděpodobně způsobena tlakem a tvarem přitlačné lišty. Vzhled této povrchové vady je vyznačen na následujícím obrázku 4.2-07.



Obrázek 4.2-07: Vada C - otlak na vnější ploše delší části

Vzhledem k hloubce této vady bylo zapotřebí navrhnout opatření pro odstranění nebo minimalizování příčin této vady, neboť i po finální úpravě balotínování by mohla být stále zřetelná.

d) Označení vady D:

Jako vada D byla označena povrchová vada na spodní ploše kratší strany vzorku. Tato vada se vyskytovala na protější ploše než vada B. Vzhled této vady je vyznačen na následujícím obrázku 4.2-08.



Obrázek 4.2-08: Vada D - vada na spodní ploše kratší části vzorku

Po bližším prozkoumání byla jako příčina této vady označena poškozená hrana na spodní části ohýbacího segmentu.

e) Označení vady E:

Jako vada E byla označena povrchová vada na konci delší strany. Tato vada byla způsobena uchycením v kleštinách nástroje. Vzhled této vady je zobrazen na následujícím obrázku 4.2-09.



Obrázek 4.2-09: Vada E - otlak způsobený kleštinami

Tato vada nebyla tak závažná jako předchozí (vada A až vada D) a po pohmatu nebyla patrná, proto byla označena jako přípustná. Nastavení tlaku kleštin je vyhovující a není nutno ho dále upravovat. Vada E nebude již dále v této práci řešena.

4.3 Návrhy pro odstranění příčin vzniku povrchových vad

Vzhledem k závažnosti některých povrchových vad musela být navrhována opatření, k odstranění nebo alespoň minimalizování příčin vzniku těchto povrchových vad.

4.3.1 Návrh pro odstranění příčin vzniku povrchové vady A

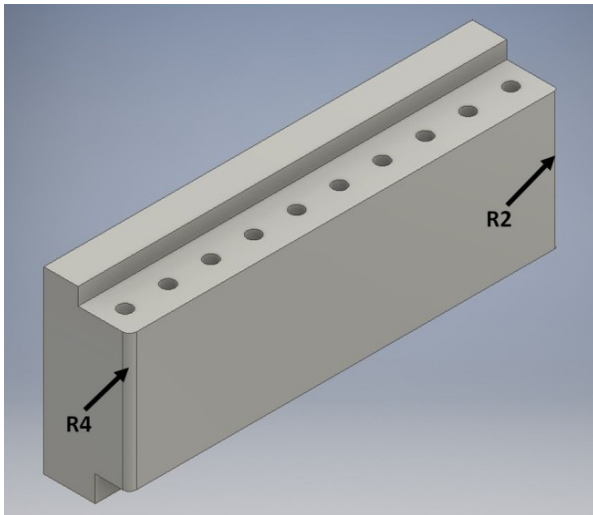
Pro odstranění příčin vzniku vady A byly navrženy dvě varianty, které by měly minimalizovat závažnost této povrchové vady.

1. varianta pro odstranění příčin vzniku vady A

První variantou pro odstranění příčin vzniku vady A byla úprava přitlačné síly přitlaku. Po úpravě přitlačné síly a následném ohnutí zkušebního vzorku byly zjištěny závažné geometrické vady, proto nebylo možné tímto způsobem odstranit příčiny vzniku tohoto otlaku.

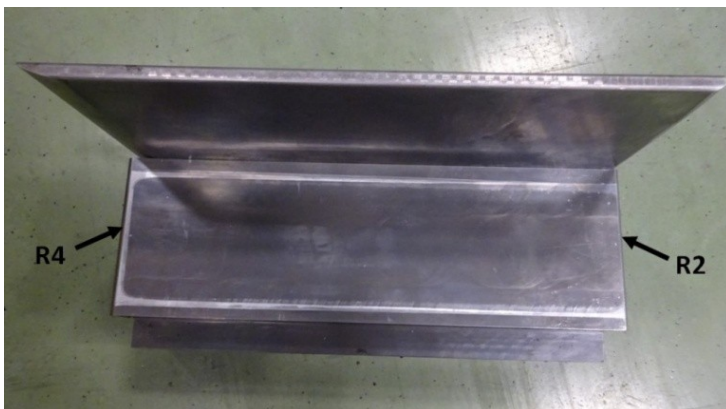
2. varianta pro odstranění příčin vzniku vady A

Dalším řešením pro odstranění příčin vzniku vady A bylo upravit nástroj. Navržené úpravy na přítlaku jsou znázorněny na obrázku 4.3-01. Svislá hrana na přítlaku, která je blíže ohybu by měla být upravena zbroušením na R4. Také protější hrana, která je dále od ohybu by měla být zabroušena na R2.



Obrázek 4.3-01: Navržené úpravy na přítlaku

Úprava přítlaku byla provedena dle navržených úprav. Nástroj po úpravě hran je zobrazen na následujícím obrázku 4.3-02.



Obrázek 4.3-02: Fotografie upraveného přítlaku

4.3.2 Návrh pro odstranění příčin vzniku povrchové vady B

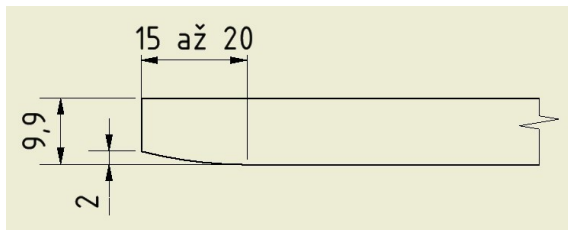
Pro odstranění příčin vzniku vady B byly navrženy dvě varianty, které by měly minimalizovat závažnost této povrchové vady.

1. varianta pro odstranění příčin vzniku vady B

Touto variantou na odstranění příčin vzniku vady B bylo odmontování závěru přitlaku. Po zhotovení zkušebního ohybu bez závěru přitlaku bylo pozorováno velké vyboulení na horní ploše vzorku, které bylo způsobeno odstraněním závěru. Toto vyboulení bylo z hlediska požadavků zákazníka nepřijatelné. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že závěr přitlaku je pro zhotovení vyhovujícího dílu za těchto podmínek nezbytný, a proto se opět nainstaloval na nástroj.

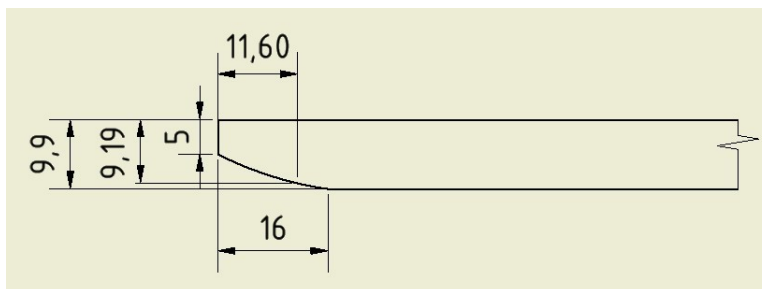
2. varianta pro odstranění příčin vzniku vady B

Další variantou byla úprava závěru přitlaku. Úprava závěru přitlaku byla navržena broušením, jak je znázorněno na obrázku 4.3-03.



Obrázek 4.3-03: Navržené úpravy na závěru přitlaku

Úpravy závěru přitlaku nebyly provedeny přesně podle návrhu, nýbrž byly provedeny tak, jak je znázorněno na následujícím obrázku 4.3-04. Navíc místo broušením byla úprava provedena obráběním, bez další úpravy povrchu nástroje.



Obrázek 4.3-04: Provedené úpravy na závěru přitlaku

Závěr přítlaku po úpravě obráběním je zachycen na následujícím obrázku 4.3-05.



Obrázek 4.3-05: Závěr přítlaku po úpravě s nárůstkem

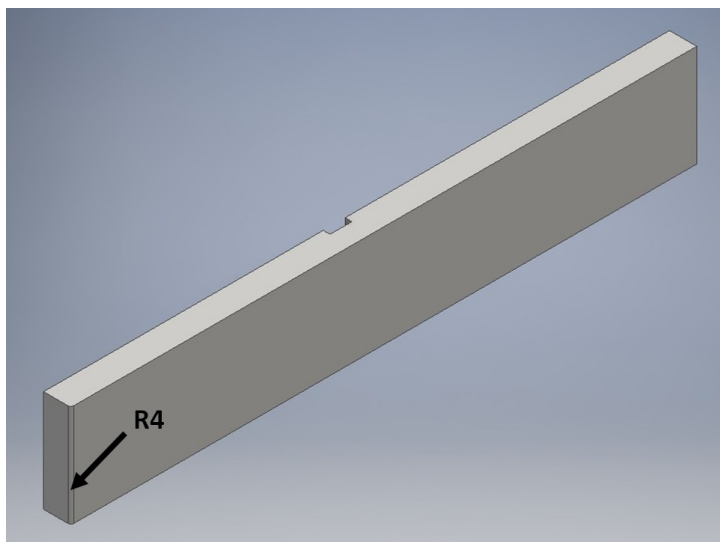
Tato provedená úprava závěru přítlaku není zcela ideální, jelikož na obrobené ploše jsou patrné stopy po obrábění. Navíc na nástroji vznikla přechodová hrana, která je pozorovatelná i na obrázku 4.3-05. Na této hraně vzniká při ohýbání nárůstek na nástroji, který mění geometrii nástroje a ovlivňuje podmínky tváření. Nárůstek má vliv na vznik povrchových vad na výrobku. Nárůstek ze slitiny hliníku je na obrázku 4.3-05 vyznačen v červeném oválu.

4.3.3 Návrh pro odstranění příčin vzniku povrchové vady C

Pro odstranění příčin vzniku vady C byla navržena pouze jedna varianta, která by měla minimalizovat závažnost této povrchové vady.

1. varianta pro odstranění příčin vzniku vady C

Jako nejjednodušší způsob pro odstranění příčin této vady se jevila úprava nástroje. Proto byla navržena úprava svislé hrany na přítlačné liště. Tato úprava byla navržena broušením na R4, jak je znázorněno na následujícím obrázku 4.3-06.



Obrázek 4.3-06: Navržené úpravy na přítlačné liště

Úprava hrany na přítlačné liště byla provedena broušením dle předchozího návrhu. Hrana na přítlačné liště po úpravě hrany broušením je zobrazena na následujícím obrázku 4.3-07.



Obrázek 4.3-07: Hrana přítlačné lišty po úpravě

4.3.4 Návrh pro odstranění příčin vzniku vady D

Vada D byla pravděpodobně zapříčiněna poškozením nástroje. Toto poškození bylo objeveno na spodní části ohýbacího segmentu (viz Obr. 4.2-08).



Obrázek 4.3-08: Poškozená hrana na spodní části ohýbacího segmentu

Poškozená hrana na spodní části ohýbacího segmentu byla s velkou pravděpodobností příčinou vzniku vady D. Toto poškození nástroje, bylo objeveno až po zhotovení prvních zkušebních vzorků, jelikož bylo patrné až při bližší vizuální kontrole nástroje.

1. varianta pro odstranění příčin vzniku vady D

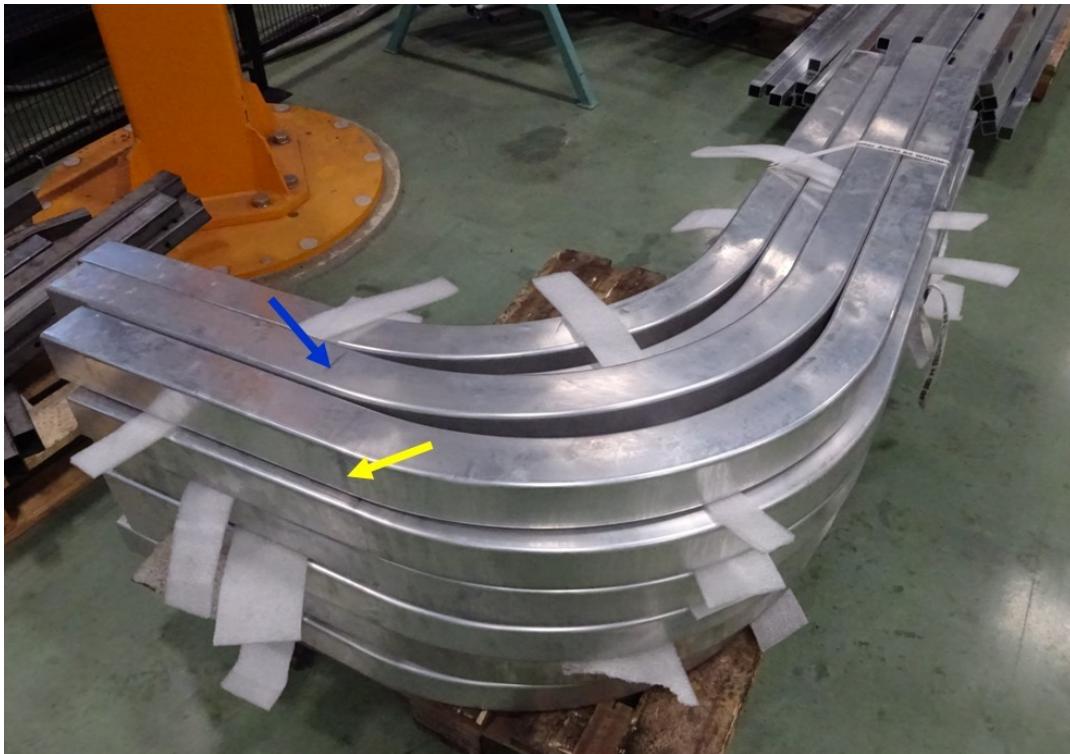
Bylo navrženo ruční zabroušení této hrany, aby byla opravena geometrie nástroje. Oprava poškozené hrany byla realizována ručním broušením již po zhotovení druhého zkušebního vzorku. Při vizuální kontrole třetího a čtvrtého zkušebního vzorku bylo zřetelné, že příčina povrchové vady D na spodní ploše byla zcela odstraněna. Takže zabroušení hrany ohýbacího segmentu pomohlo k odstranění příčin vzniku této vady. Proto se vadou D nebude již v dalším textu dále zabývat.

4.4 Zhotovení první sady výrobků a zhodnocení provedených úprav

Po provedených úpravách na nástrojích byly zhotoveny další kusy. Tyto kusy by už měly vyhovovat zadaným požadavkům a měly být připraveny na vyříznutí otvorů a následnou povrchovou úpravu balotínování.

Bylo provedeno dalších 60 ohybů, při ohýbání bylo použito mazivo MOGUL G 3 (plastické mazivo, které obsahuje jakostní chemicky čistý grafit). Při ohýbání dalších kusů bylo zjištěno, že na geometrii ohybu má značný vliv způsob mazání. Proto bylo 6 kusů vyřazeno jako nevyhovující z hlediska předepsané geometrie, což činí 10% neshodných kusů. Zbýlých 54 kusů po kontrole dle šablony vyhovovalo zadaným požadavkům z hlediska geometrie. Délka na kratší straně byla po ohybu zanechána záměrně asi o 5 mm delší, aby se pak dala přesně zakrátit na požadovanou délku.

Na všech 60 ohýbaných kusech byly stále pozorovatelné povrchové vady (otlaky od nástroje). Tyto povrchové vady byly po úpravě nástrojů méně závažné než na zkušebních vzorcích před úpravou nástrojů. Vada A (otlaky od přitlaku) je na obrázku 4.4-01 označena žlutou šipkou. Modrá šipka poukazuje na vadu B (viz Obr. 4.4-01).



Obrázek 4.4-01: První sada vyrobených kusů

4.4.1 Kontrola a zhodnocení povrchových vad po úpravě nástrojů

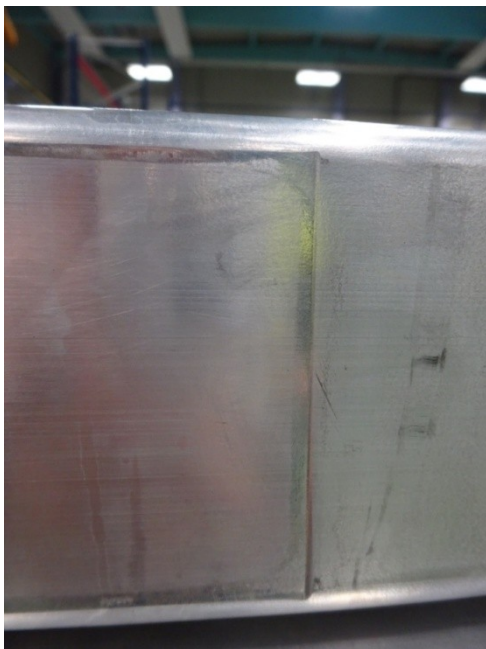
Po provedených úpravách na nástroji byla vizuálně zkontrolována závažnost povrchových vad a dále byla posouzena jejich přijatelnosti dle požadavků zákazníka.

a) Zhodnocení vady A po provedených úpravách:

Po úpravě hran na přitlaku byla vizuálně zkontrolována závažnost povrchové vady A na první sadě vyrobených kusů.



Obrázek 4.4-02: Vada A - otlaky na vnější ploše kratší části



Obrázek 4.4-03: Vada A - přiblížená fotografie otlaků

Povrchová vada A, způsobená otlakem od přitlaku nástroje, která je znázorněna na obrázku 4.4-3, nebyla po provedených úpravách na přitlaku již tak závažná jako před úpravou. Po vizuální kontrole byla označena za přijatelnou. Proto se kvůli této povrchové vadě výrobky nevyřazovaly a byly označeny přes tuto vadu za vyhovující.

b) Zhodnocení vady B po provedených úpravách

Povrchové vady způsobené od závěru přitlaku byly na všech kusech velice podobné, bez ohledu na to, jestli bylo mazáno více nebo méně. To je patrné na následujícím obrázku 4.4-04.

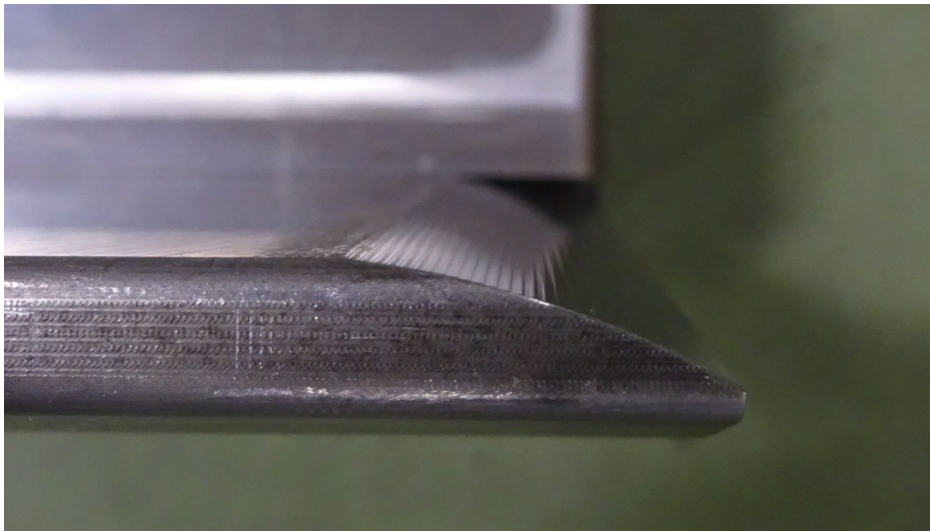


Obrázek 4.4-04: Vada B - otlaky na horní ploše kratší části



Obrázek 4.4-05: Vada B - přiblížená fotografie otlaku

Na předchozím obrázku 4.4-05 je zachycena vada B, která vznikla na horní ploše výrobku. Vada byla způsobena závěrem přitlaku. Pokud se na obrázek zadíváme pozorněji, jsou na něm vidět podélné rýhy uprostřed otlaku, které jsou způsobeny stopami po obrábění nástroje. Tyto stopy po obrábění závěru přitlaku jsou pozorovatelné i na následujícím obrázku 4.4-06.



Obrázek 4.4-06: Přiblížená fotografie závěru přitlaku po úpravě

V tomto případě bylo doporučeno zbroušení obrobené části závěru přitlaku, aby byly odstraněny stopy od obráběcího nástroje a tím se změnila drsnost povrchu. Plochy na lisovacím nástroji by měly být hladké a neměly by vytvářet ostré hrany. Při porovnání první sady kusů se zkušebními vzorky byla tato vada po úpravě závěru přitlaku méně závažná a byla označena za přijatelnou vzhledem k tomu, že bude výrobek ještě upraven balotínováním.

c) Zhodnocení vady C po provedených úpravách

Povrchová vada C, která byla způsobena od přitlačné lišty je znázorněna na následujícím obrázku 4.4-07 a je označena zelenou šipkou. Tyto vady byly po provedených úpravách méně závažné, než před navrženými úpravami.



Obrázek 4.4-07: Vada C - otlaky na delší straně



Obr. 4.4-08: Vada C - přiblížená fotografie otlaků

Přestože byla tato povrchová vada méně závažná, byla stále poměrně hluboká. Vzhledem k nedostatku času pro zhotovení dalších kusů byly tyto vady označeny za přijatelné a ohnuté kusy se kvůli této vadě nevyřazovaly z výroby.

4.5 Zhotovení druhé sady výrobků a vyhodnocení vzniklých komplikací

Po výrobě první sady výrobků byly tyto výrobky odeslány zákazníkovi a použity na zemědělský stroj ROLLANT 455/454 UNIWRAP od firmy CLAAS. Výrobky expedované z firmy AGROSTROJ Pelhřimov, a.s. vyhovovaly všem požadavkům zákazníka. Firma CLAAS objednala výrobu dalších kusů tohoto dílu.

Pro výrobu další sady výrobků byly nakoupeny polotovary od stejného dodavatele (Feron, a.s.). Při ohýbání druhé sady výrobků se vyskytly problémy, které způsobily špatné nasazování polotovaru na trn. Navíc byly ohnuty neshodné kusy, protože tření vzniklé mezi trnem a polotovarem způsobovalo, že úhel ohybu byl větší než požadovaných 90°. Z šesti ohnutých kusů vyhovoval z hlediska geometrie pouze jeden. V tomto okamžiku bylo ohýbání druhé sady výrobků zastaveno a muselo být rozhodnuto o dalším postupu a úpravách.

Bylo zjištěno, že vstupní materiál na výrobu druhé sady výrobků byl dodán v jiných rozměrech (tloušťka stěny polotovaru o přibližně 0,1 mm větší), než u první dodávky polotovarů. Přestože obě dodávky polotovarů byly dodány ve výrobních tolerancích dle normy ČSN EN 755-7, i takto malý rozdíl v tloušťce stěny byl zásadní pro provedení vyhovujícího ohybu. Jedná se o bezešvou čtvercovou trubku o rozměrech 80 x 80 x 6 mm vyrobenou dle normy ČSN EN 755.

Výpis z normy ČSN EN 755-7

Hliník a slitiny hliníku - Lisované tyče, trubky a profily - Část 7: Trubky bezešvé, mezní úchyly rozměrů a tvaru

Tabulka 4.5-01: Mezní úchyly šířky a tloušťky stěny pro čtvercové trubky 80 x 80 x 6 mm ze slitiny hliníku EN AW 6060

	nad	Do (včetně)	Mezní úchyly
Šířka polotovaru	50	100	±0,9
Tloušťka stěny	3	6	±0,75

Rozměry v tabulce jsou uvedeny v mm.

Pokud by byl polotovar dodán v krajních rozměrech dle normy ČSN EN 755-7, byl by dle normy stále vyhovující, ale z hlediska ohýbání by mohl být nevyhovující.

Tabulka 4.5-02: Naměřené hodnoty dodaných polotovarů na výrobu první sady výrobků (říjen 2015)

	Šířka polotovaru s [mm]	Tloušťka stěny t [mm]
Průměrná hodnota	79,816	5,785
Minimální naměřená hodnota	79,76	5,7
Maximální naměřená hodnota	79,9	5,84

$$s_{2min} = 79,76 - (2 \cdot 5,84) = 68,08 \text{ mm}$$

$$s_{2max} = 79,9 - (2 \cdot 5,7) = 68,5 \text{ mm}$$

$$s_{2pr} = \mathbf{79,816 - (2 \cdot 5,785) = 68,246 \text{ mm}}$$

$$v_{min} = 68,08 - 67,7 = 0,38 \text{ mm}$$

$$v_{max} = 68,5 - 67,7 = 0,8 \text{ mm}$$

$$v_{pr} = \mathbf{68,08 - 67,7 = 0,546 \text{ mm}}$$

U dodaných polotovarů na výrobu první sady výrobků vychází průměrný vnitřní rozměr čtyřhranné trubky (vypočítaný z 15 naměřených hodnot) $s_{2pr} = 68,246 \text{ mm}$. Z toho vyplývá, pokud je rozměr trnu 67,7 mm, průměrná vůle trnu u první dodávky polotovarů je $v_{pr} = 0,546 \text{ mm}$. I když je tato hodnota pod hodnotou doporučené vůle $v_{min} \geq 0,6 \text{ mm}$, přesto se při ohybu první sady výrobků neprojevila tato hodnota vůle jako problém.

Tabulka 4.5-03: Naměřené hodnoty dodaných polotovarů na výrobu druhé sady výrobků (prosinec 2015)

	Šířka polotovaru s [mm]	Tloušťka stěny [mm]
Průměrná hodnota	79,875	5,86
Minimální naměřená hodnota	79,8	5,8
Maximální naměřená hodnota	79,9	5,9

$$s_{2min} = 79,8 - (2 \cdot 5,9) = 68 \text{ mm}$$

$$s_{2max} = 79,9 - (2 \cdot 5,8) = 68,3 \text{ mm}$$

$$s_{2pr} = \mathbf{79,875 - (2 \cdot 5,86) = 68,155 \text{ mm}}$$

$$v_{min} = 68 - 67,7 = 0,3 \text{ mm}$$

$$v_{max} = 68,3 - 67,7 = 0,6 \text{ mm}$$

$$v_{pr} = \mathbf{68,155 - 67,7 = 0,455 \text{ mm}}$$

U polotovarů nakoupených pro výrobu druhé sady výrobků je průměrný vnitřní rozměr čtyřhranné trubky (vypočítaný z 15 naměřených hodnot) $s_{2pr} = 68,155 \text{ mm}$. Z těchto údajů je zřejmé, že pokud je rozměr trnu $67,7 \text{ mm}$, průměrná vůle mezi trnem a vnitřním rozměrem polotovaru je u druhé dodávky vstupního materiálu $v_{pr} = 0,455 \text{ mm}$, což je nedostačující vzhledem k tomu, že doporučená vůle je $v_{min} \geq 0,6 \text{ mm}$.

V tomto případě je nutné počítat také s nalepováním slitiny hliníku na trn, což v některých místech zvětšuje rozměr trnu až na $67,9 \text{ mm}$. Při ohýbání druhé sady výrobků se hodnota vůle projevila jako problematická. Z těchto důvodů bylo navrženo zbroušení trnu na každé straně o $0,2 \text{ mm}$. Po zbroušení se dosáhne rozměru trnu $67,3 \text{ mm}$. Tato úprava je nutná z hlediska dodržení dostatečné vůle, která usnadňuje také správné mazání trnu. Důležité při této úpravě trnu je, aby zabroušení trnu neovlivnilo "borcení" průřezu čtvercové trubky.

Po úpravě rozměrů trnu vychází průměrná vůle $v_{pr} = 0,855 \text{ mm}$. Tato hodnota je už zcela dostačující pro bezproblémové nasunutí polotovaru na trn a také pro správné mazání trnu.

4.6 Shrnutí dosavadních poznatků a návrh dalších opatření

Jeden z hlavních problémů při zhotovení daného výroku se od začátku vyznačoval jako otlaky způsobené nástrojem. Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že otlaky jsou na všech ohnutých kusech velice podobné, a to bez ohledu na změnu mazání a nastavování tvářecích sil. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí věnovat největší pozornost úpravě nástrojů, aby byly minimalizovány příčiny vzniku povrchových vad. Proto byly navrženy úpravy nástrojů tak, aby otlaky byly co nejmenší a po finální úpravě povrchu (balotínování) nebyly na konečném výrobku patrné žádné povrchové vady a otlaky.

Po úpravě hran na nástroji byly vady na daném výrobku méně závažné, přesto byly stále zřetelné. Po posouzení bylo rozhodnuto, že tyto povrchové vady jsou přijatelné a nejedná o závažné vady, které by mohli být po balotínování viditelné. Vyhovující kusy byly po ohýbání a kontrole předány na odmaštění. Poté byly zhotoveny otvory a zakrácena délka na stroji HEC1000 a výrobky byly dále odeslány na finální povrchovou úpravu balotínování.

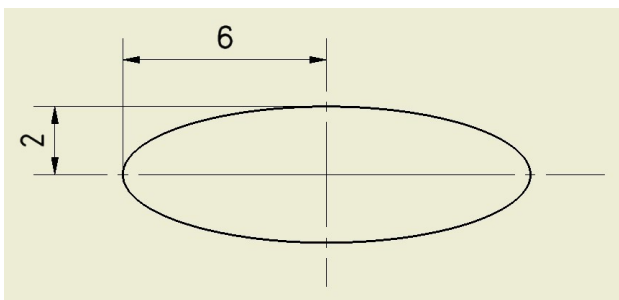
Následnou kontrolou po provedeném balotínování bylo zjištěno, že veškeré povrchové vady byly zcela odstraněny a zhotovené výrobky byly dle požadavků zákazníka vyhovující. Přestože byl proces ohýbání optimalizován tak, že již nebylo třeba provádět další změny procesu, je zde stále prostor pro zlepšení.



Obrázek 4.6-01: Finální výrobek po úpravě povrchu balotínování

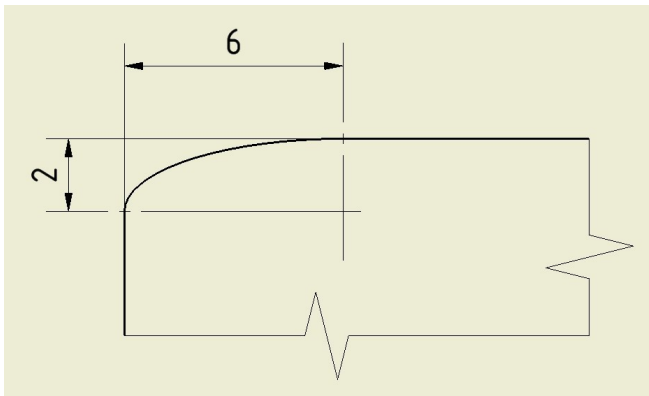
4.6.1 Celkové zhodnocení úpravy hran na nástroji a návrh pro další zlepšení

Z mého pohledu není zaoblení hran nástroje rádiusem ideální pro ohýbání trubek ze slitiny hliníku, jelikož přechod rovné plochy na rádius R4 vytváří při ohybu na výrobku otlaky. Proto bylo dále doporučeno namísto rádiusu použít elipsovitý tvar zaoblení, jak je znázorněno na následujícím obrázku 4.6-02.



Obrázek 4.6-02: Návrh rozměrů a tvaru zaoblení hran na nástroji

Při elipsovitém tvaru zaoblění je přechod z rovné plochy více plynulý než u zaoblění rádiusem. Proto je zde předpoklad, že otlaky od nástroje budou méně hluboké. Zaoblění hran může být zhotoveno ručním broušením kvalifikovaným pracovníkem nebo může být strojově obrobena a následně zabroušeno do hladka, aby nebyly znatelné stopy po obrábění. Zaoblená hrana na nástroji by mohla vypadat, jak je znázorněno na obrázku 4.6-03.



Obrázek 4.6-03: Návrh elipsovitého tvaru zaoblění hran na nástroji

Navržená úprava hran na nástroji v elipsovitém tvaru nebyla z časových důvodů zatím provedena, proto nebylo možné zhodnotit, zda bude tato úprava lepším řešením pro úpravu hran na nástroji.

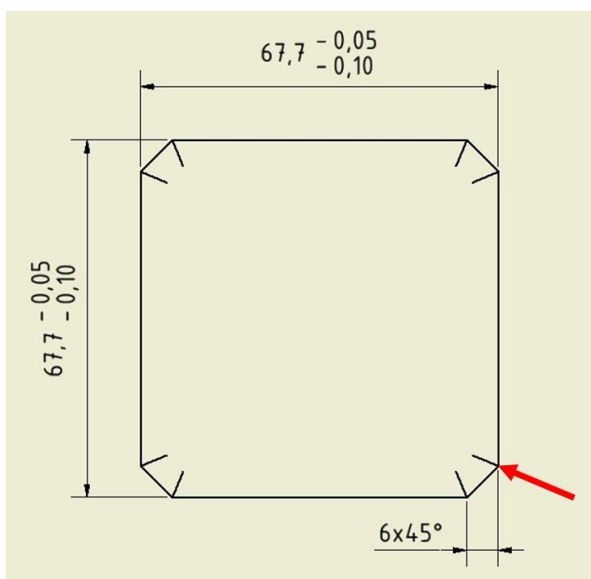
4.6.2 Zhodnocení geometrie trnu a návrh možných úprav

Dalším návrhem pro optimalizaci procesu je úprava geometrie trnu. Geometrie trnu, který byl použit při výrobě zkušebních vzorků a první sady výrobků není zcela ideální a díky této geometrii nastaly při ohýbání komplikace. Tyto komplikace se vyznačovaly špatným nasazováním polotovaru na trn a také lepením základního materiálu na hrany trnu. To bylo také příčinou špatného vyjímání výrobku z nástroje.



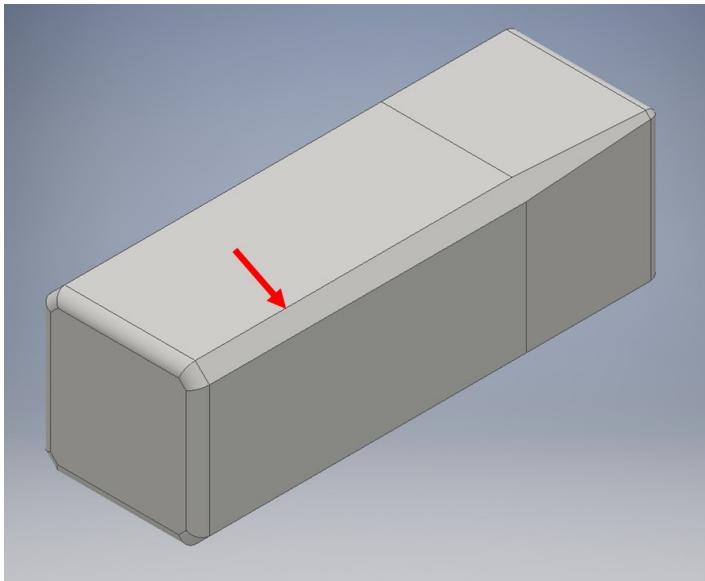
Obrázek 4.6-04: Nalepená slitina hliníku na hranách trnu

Na obrázku trnu 4.6-04 je dobře vidět, jak se hliník přilepuje na hrany trnu a tvoří tak nárůstek. Použitá geometrie trnu je znázorněna na následujícím obrázku 4.6-05. Obrázek je nakreslen dle výkresu, podle kterého byl trn vyroben.



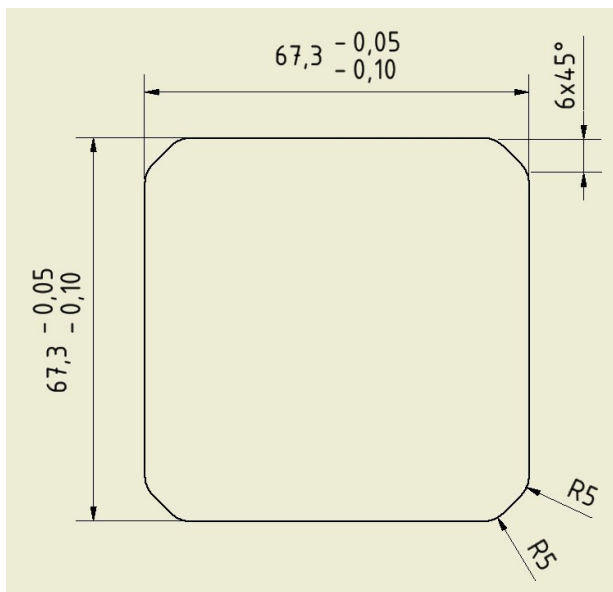
Obrázek 4.6-05: Předepsaná geometrie trnu

Již z obrázku 4.6-04 nebo obrázku 4.6-05 je zřetelné, že po zkosení $6 \times 45^\circ$ vznikly ostré hrany (označeno červenou šipkou), které se pouze lehce obrousily od otřepů. To je podle mého názoru nedostačující, jelikož se při ohýbání na tyto vzniklé hrany přilepuje základní materiál (slitina hliníku), a tím na nástroji vzniká nárůstek, který komplikuje výrobu.

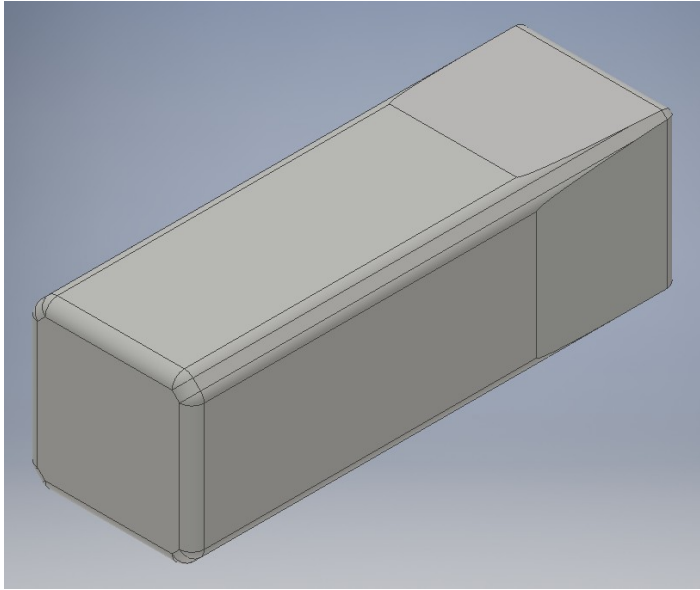


Obrázek 4.6-06: 3D model trnu dle předepsané geometrie

V tomto případě byla navržena nová geometrie trnu. Rozměr trnu je v návrhu zmenšen na $67,3 \text{ mm}$. Dále je doporučeno zaoblit hrany vzniklé po zkosení broušením na $R5$. Funkčnost trnu z hlediska deformace průřezu by se tím zásadně nezměnila. Navržená geometrie nástroje i se zaoblením hran je znázorněna na následujícím obrázku 4.6-07. Dalším návrhem je vyrobit trn z jiného materiálu než z oceli. Jako vhodný materiál trnu by se mohl použít například plast (např. Delrin).



Obrázek 4.6-07: Navržená geometrie trnu



Obrázek 4.6-08: 3D model trnu dle navržené geometrie

4.6.3 Zhodnocení použitého maziva

Dalším problematickým faktorem u ohýbání je mazání. U tohoto výrobku byly zatím vyzkoušeny 2 způsoby mazání. Pro první zkušební vzorky bylo mazání provedeno ručním nanášením syntetické tvářecí kapaliny na bázi vody. Tato syntetická tvářecí kapalina byla dodána firmou BBL a její označení je BBL ALC. Tento způsob mazání se pro tento výrobek neosvědčil jako vhodný.

Pro výrobu první sady výrobků bylo použito ruční nanášení maziva MOGUL G 3. Jedná se o plastické mazivo vyrobené z pečlivě vybraných ropných základových olejů vysoké kvality zpevněných vápenatým mýdlem. Obsahuje jakostní chemicky čistý grafit, který výrazně zlepšuje jeho vlastnosti. Má krátkovláknitou strukturu, je polotuhé konzistence, šedé až černé barvy. Mazivo MOGUL G3 se od začátku vyznačovalo jako vhodná varianta, ovšem při následném odmaštění nastal s tímto mazivem problém spočívající v náročném odmašťování výrobku, a proto bylo nařízeno toto mazivo již dále nepoužívat.

Po prostudování dostupné literatury bylo doporučeno použití maziv, která by pro mazání tohoto dílu mohla být vhodná. V literatuře je pro mazání hliníkových slitin doporučen petrolej, ten se nejčastěji používá pro mazání při řezání závitu do hliníkových slitin. Avšak i mazání petrolejem bylo pro ohýbání tohoto dílu zamítnuto, vzhledem k jeho hořlavosti a dalším nepříznivým vlastnostem.

Dále je pro mazání hliníkových slitin doporučována mýdlová voda, pro niž však není v dostupné literatuře doporučený poměr. Tento poměr by se musel určit experimentálně. To by bylo v daném případě časově i finančně náročné (vzhledem k vyrobeným neshodným kusům), a proto se nebude dále o použití mýdlové vody uvažovat.

Za účelem zajištění vhodného maziva byla oslovena firma BBLubricants s.r.o.. Jedná se o firmu specializující se na výrobu maziv. Bylo dodáno několik vzorků maziv, které se zatím s kapacitních důvodů nepodařilo vyzkoušet.

4.6.4 Určení délky polotovaru [2], [19]

Vychází se z délky neutrální vrstvy. Při výpočtu lze rozdělit součást do rovných úseků a na ohýbané úseky, u kterých se na základě poloměru neutrální vrstvy vypočítá délka polotovaru. Při výpočtu délky polotovaru se nejprve určí poloměr neutrální vrstvy podle vztahu:

$$r_n = R_0 + x \cdot s \text{ [mm]}$$

$$r_n = 470 + 0,5 \cdot 80 = \mathbf{510 \text{ [mm]}}$$

$$\frac{R}{t} = \frac{470}{80} = 5,875 \rightarrow x = \mathbf{0,5}$$

R/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	nad 5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,50

V další fázi se vypočte délka neutrální vrstvy l_n , která je závislá na tloušťce ohýbaného materiálu, úhlu oblouku neutrální vrstvy a poloměru ohybu R_0 . Dle vzorce:

$$l_n = \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot \varphi \cdot r_n = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot (R_0 + x \cdot s) \text{ [mm]}$$

$$l_n = \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot 90 \cdot 510 = \mathbf{801,1 \text{ [mm]}}$$

Celková délka se pak vypočte jako součet rovinných a ohýbaných úseků.

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

$$l_c = 940 + 470 + 801,1 = \mathbf{2211,1 \text{ mm}}$$

Minimální délka polotovaru pro daný výrobek je dle předchozího výpočtu $l_{min}=2211,1 \text{ mm}$. Polotovar je před ohybem řezán na délku $l=2220 \text{ mm}$ a po ohybu se kratší strana zařezává na přesnou délku dle požadavků. Tento postup se provádí pro zajištění určité rezervy délky, jelikož průběh ohýbání není u každého ohybu zcela stejný. Je to dáno vlivem několika faktorů (např. lidského faktoru u zakládání polotovaru do kleštin, nestálostí mazání trnu, atd.). Při zakracování dosud vyrobených kusů na přesnou délku se odstraňovalo 2 až 8 mm.

Dalším cílem je optimalizovat proces ohýbání tak, aby nebylo nutné po ohybu korigovat délku výrobku. Pro tuto optimalizaci je nutné vyladit celý proces ohýbání tak, aby průběh ohybu byl vždy zcela stejný, potom by bylo možné polotovar zakrátit na přesnou délku před ohybem. Po ohybu by pak odpadla následná výrobní operace zakrácení na přesnou délku. Tímto by se snížily výrobní náklady a také časově zkrátil celkový výrobní proces.

5 Závěr

Po prvním seznámení se s problematikou ohýbání dutých profilů, která je obsahem mé diplomové práce, jsem zahájil teoretickou přípravu k tomuto tématu. V práci jsem na základě dostupné literatury provedl shrnutí vlivů na proces ohýbání dutých profilů a chování materiálu při tvářecím procesu. Dále jsem popsal základní principy tváření materiálu, provedl jsem popis faktorů majících vliv na tvářecí proces. Popsal jsem vybranou součást a materiálové specifikace pro výrobu této součásti. Pro řešení optimalizace výroby dílu jsem se ve společnosti AGROSTROJ Pelhřimov, a.s. podrobně seznámil s praktickým problémem výroby dané součásti. Jedná se o součást ze slitiny hliníku, která je určena na zemědělský stroj ROLLANT 455/454 UNIWRAP od firmy CLAAS. Prostudoval jsem dokumentaci k výrobku a k výrobním nástrojům.

Podrobně jsem provedl dokumentaci vlastností vstupního materiálu (polotovarem je bezešvá čtvercová trubka vyrobená dle normy EN 755 o jmenovitých rozměrech průřezu $80 \times 80 \text{ mm}$ a tloušťce stěny $t = 6 \text{ mm}$ ze slitiny hliníku EN AW 6060). Popsal jsem ohýbací stroj ELECT150, na kterém probíhá ohýbání dané součásti. Zúčastnil jsem se výroby prvních zkušebních vzorků. Poté jsem identifikoval a označil všechny závažné povrchové vady na výrobku. Celkem bylo označeno pět problematických míst, kde vznikaly povrchové vady (vada A až vada E). V rámci optimalizace jsem provedl návrh opatření pro eliminaci příčin vzniku povrchových vad. Po realizaci nápravných opatření bylo vyhodnoceno, do jaké míry tato opatření vedou ke zlepšení výrobního procesu. Výsledky ukázaly, že navržená opatření vedou k dostačující přesnosti výroby a zároveň jsou povrchové vady v přijatelných hodnotách.

Při výrobě druhé sady výrobků bylo třeba řešit problémy, které nebyly v rámci výroby první sady patrné. Jedná se především o jiné hodnoty rozměrů polotovaru, ač jsou v rámci rozptylu tolerance. Zhodnotil jsem příčiny a důsledky těchto komplikací a vypracoval další návrhy na optimalizaci. Tento optimalizační krok nebyl zatím z časových důvodů ověřen.

6 Seznam použité literatury

- [1] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [2] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [3] BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 246 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
- [4] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [5] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [6] DOUBRAVSKÝ, Miroslav. *Vybrané statě z tváření III: Ohýbání a tažení plechů*. Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1971.
- [7] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. New York: Industrial Press, 2004, xix, 219 p. ISBN 0831131829.
- [8] HAŠEK, Vladimír. *Tváření kovů za studena*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958.
- [9] HRIVŇÁK, Andrej, Emil SPIŠÁK a Emil EVIN. *Technológia plošného tvárnenia: návody pre cvičenia*. Bratislava: Alfa, 1989.
- [10] MACHÁČEK, Zdeněk a Karel NOVOTNÝ. *Speciální technologie I: plošné a objemové tváření*. Brno: VUT v Brně, 1986, 168 s. Učební texty vysokých škol
- [11] *Technologie plošného tváření – ohýbání* [online]. Liberec [cit. 2016-01-02]. Skripta. Technická univerzita v Liberci - Katedra tváření kovů a plastů. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/.
- [12] KOČMAN, Karel. *Aktuální příručka pro technický úsek: základní dílo - stav únor 1999 - včetně 8 aktualizací*. Praha: Verlag Dashöfer, 1999, 1 svazek (různé stránkování). ISBN 80-902247-2-5.
- [13] PEŠINA, Eugen. *Základy užití teorie plasticity*. Praha: SNTL, 1966, 184 s.

- [14] SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 2 sv. (134, 155 s.). ISBN 978-80-214-4220-7.
- [15] Akademie tváření: Ohýbání. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2010 [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/100715>
- [16] NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 186 s. ISBN 80-214-0401-9.
- [17] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Ladislav ŽÁK. *Technologie tváření: návody do cvičení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 103 s. ISBN 80-214-2881-3.
- [18] SAMEK, Radko a Renata NETUŠILOVÁ. *Návrh a ověření ohybu tenkostěnných trubek*. Brno, 1983, 56 s.
- [19] ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie I*. 1. vyd. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990, 220 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0128-1.
- [20] VÍTEK, Antonín. *Ohýbání trubek*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
- [21] *ELECT150: Návod k obsluze*. R.D.I. SPOL S.R.O.
- [22] *PROAL - Hliníkové profily: Hliník AlMgSi - ČSN 424401* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424401.htm#>
- [23] *Alupa s.r.o.: Hliníkové profily a plechy* [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.alupa.cz/produkty/vlastnosti-profilu.htm>

7 Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
r_n	[mm]	poloměr ohybu neutrální vrstvy
R_0	[mm]	poloměr ohybu
x	[-]	součinitel posunutí neutrální vrstvy
l_n	[mm]	délka neutrální vrstvy
π	[-]	Ludolfovo číslo
φ	[°]	úhel ohnutého úseku
l_c	[mm]	celková délka polotovaru
l_{1-3}	[mm]	délky rovných úseků
$l_n, l_{01-0(n-1)}$	[mm]	délky neutrálních ploch (vrstev)
t	[mm]	tloušťka stěny trubky
s	[mm]	vnější rozměr (trubky)
C	[-]	součinitel volen podle materiálu
ε_{max}	[-]	trvalá poměrná deformace (maximální)
R_{max}	[mm]	maximální poloměr ohybu
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
R_e	[MPa]	mez kluzu materiálu
r_1	[mm]	poloměr u ohýbacího nástroje
r_2	[mm]	konečný poloměr ohybku
α_1	[°]	úhel u ohýbacího nástroje
α_2	[°]	konečný úhel ohybku
M	[N·m]	moment nezbytný k vyvolání plastické deformace
ρ_s	[-]	poměr poloměru ohybu k vnějšímu poloměru trubky
W_0	[m ³]	modul průřezu v ohybu
D	[m]	vnější průměr trubky
d	[m]	vnitřní průměr trubky
s_2	[mm]	vnitřní rozměr čtvercové trubky
v	[mm]	vůle mezi trnem a vnitřním rozměrem čtvercové trubky
k_1	[-]	součinitel profilu

8 Přílohy

Veškeré přílohy k této diplomové práci jsou přiloženy na CD, kde jsou přehledně seřazeny a pojmenovány.