



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## ANALÝZA PROCESU OHYBU TRUBKY

ANALYSIS OF TUBE BENDING PROCESS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Šrom

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Peterková, Ph.D.

BRNO 2017

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Jan Šrom</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Eva Peterková, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Analýza procesu ohybu trubky**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedná se o analýzu procesu ohybu trubky s využitím MKP simulace.

### **Cíle diplomové práce:**

Obecný popis geometrie nástrojů používaných při ohýbání trubek.

Vyhodnocení průřezového tvaru trubky po ohybu.

Popis defektů vzniklých v průběhu ohybu.

Rozbor sil působících při ohybu – vliv na vznik distorze průřezu.

MKP analýza procesu ohybu a porovnání s výsledky získaných z experimentů.

### **Seznam doporučené literatury:**

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.

Handbuch der Umformtechnik: processes - machines - tools. New York: Springer, c1996. ISBN 35-406-1099-5.

MARCINIAK, Zdzislaw, John L. DUNCAN a S. Jack HU. Mechanics of sheet metal forming: mechanics and metallurgy. 2nd ed / . Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 07-506-5300-0.

YAFEI, Liu a E. DAXIN. Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes Under Bending. Journal of Materials Engineering and Performance. 2011, 20(9), 1591-1599. DOI: 10.1007/s11665-010-9813-z. ISSN 1059-9495. Dostupné také z:

<http://link.springer.com/10.1007/s11665-010-9813-z>.

TANG, N.C. Plastic-deformation analysis in tube bending. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2000, 77(12), 751-759. DOI: 10.1016/S0308-0161(00)00061-2. ISSN 0308-0161. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016100000612>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá tématem ohybu trubek technologií navíjení bez stabilizačního trnu. Ohyb trubek je doprovázen řadou defektů vznikajících v důsledku velkých přetvoření tvářeného materiálu. Jeden z hlavních defektů, který je v práci důkladně prozkoumán, je zploštění průřezu trubek neboli ovalita. Po nastudování odborné literatury je přistoupeno k inovativnímu řešení, které má snížit tento defekt, a to modifikací tvářecích nástrojů. Optimalizace tvaru tvářecích nástrojů je nejdříve analyzována metodou konečných prvků v softwaru ANSYS. Na základě numerických výsledků je navržen optimální tvar přítlačné lišty, která je následně vyrobena. K experimentálnímu ověření vlivu optimalizované přítlačné lišty je provedeno přibližně 100 ohybů, které potvrzují pozitivní vliv upravené geometrie drážky na ovalitu trubky v místě ohybu.

### **Klíčová slova**

Ohyb navíjením, Ohyb trubek, Ovalita, Optimalizace, MKP

## **ABSTRACT**

Master thesis analyzes rotary draw bending of the tubes without using a mandrel. Bending process is accompanied by many defects due to large displacement of formed material. One of the major defects is flatter of the cross section also called ovality. In order to decrease ovality comes up a proposal of the changes to the tool design. Modifications of tool's geometry are numerically analyzed by finite element method in software ANSYS. According to the results of the simulations an optimized pressure die is manufactured. Several experimental tests are accomplished to verify the effect of the optimized tool design. Approximately 100 bends confirm a decrease of ovality using modified pressure die.

### **Key words**

Rotary draw bending, Tube bending, Ovality, Optimization, FEM

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠROM, Jan. *Analýza procesu ohybu trubky*. Brno, 2017. 66s, 4 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza procesu ohybu trubky** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26. 5. 2017

---

Datum

---

Bc. Jan Šrom

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval své vedoucí paní Ing. Evě Peterkové, Ph.D. za cenné rady a připomínky, poskytnuté při konzultacích diplomové práce. Poděkování patří i Ing. Janu Řiháčkovi za cenné konzultace týkající se oblasti simulací. Děkuji také společnosti a jejímu vedení za možnost se prakticky podílet na řešení technické problematiky v praxi. Vážím si přátelského přístupu a ochoty pracovníků firmy podílejících se na realizaci experimentální části diplomové práce. Poděkování patří rovněž rodičům za podporu během celého studia zajišťující jeho bezstarostný průběh.

# OBSAH

ABSTRAKT

PROHLÁŠENÍ

PODĚKOVÁNÍ

OBSAH

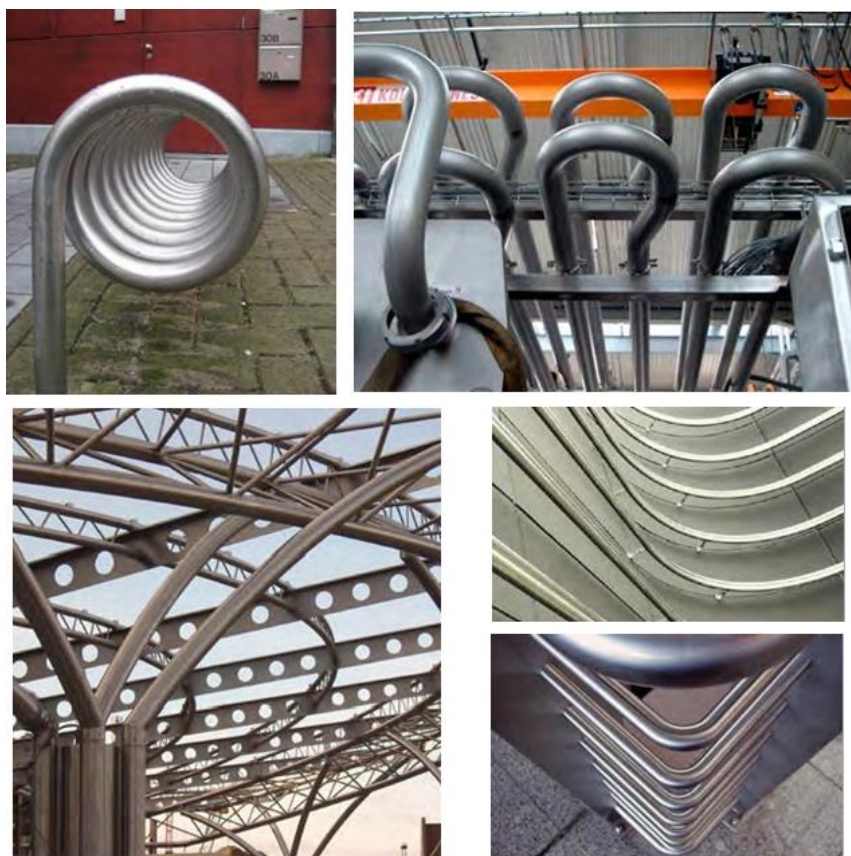
ÚVOD .....	10
1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU .....	11
1.1 Řešená problematika .....	11
1.1.1 Zkoumaný polotovar .....	12
2 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ TRUBEK .....	13
2.2 Ohýbání trubek .....	13
2.3 Ohybový moment .....	14
2.4 Rozložení napětí a deformace v trubce.....	15
2.4.1 Materiálové modely.....	16
2.4.2 Zbytková napětí .....	17
2.5 Kritéria technologičnosti ohybu .....	17
2.6 Defekty při ohybu trubek.....	18
2.6.1 Zploštění průřezu – ovalita.....	18
2.6.2 Ztenčení stěny .....	20
2.6.3 Zvlnění stěny .....	21
2.6.4 Odpružení .....	21
2.7 OHYB NAVÍJENÍM .....	22
2.7.1 Nástroje .....	23
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ .....	27
3.1 Diskretizace .....	27
3.2 Napět'ově-deformační analýza.....	29
3.3 Nelineární úlohy .....	30
3.4 Algoritmy řešení .....	31
3.5 Členění simulačního software .....	32
4 PRAKTICKÁ ČÁST .....	33
4.1 Rozbor zadání .....	33
4.2 Návrhy ke snížení ovality .....	34
4.2.1 Axiální tlaková síla.....	34
4.2.2 Výplně .....	35
4.2.3 Úprava geometrie nástroje.....	37
4.3 Návrh optimalizace geometrie nástroje .....	39
4.4 Numerická analýza .....	40

4.4.1	Geometrický model .....	41
4.4.2	Materiálový model .....	42
4.4.3	Kontaktní plochy .....	43
4.4.4	Nanesení sítě .....	44
4.4.5	Model zatížení .....	45
4.4.6	Numerické výsledky .....	46
4.4.7	Numerické vyhodnocení .....	47
4.4.8	Optimalizovaný nástroj .....	52
4.5	Experimentální ověření.....	53
4.5.1	Kontrola geometrie nástroje .....	53
4.5.2	Příprava experimentů .....	53
4.5.3	Provedení experimentů.....	54
4.5.4	Vyhodnocení ovality .....	56
4.6	Porovnání simulace s experimentem .....	62
4.7	Diskuze .....	63
5	ZÁVĚRY.....	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		
SEZNAM OBRÁZKŮ		
SEZNAM TABULEK		
SEZNAM PŘÍLOH		

## ÚVOD

Současná doba je charakteristická velmi rychlým technologickým rozvojem, souvisejícím se zvyšujícími se nároky zákazníků, potažmo spotřebitelů. Aby měly podniky zajištěnou pozici na trhu a zůstaly konkurenceschopnými, musejí se rozvíjejícímu se prostředí a požadavkům přizpůsobovat. Výrobci se proto zaměřují na neustálý vývoj, zlepšování technologií a inovace, při zachování cen výrobků. Zákazníky jsou posuzovány nejen primární funkce dílů, ale i další aspekty zajišťující vysokou kvalitu výrobku, jako jsou mechanické vlastnosti, spolehlivost a životnost dílů.

Významný vliv na kvalitu výrobků mají technologie použité při všech typech výroby. K zajištění stabilní sériové výroby je klíčová jak přesnost použitého strojního vybavení a tvářecích nástrojů, tak znalost procesních vlivů. Analýza procesů metodou pokus-omyl není v moderní době myslitelná. V současnosti se nabízí pokročilé metody zkoumání procesních vlivů pomocí simulačních softwarů. Velmi účinnou metodou v technické praxi je metoda konečných prvků, která bude využita v této práci k analýze ohybu trubek. Obr. 1 zobrazuje možnosti využití ohýbaných trubek.



Obr. 1 Aplikace trubek [43]

# 1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Předložená diplomová práce se zabývá tématem ohybu trubek. Ohýbání je primární technologií plošného tváření, prostřednictvím kterého je dosahováno požadovaného tvaru trubkových dílců. Ohýbání trubek je analogické ohýbání tyčí. Výroba je obdobná nejen technologicky, ale i použitými stroji a nástroji. Hlavní rozdíl spočívá ve tváření dutého dílce, čímž narůstají problémy v podobě defektů. Z tohoto důvodu je nutné mít celý proces pod kontrolou a znát vlivy ovlivňující kvalitu produktů.

Jedním z důvodů proč se věnovat oblasti tváření trubek je současný trend snižování hmotnosti dílců. Nahrazení tyčí trubkami znamená také značnou úsporu materiálu. Na snížení hmotnosti je kladen velký důraz zákazníky, především v dopravní technice. Trubky navíc umožňují vedení kapalin, či plynů v dopravních systémech, a tak se uplatnění rozšiřuje do dalších odvětví jako je stavebnictví, energetický a chemický průmysl.

Nahrazení plného profilu dutým zvyšuje požadavky na výrobu. Náchylnost trubek ke vzniku defektů klade vyšší nároky na použité nástroje a přesné strojní vybavení. Během ohýbání dochází k velkému přetvoření zapříčínující mimo jiné i distorzi průřezu. Tokem materiálu tak vznikají defekty, které jsou nedílnou součástí procesu. Z důvodů dodržení požadovaných mechanických vlastností je třeba sledovat výslednou kvalitu. O to důležitěji se jeví analýza procesních vlivů, ovlivňujících výslednou kvalitu výrobku.

## 1.1 Řešená problematika [36]

Jedním z vyskytujících se defektů při ohýbání trubek je zploštění průřezu neboli ovalita. Míra ovality je hodnocena koeficientem v příčných řezech podél ohybu. Koeficient ovality vyjadřuje procentuální odchylku deformovaného průřezu od výchozího kruhového tvaru. Zploštění má jednoznačně negativní vliv na mechanické vlastnosti trubek. Ovalita může vykazovat problémy při montáži. Nedodržení kruhovitého profilu znesnadňuje možnosti uchycení trubky, či uchycení jiných dílců na ni, apod. Deformovaný průřez nadále zhoršuje proudění kapalin a navíc nepříznivě ovlivňuje ostatní defekty. Tendence moderní výroby k produkci kvalitních dílů směřuje ke zmenšování tohoto defektu.

Právě na problematiku ovality je zaměřena tato práce. Analýzou procesních parametrů budou vyšetřeny příčiny jejího výskytu a představeny možnosti jejího snížení. Využitím metody konečných prvků bude zkoumán vliv nástrojů na vlastnosti ohybu a s využitím simulačního softwaru ANSYS bude ověřen vliv navržených nástrojů.

Cílem je tedy navrhnout novou geometrii nástroje, která způsobí co největší snížení ovality průřezu trubky v místě ohybu. V případě příznivých simulačních výsledků bude optimalizovaný nástroj zhotoven k experimentálnímu ověření.

Téma diplomové práce je zadáno dle požadavků firmy A (dále jen firma). Spolupráce s firmou umožnila celkovou realizaci návrhu. Firma hradila veškeré výdaje spojené s výrobou a experimenty. Provedení experimentů a jejich vyhodnocení bylo umožněno v podniku s podporou všech dostupných prostředků. Výchozí polotovar a volba stroje je proto definována podnikem.

### 1.1.1 Zkoumaný polotovár

Zkoumaným polotovarem pro experimentální zkoušky je svařovaná za studena tažená trubka o průměru 27 mm s tloušťkou stěny 3,2 mm. Výchozím materiálem je vysoce pevnostní ocel 34MnB5. Jak napovídá označení, ocel je nízko legována bórem, manganem a je výborně svařitelná díky nízkému obsahu uhlíku. Norma ČSN EN 10305-2 udává chemické složení a mechanické vlastnosti uvedené v tab. 1. Uvedená specifikace platí pro ocel bez tepelného zpracování.

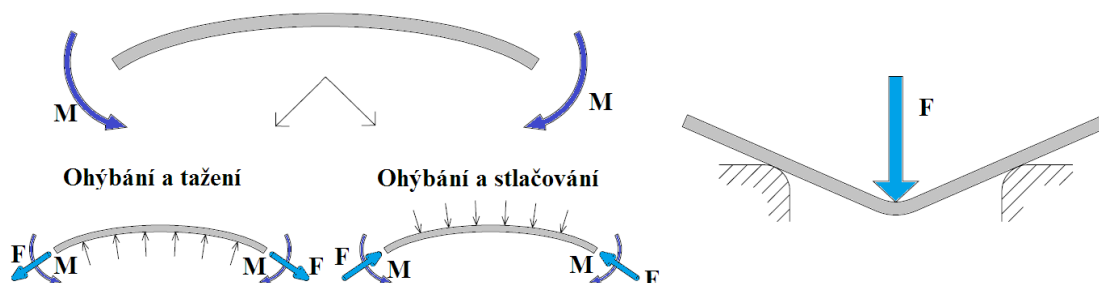
Tab. 1 Specifikace oceli 34MnB5 [36]

Ocel 34MnB5					
Mechanické vlastnosti	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]		
	320 – 600	580 – 620	≥ 14		
Chemické složení	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
	0,33 - 0,37	0,15 - 0,30	1,20 - 1,40	< 0,020	< 0,005
	Al [%]	Ti [%]	Cr [%]	B [%]	Cu [%]
	0,02 - 0,05	0,02 - 0,05	0,10 - 0,18	0,0015 - 0,0035	< 0,1

Kombinace houževnatosti a tvrdosti předurčuje použití oceli zejména v automobilovém průmyslu. Z oceli se například zhotovují díly karoserie, nebo bezpečnostní prvky jako jsou součásti podvozku, nárazníky, stabilizátory, hnací či ozubené hřídele apod.

## 2 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ TRUBEK [5], [29]

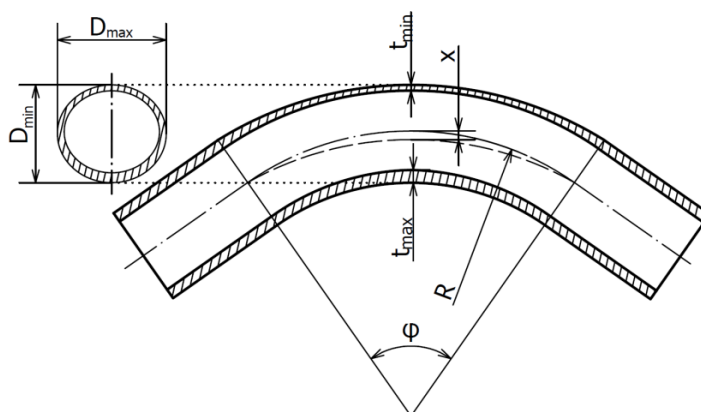
Ohýbání je jedna ze základních technologií plošného tváření užívaných k výrobě trubkových dílců. Trvalého přetvoření je dosaženo působením ohybových momentů, lokálními silami nebo kombinací ohybu s vnějšími zatíženími (obr. 2). Při plastické deformaci jsou zásadní tahová napětí, která však nesmí překročit mez pevnosti v tahu.



Obr. 2 Způsoby ohybu [5]

### 2.2 Ohýbání trubek [29], [30], [31]

Ohyb trubek, jakožto dutého dílce, má svá specifika. Při ohýbání trubek dochází k poměrně velkému přetvoření především ve vnějších pásmech materiálu. Při překročení meze kluzu dochází k nerovnoměrnému prodlužování vláken a toku materiálu. K přetvoření dochází jak v podélném směru, tak i v obvodovém. Se zmenšujícím se poloměrem se materiál přesouvá z tahové do tlakové oblasti. Jak je znázorněno na obr. 3, na vnějším poloměru tak dochází ke ztenčování stěny. Proto jsou zejména tenkostěnné trubky náchylné k defektům.



Obr. 3 Průřez ohnutou trubkou [31]

**Neutrální osa** – při ohýbání dochází k natahování a stlačování vrstev materiálu. Mezi těmito vrstvami se nachází neutrální vrstva, v případě trubky osa. Na neutrální ose je napětí vždy rovno nule. Stejně tak zůstává neměnná i její délka. Neutrální osa se zpočátku nachází ve středu průřezu. Vlivem ohybových momentů se postupně přesouvá ke středu ohybu. K přesunu dochází pouze v úseku vymezeném úhlem  $\varphi$ , viz obr. 3. Míra posuvu od osy trubky je na obr. 2 označena  $x$ . Tuto vzdálenost lze dle [30] vypočítat vztahem:

$$x = \frac{0,42}{k} \cdot r_s ; k = \frac{R}{2 \cdot r_s} \quad (2.1)$$

kde:  $x$  posuv neutrální osy [mm]  
 $k$  střední relativní poloměr ohybu [-]  
 $r_s$  střední poloměr trubky [mm]  
 $R$  poloměr ohybu [mm]

Ze vztahu vyplývá, že čím více je trubka ohnuta, o to k většímu posuvu dojde. Při velkých změnách průřezů má změna osy vliv na hodnotu kvadratického momentu a ovlivňuje délku výchozího polotovaru.

**Délka oblouku** – je ovlivněna úhlem ohybu a rádiusem, ten je vztažen k neutrální ose. Neutrální osa se s narůstajícím úhlem posouvá ke středu ohybu. Míra posuvu je ovlivněna zploštěním průřezu a tloušťkou stěny. V místě počátku ohybu souhlasí neutrální osa s osou ohybu. Směrem ke středu ohybu narůstá vychýlení neutrální osy. V místě poloviny celkového úhlu ohybu nastává maximální posun k ose ohybu. Rádus neutrální osy je proto proměnlivý po délce ohybu. Tang ke zpřesnění výsledku rozlišuje oblast konstantního a proměnného přetvoření, dále rozebráno v kapitole 2.6.1. V článku [30] je hranice oblastí definována úhlem  $\beta$ , který nabývá hodnoty 20 % z celkového úhlu ohybu  $\varphi$ . Jelikož je posun neutrální osy v oblasti proměnného přetvoření minimální, počítá vztah (2.2) délku oblouku této oblasti pouze s poloviční hodnotou maximálního vychýlení osy. Ve vztahu (2.3) délky oblouku rovnoměrně deformované části je dosazen maximální posun neutrální osy pro celou oblast.

$$l_p = \left(R - \frac{x}{2}\right) \cdot 2\beta \quad (2.2)$$

$$l_k = (R - x) \cdot (\varphi - 2\beta) \quad (2.3)$$

Celková délka oblouku (2.4) ohnuté části je spočtena následovně:

$$l = l_p + l_k = R\varphi - x(\varphi + \beta) \quad (2.4)$$

kde: $l_p$	délka oblouku v nerovnoměrně deformované oblasti [mm]
$l_k$	délka oblouku v rovnoměrně deformované oblasti [mm]
$l$	celková délka oblouku [mm]
$R$	poloměr ohybu [mm]
$\varphi$	úhel ohybu [rad]
$\beta$	úhel oblouku s proměnným přetvořením [rad]

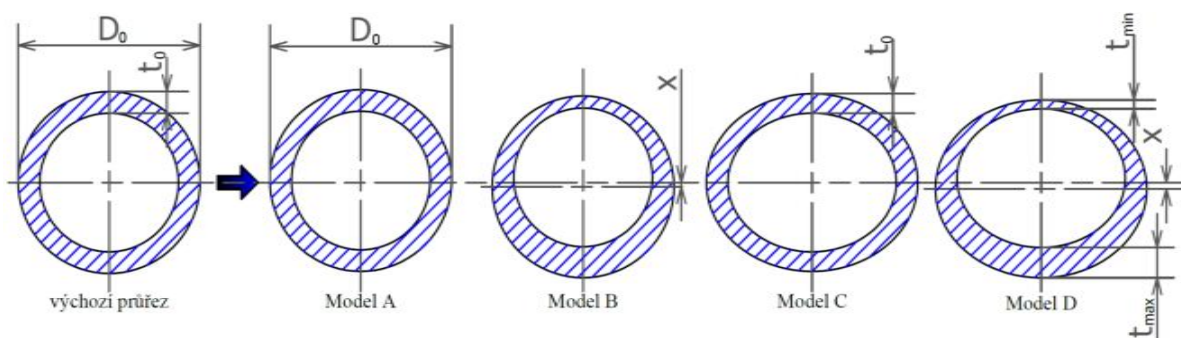
### 2.3 Ohybový moment [20], [26], [29]

Všeobecně je ohyb realizován vnějšími ohybovými momenty  $M_o$ , které jsou vyvolány nástroji. Tyto momenty jsou v rovnováze s ohybovým momentem vnitřních sil  $M_{ov}$  a platí  $M_o = M_{ov}$ . Hodnota ohybového momentu je odvozena nejen od vnějších sil, ale také od technologie, neboť je nutné zohlednit působíště sil. Hlavní složkou momentu je moment potřebný k plastické deformaci trubky. Zbylé složky momentu jsou vynaloženy k překonání tření v různých mechanismech.

Ohybový moment vnitřních sil vzniká v materiálu jako odpor k přetvoření materiálu. Ke stanovení vnitřního momentu existuje několik přístupů. Každý z přístupů zahrnuje rozdílné zjednodušující předpoklady k odvození výpočtových vztahů. Stěžejní je volba materiálového

modelu, definování výsledné geometrie trubky, zanedbání silových účinků a v neposlední řadě zjednodušení matematických funkcí. Zavedení zjednodušení do výpočtových modelů jsou nezbytná, je však potřeba uvažovat o jejich následcích. Výpočet závisí především na konečném příčném průřezu trubky, a to v místě maximálních přetvoření. Při výpočtech pak lze uvažovat s následujícími modely konečných tvarů průřezů trubky:

- kruh – bez změny tloušťky stěny (model A na obr. 4),
- kruh – změna tloušťky stěny a pozice neutrální osy (model B na obr. 4),
- elipsa – bez změny tloušťky stěny (model C na obr. 4),
- elipsa – změna tloušťky stěny a pozice neutrální osy (model D na obr. 4).



Obr. 4 Modely finálních příčných průřezů [26]

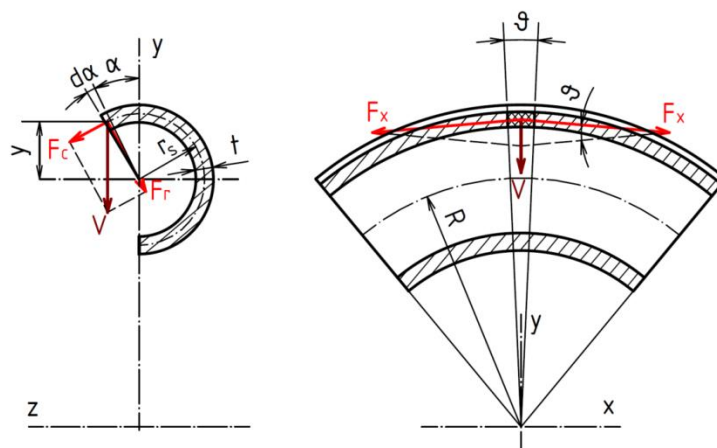
Změna kvadratického momentu, při uvážení distorze průřezu, komplikuje výpočet ale stejně jako zavedení posunu neutrální osy, zpřesňuje výsledek. V článku [26] je představen nový přístup popisu průřezu. Model D (obr. 4) pracuje ve výpočtech se zobecněným průřezem ve tvaru elipsy s posunutou neutrální osou. Metoda výpočtů ohybových momentů je dále podrobně rozebrána v článcích [1], [3], [20].

## 2.4 Rozložení napětí a deformace v trubce [2], [30]

Analýzou napětí generovaného v trubce během ohybu se zabývá řada autorů. Například Tang ve článku [30] analyzuje napětí při změně tloušťky stěn. K popisu je nutné zavést vhodný souřadnicový systém, ze kterého vychází indexace směrů. Účinky působící v podélném směru jsou značeny indexem „x“, v tečném směru „c“ a radiální směr písmenem „r“. Trubka je za působení ohybového momentu nejvíce namáhána v podélném směru napětím  $\sigma_x$ . Omezením působení napětí na element, se získají silové účinky v podélném směru  $F_x$ . Jak je patrné ze schématu na obr. 5, síly působí oběma směry. Jejich superpozicí se získá silová výslednice směřující do osy ohybu. V rovině příčného průřezu je následně odvozena závislost tečného napětí na podélném:

$$\sigma_c = -\sigma_x \cdot \frac{1 - \cos \alpha}{2k + 1}, k = \frac{R}{2r} \quad (2.5)$$

- kde:  $\sigma_c$  obvodové napětí v průřezu [MPa]  
 $\sigma_x$  podélné napětí v průřezu [MPa]  
 $\alpha$  úhel pozice elementu v průřezu [°]



Obr. 5 Silové rozložení [30]

Podélné napětí je na vnějším půlkruhu tahové, na vnitřním tlakové. Tečné napětí je po celém obvodu tlakové. Jelikož je tloušťka stěny několikanásobně menší než je průměr trubky, radiální napětí  $\sigma_r$  se zanedbává. Platností zákona maximálních smykových napětí vniká závislost mezi napětími (2.6) pro vnější půlkruh a současně závislost (2.7) pro vnitřní půlkruh:

$$|\sigma_x| + |\sigma_c| = \sigma_k \quad (2.6)$$

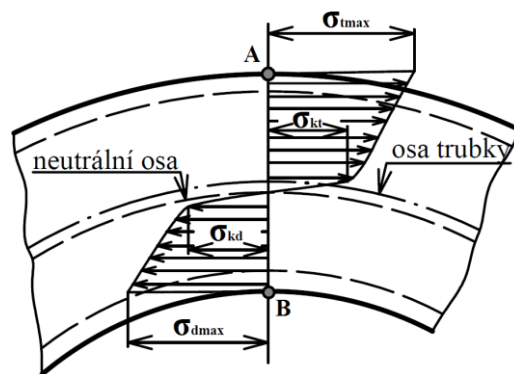
$$|\sigma_x| - |\sigma_c| = \sigma_k \quad (2.7)$$

kde:  $\sigma_k$  mez kluzu [MPa]

#### 2.4.1 Materiálové modely [22], [29], [31]

Přetvoření dosahuje svých maximálních hodnot v krajních vláknech trubky znázorněnými na obr. 6 body A, B. Tato místa jsou proto kritická pro vznik defektů. V bodech A, B je zároveň dosaženo maximálních napětí v osovém směru  $\sigma_o$ .

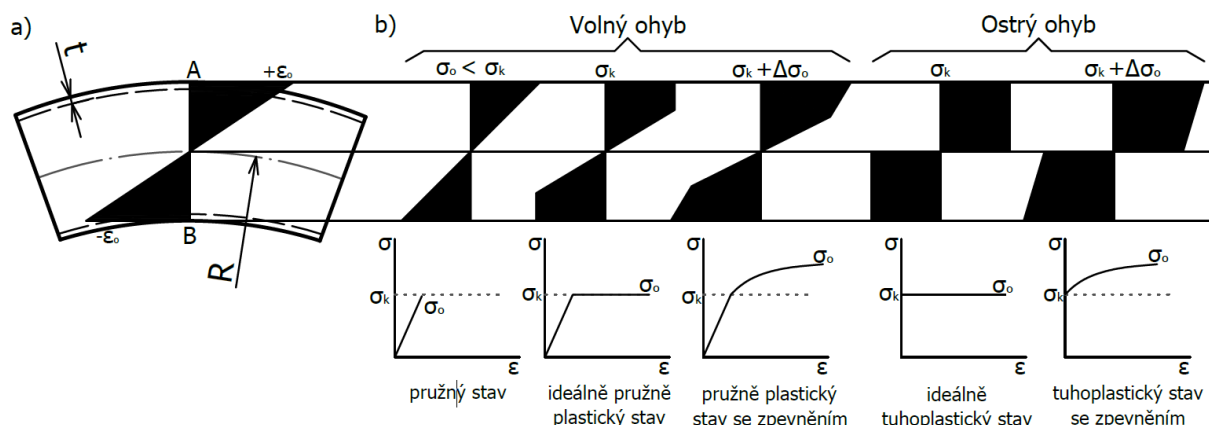
V trubce namáhané ohybovým momentem dochází nejdříve k pružným deformacím. Krajní vlákna vnějšího poloměru jsou namáhána největším tahovým napětím. Krajní vlákna na vnitřním poloměru jsou namáhána největším tlakovým napětím. Rozložení napětí v elastické části má lineární průběh (obr. 6), který mění charakter na neutrální ose. Při dalším ohýbání narůstá napětí. Po překročení meze kluzu  $\sigma_k$ , nastávají trvalé deformace. Plastická deformace se rozšiřuje směrem k ose a průběh napětí již není lineární. Jak lze pozorovat na obr. 7, výsledná napětí převyšují hodnotu napětí meze kluzu. To je způsobeno zpevňováním materiálu při tváření za studena.



Obr. 6 Rozdělení napětí [31]

Charakter průběhu osového napětí je závislý na poloměru ohybu R. Podle výsledného poloměru ohybu se vyskytují napěťové stavy s malou, či velkou plastickou oblastí. Osově napětí má ve skutečnosti složitý průběh, a proto se k usnadnění výpočtů aproximuje chování

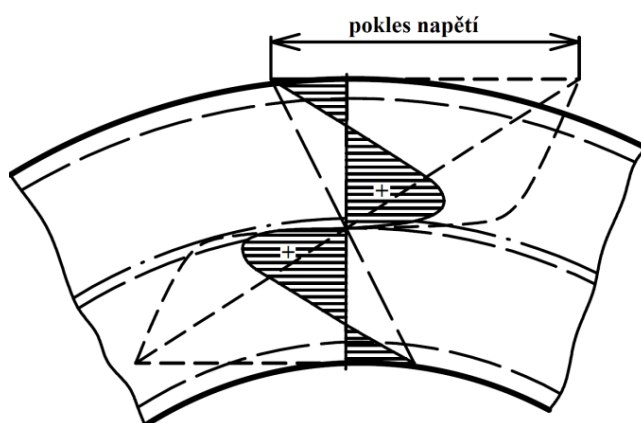
materiálu vhodným materiálovým modelem, viz obr. 7. Volba závisí na velikosti deformace trubky a míře zpevňování materiálu.



Obr. 7 Materiálové modely: a) průběh osového přetvoření, b) průběh osového napětí. [29]

## 2.4.2 Zbytková napětí [2],[31]

Pomine-li působení ohybového momentu, dojde k odpružení trubky. Momenty vnitřních sil se vyrovnají, to ale neplatí pro napětí v příčném průřezu. Odpružení je způsobeno vlastnostmi materiálu tvářeného za studena, jak je nadále objasněno v kapitole 2.6.4. Trubka se částečně napřímí o hodnotu pružné deformace. Vlákna na vnější straně se zkracují, naopak na vnitřní straně se prodlužují, úměrné tomu klesá napětí (obr. 7).



Obr. 8 Zbytkové napětí [31]

Nelineární průběh napětí při plastickém ohybu je označen modrou barvou. Červené rozložení značí zbytkové napětí. Jak je znázorněno, původně tahové napětí v krajním vláknu přejde po odlehčení do tlakového napětí.

## 2.5 Kritéria technologičnosti ohybu [29], [31], [47]

Prvotní informace o složitosti ohybu je možno zjistit vyhodnocením základních kritérií procesu. Ty posuzují obtížnost a zároveň dosažitelnou kvalitu ohybu. Mezi hlavní faktory patří relativní tloušťka stěny a relativní poloměr ohybu. Jak je zřejmé z tab. 2 tyto parametry nejdříve definují proces a následně určují realizovatelnost ohybu, či přímo predikují vznik defektů.

Tab. 2 Kritéria technologičnosti [29]

		Stupeň obtížnosti procesu		
		Nevhodné podmínky	Přijatelné podmínky	Optimální podmínky
Relativní tloušťka stěny		$\frac{t_0}{D_0} \leq 0,05$	$\frac{t_0}{D_0} = 0,075$	$\frac{t_0}{D_0} \geq 0,1$
$\frac{t_0}{D_0} \leq 0,1$	Tenkostěnné trubky			
$\frac{t_0}{D_0} > 0,1$	Tlustostěnné trubky			
Relativní poloměr ohybu		$\frac{R_{vnitřní}}{D_0} < 2,5$	$\frac{R_{vnitřní}}{D_0} = 2,5$	$\frac{R_{vnitřní}}{D_0} \geq 3$
$\frac{R_{vnitřní}}{D_0} \leq 6$	Ostrý ohyb			
$\frac{R_{vnitřní}}{D_0} > 6$	Volný ohyb			

**Minimální poloměr ohybu** - z hlediska výroby i proudění kapalin je výhodný ohyb větších poloměrů. Konstrukční řešení však kladou požadavky na zmenšování poloměrů. Trubky ohnuté na příliš malý poloměr praskají. Mezní hodnota poloměru, při jejímž překročení dochází k defektům, se nazývá minimální poloměr ohybu. Kritickým bodem je překročení napětí na mezi pevnosti.

Stanovení minimálního poloměru je závislé na mnoha faktorech: druhu materiálu, tažnosti, tloušťce stěny, metodě ohýbání i kvalitě povrchu. Vztah pro výpočet je například uveden v [47]. Výpočet se opírá o experimentálně zjištěné hodnoty. Vlivem více činitelů je výsledek značně ovlivněn praxí. Například navýšením tloušťky stěny lze dosáhnout menšího poloměru.

## 2.6 Defekty při ohybu trubek

Výskyt defektů je v praxi nevyhnutelným jevem. Defekty jsou často způsobeny nedodržením technologických parametrů. Významnou roli hrají geometrické parametry, materiál, zvolená technologie, použité nástroje a míra jejich opotřebení. Mnohé defekty jsou však průvodními jevy ohybu a není možné je vždy eliminovat. Existují však opatření, která snižují jejich míru na tolerovanou mez. V této kapitole jsou uvedeny čtyři nejčastější defekty zkoumané na ohnutých trubkách.

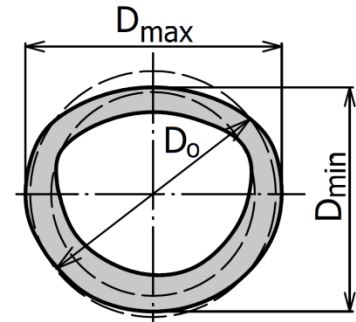
### 2.6.1 Zploštění průřezu – ovalita [8], [19], [20]

Ovalita je jeden ze základních defektů, kdy dochází ke zploštění průřezu. Vlivem silových účinků se původně kruhový průřez deformuje do složitých tvarů, často přirovnávaných elipse, jak je viditelné na obr. 9. K popsání této deformace existuje vícero vztahů. Výpočet koeficientu ovality je často definován výrobními podniky, nebo jejich zákazníky. Firmy rovněž stanovují přípustnou hodnotu ovality. Tolerovaná velikost defektu závisí na technických požadavcích na tvářené dílce a zkušenostech z provozu. Vztah (2.8) uvádí jeden z možných výpočtů koeficientu ovality:

$$K_o = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_0} \cdot 100 \quad (2.8)$$

- kde:  $K_o$  koeficient ovality [%]  
 $D_{max}$  maximální průměr deformované trubky [mm]  
 $D_{min}$  minimální průměr deformované trubky [mm]  
 $D_o$  výchozí průměr trubky [mm]

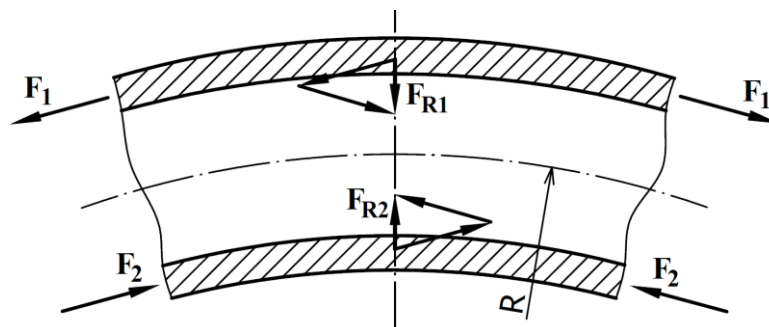
Zjištění hodnot maximálního a minimálního průměru je zřejmé z obr. 9.



Obr. 9 Ovalita průřezu [20]

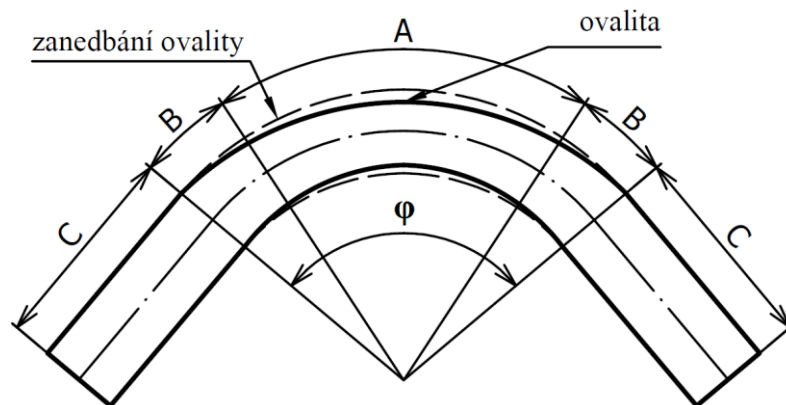
Vznik ovality lze vysvětlit při rozkladu vnitřních sil, za předpokladu zanedbání vlivu opěrného tlaku od nástrojů, které ke vzniku ovality přispívají. Ohybový moment vyvolává v materiálu tahová a tlaková osová napětí na vnější a vnitřní straně ohybu způsobená vnitřními silami  $F_1$  a  $F_2$ , jak je přehledně zobrazeno na obr. 10. Výslednicemi těchto sil jsou radiální síly, které vyvolávají zploštění.

Zplošťování je doprovázeno přesunem materiálu, jehož důsledkem je ztenčování stěny na vnějším poloměru a naopak spěchování v tlakové oblasti. Taková změna průřezu navyšuje napětí v materiálu. Z tohoto vyplývá, že při zvětšujícím se úhlu ohybu narůstají i radiální síly způsobující ovalitu.



Obr. 10 Rozklad sil v místě ohybu [29]

Experimentálně bylo zjištěno [20], že ovalita není rovnoměrná v podélném směru jak je vidět na obr. 11. Ohnutou trubku lze rozdělit na 3 části v závislosti na úhlu ohybu. Oblast rovnoměrné ovality (A), oblast nerovnoměrné ovality (B) a nezdeformovanou oblast (C). Nerovnoměrně deformovanou oblast lze vysvětlit působením sil od nástrojů na koncích trubky [25]. Blíže ke středu ohybu jsou tyto síly již zanedbatelné dle Sant-Venantova principu. V oblasti A působí pouze ohybový moment, proto lze očekávat konstantní ovalitu větších hodnot než v oblasti B jak potvrzuje Ghafoor [8]. Lze tedy říci, že se ovalita navyšuje od krajních hodnot po maximum ve střední části.



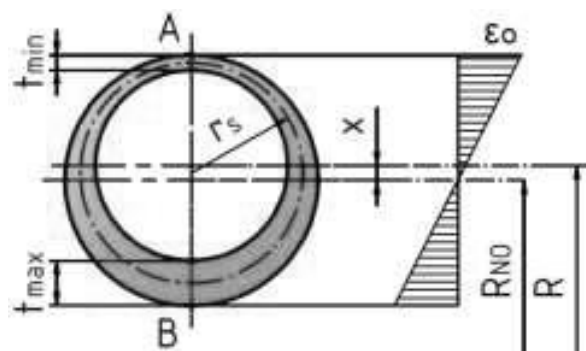
Obr. 11 Nerovnoměrné rozložení ovality [20]

Studie [20] definovala konstantní oblast A pro úhel ohybu:

$$\varphi_A \in \left\langle \frac{\varphi}{4}, \frac{3\varphi}{4} \right\rangle \quad (2.9)$$

### 2.6.2 Ztenčení stěny [2], [29], [30]

Změnou křivosti narůstají při ohybu tahová napětí na vnější straně trubky. Současně se silovým působením dochází k přesunu materiálu z tahové do tlakové oblasti na vnitřní straně ohybu (obr. 12), což má za následek zvýšenou tendenci ke ztenčení stěny. Při extrémní hodnotě napětí na mezi pevnosti by v tomto místě došlo k vyčerpání plasticity a vzniku trhliny. Proto je potřeba věnovat pozornost ztenčování obzvláště u trubek namáhaných vnitřním tlakem.



Obr. 12 Ztenčení stěny [29]

Vztah pro výpočet minimální tloušťky stěny v místě A například uvádí [30] v následujícím tvaru:

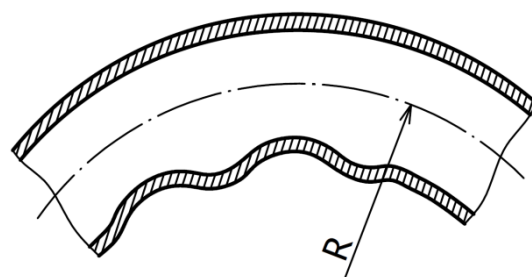
$$t_{min} = \left( 1 - \frac{2k + 1}{2k \cdot (4k + 2)} \right) \cdot t \quad (2.10)$$

kde:  $t_{min}$  minimální tloušťka stěny [mm]  
 $k$  střední relativní poloměr ohybu [-]  
 $t$  výchozí tloušťka stěny [mm]

Projev ztenčení se dá efektivně zmírnit pouze přidáním axiálního tlaku na trubku. Proces je však nutné plně řídit, neboť nastává riziko zvlnění, či ztráty stability na vnitřní straně ohybu.

### 2.6.3 Zvlnění stěny [19], [29], [33]

Zvlnění je defekt způsobený ztrátou stability trubky, kdy na vnitřní stěnu bylo vyvinuto nadměrné zatížení. Defekt vzniká na vnitřním poloměru ohybu (obr. 13), jakmile ztrácí stěna kontakt s nástrojem. Ke zvlnění dochází především při ohybu tenkostěnných trubek velkých průměrů.

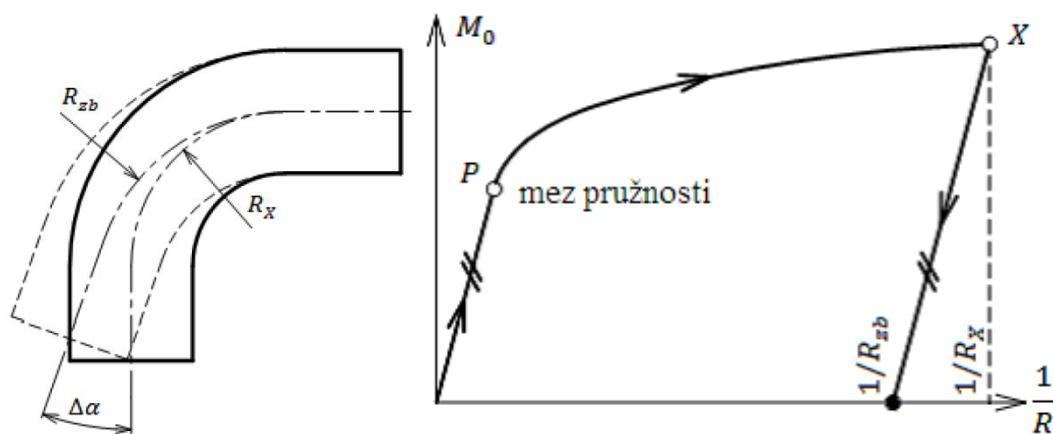


Obr. 13 Zvlnění stěny [18]

Důsledkem zvlnění je pokles pevnosti, kvality i životnosti trubky. Zvlnění navíc nadměrně opotřebovává nástroje, může je poškodit a přerušit tím celý proces. Charakter zvlnění je popsán počtem, roztečí a výškou vln. Tolerované úchytky nepřesností jsou definovány podnikovými normami. Ve speciálních případech je použita upravená matrice k docílení kontrolovaného zvlnění ohybu. Jakákoliv forma zvlnění není tolerována u trubek značně cyklicky namáhaných, vystaveným vibracím, či změnám provozních tlaků. Výskyt zvlnění je možné potlačit použitím výplní, trnů.

### 2.6.4 Odpružení [10], [20]

Odpružení po ohybu je zapříčiněno primární zákonitostí plastické deformace. Celková deformace dílu se skládá ze dvou složek. Díl se zpočátku deformuje elasticky, následuje plastická deformace, která utváří finální křivost. Po odlehčení ohybového momentu se elastická část přetvoření vytrácí. Princip je zřejmý na obr. 14.



Obr. 14 Odpružení po ohybu a) zbytkový poloměr, b) elastická část deformace [29]

Zbytkový poloměr  $R_{zb}$  udává konečnou hodnotu poloměru ohybu. Změna poloměru je ovlivněna ohybovým momentem a vlastnostmi materiálu. Výpočet je dán vztahem:

$$R_{zb} = \frac{R_x}{1 - \frac{M_x \cdot R_x}{E \cdot J_x}} \quad (2.11)$$

kde:  $R_{zb}$  zbytkový poloměr ohybu [mm]  
 $R_x$  poloměr ohybu před odlehčením [mm]  
 $M_x$  ohybový moment před odlehčením [Nmm]  
 $E$  modul pružnosti materiálu [MPa]  
 $J_x$  kvadratický moment průřezu [mm<sup>4</sup>]

Velikost odpružení lze stanovit přímo úhlem odpružení  $\Delta\alpha$ . Vztah (2.12) vychází z předpokladu rovnoměrné délky tangenciální neutrální osy před i po odlehčení.

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha' = \frac{M_x \cdot R_x}{E \cdot J_x} \cdot \alpha \quad (2.12)$$

kde:  $\Delta\alpha$  úhel odpružení [°]  
 $\alpha$  úhel ohybu před odlehčením [°]  
 $\alpha'$  úhel ohybu po odlehčení [°]

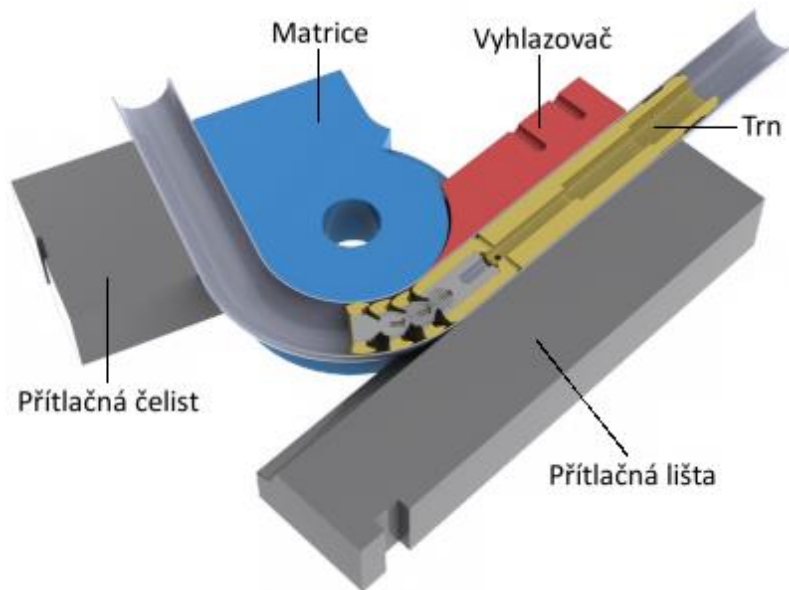
Článek [20] dokládá závislost odpružení na míře ovality. Zploštěním průřezu se přibližuje vnější poloměr ohybu k ose a klesá tangenciální napětí. Tato změna má za následek zvýšený podíl elastické deformace, která po odlehčení zvětší úhel odpružení.

## 2.7 OHYB NAVÍJENÍM [29], [39]

V současné době existuje velké množství metod ohýbání trubek, z nichž nejrozšířenější metodou je ohyb navíjením. Jedná se o rotační typ ohybu využívaný zejména ve strojní výrobě. Ohyb navíjením je velmi univerzální a zároveň přesná metoda. Ohýbají se trubky kruhového či pravoúhlého průřezu.

Navíjením se běžně ohýbají trubky o průměru 12-250 mm až do úhlu ohybu 180 °. Metoda umožňuje ohyb velmi malých poloměrů (blíživých se průměru trubky) a to i tenkostěnných trubek. Předpokladem jsou však adekvátní nástroje, k ohýbacímu zařízení, zaručující opakovatelnost výroby.

Ohyb je realizován rotací matrice, ke které je připevněna trubka pomocí upínací čelisti. Schéma je patrné na obr. 15. Přítlačná lišta dotlačí trubku do drážky matrice, přičemž má rovněž odpovídající vybrání. Přítlačná lišta může být při procesu pevně uchycena nebo je pohyblivá spolu s ohýbanou trubkou. Pevná přítlačná lišta musí odolávat smýkání ohýbané trubky. Zato pohyblivá lišta poskytuje lepší vedení a eliminuje tření na styčných plochách.



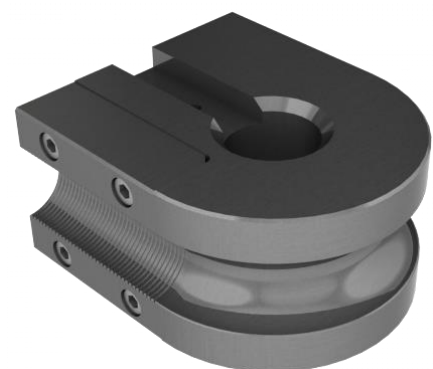
Obr. 15 Ohyb navíjením [39]

### 2.7.1 NÁSTROJE [24], [29], [35], [39]

Nástroje používané pro ohýbání trubek jsou podobné jako při ohybu tyčí. Základní sestava nástrojů je sestavena z matrice, přítlačné lišty a upínací čelisti. Nástroje pro trubky vyžadují vyšší přesnost drážek k vedení a podpoře průřezu během ohybu. K provedení technologicky náročných ohybů a dosažení lepší kvality je potřeba použít dalšího příslušenství. Na obr. 15 je v trubce vložen segmentový stabilizační trn k redukci zploštění. Dále je zobrazena vyhlazovací lišta, která zamezuje zvlnění. Při upnutí tenkostěnných trubek k matrici se do volného konce vkládá svorný čep, zabraňující zborcení stěn. V následující části bude blíže představena konstrukce jednotlivých nástrojů.

**Matrice** – ohýbací matrice je nejdůležitější nástroj v sestavě. Matrice vymezuje výsledný rádius ohybu. Tvar a velikost nástroje je úměrná průměru trubky, poloměru ohybu a způsobu uchycení. Matrice má vyfrézovanou drážku. Hloubka drážky odpovídá 55 % vnějšímu průměru trubky. Šířka by měla splňovat rozměr průměru trubky s přídavkem 10 % tloušťky stěny.

Matrice je uchycena ke stroji průchozím hřídelem, nebo pomocí příruby. Vedení rotace se realizuje unášejícím perem.



Obr. 16 Ohýbací matrice [39]

Při rotaci nástroje podpírá drážka ohýbaný dílec na vnitřní straně ohybu a určuje výsledný tvar ohýbané trubky. Na obr. 16 je patrná přímá část drážky, která spolu s upínací drážkou svírá trubku. Tato část bývá často zhotovena samostatně a připevněna k tělu matrice. Upínací část je zpravidla povrchově upravena pro pevnější sevření. Drážka se zdrsňuje pískováním, karbidovým nástřikem, drážkováním či vroubkováním. Čím hrubšího povrchu dosáhneme,

tím je možné zkrátit délku čelistí. Nevýhodou je zanechání otisků na trubce. Proto se v praxi užívá i hladký povrch, který zachová vzhledovou kvalitu povrchu.

Při navrhování matrice se zvažuje potřebná délka úchopu, faktor odpružení a stupeň přesnosti výroby. Úhlové odpružení je kompenzováno mírným přiohnutím součásti. Radiální odpružení se kompenzuje podbroušením rádiusu na hodnotu menší než požadovanou.

Matrice se zpravidla vyrábí z nástrojové oceli, která se tepelným zpracováním vytvrzuje na tvrdosti 58-62 Rockwella. Drážka se nitriduje k zajištění tvrdého, otěruvzdorného povrchu.

Při strojním ohybu je možné skládat matrice do zásobníku (obr. 17). Při automatizovaném provozu je umožněno ohýbat na více poloměrů, nebo jak je předvedeno, využít tvarových čelistí pro následující krátké úchopy. Dalším speciálním provedením je matrice pro záhybový ohyb na obr. 18. Vrubovaná matrice kontroluje zvlnění pro speciální aplikace při tváření za tepla.



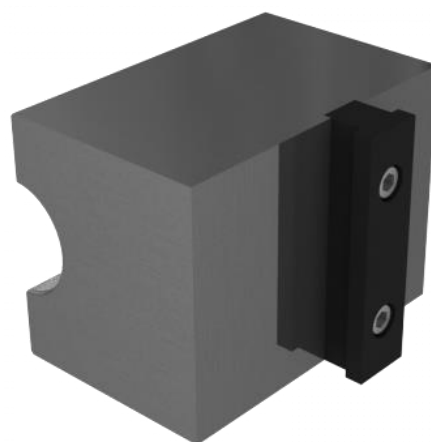
Obr. 18 Matrice pro záhybový ohyb [40]



Obr. 17 Matrice v zásobníku [34]

**Upínací lišta** – je přímý nástroj s vyfrézovanou drážkou na jednom čele (obr. 19). Upínací lišta přenáší přidržovací sílu nutnou k uchycení trubky, aniž by došlo k prokluzu při procesu navíjení. Profil nástroje odpovídá trubce a je upevněn tak, aby mohl být souměrně přitlačen k upínací části matrice.

Délka lišty je kritická při konstrukci. Drážka musí zajistit pevný úchop trubky. Délka je specifikována průměrem trubky, tloušťkou stěny, druhem materiálu, povrchovou úpravou. Obvykle je délka rovna trojnásobku průměru trubky. Při kratším provedení se drážka zdršňuje. Rozměry a povrchová úprava odpovídá upínací části na matrici.



Obr. 19 Upínací lišta [39]

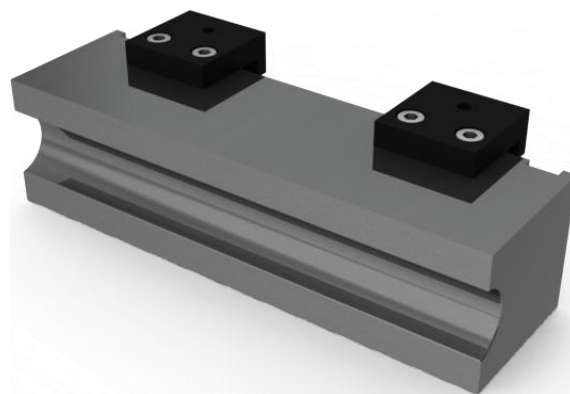
Přidržovací tlak je ovlivněn rádiusem ohybu. U tenkostěnných trubek by svírající tlak často vyvolal zborcení průřezu. Nadměrné silové působení je kompenzováno svorným čepem. Čepy se umísťují do volného konce a tvoří tak výplň trubek. U blízko navazujících ohybů nezůstává přímá plocha k uchopení při další operaci. V těchto případech svírá trubku jed noučelová tvarová lišta. Tyto speciální lišty přesně kopírují tvar předešlého ohybu.

**Přítlačná lišta** – vymezuje pozici dílu a působí jako opora pro volný konec trubky. Mezitím co se otáčí matrice, tlačí lišta (obr. 20) v tangente ohybu na trubku k zajištění požadovaného tvaru. Přítlačné lišty se zhotovují ve 3 provedeních:

- pohyblivá – nejběžnější použití. Pohybuje se během ohybu současně s trubkou,
- pevná – nepohyblivá. Vůči matrici zůstává pevně uchycena,
- rotační – rotující váleček s vyfrézovanou drážkou.

Pohyblivá lišta je preferovaná pro většinu operací. Volný kluz minimalizuje tření, redukuje zploštění a zaručuje lepší kvalitu ohybu. Pohyb lišty omezuje poškrábání vysoce leštěného, či natřeného dílu.

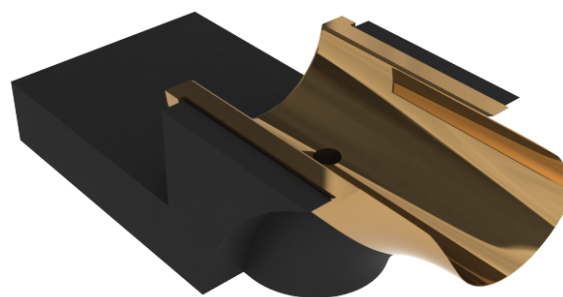
Hloubka drážky je rovna poloměru trubky mínus 10 % tloušťky stěny. Šířka se rovná poloměru trubky plus 15 % tloušťky stěny. Délka lišty je odvozena rádiusem ohybu a úhlem ohybu, jelikož se lišta posouvá s navíjenou trubkou. Lišty se běžně vyrábějí z měkké, nebo lité oceli. Nástrojová ocel se volí ve velkosériové výrobě s abrazivním materiálem. Povrch se nevytvzuje vyjma zrychleného opotřebení nástroje.



Obr. 20 Přítlačná lišta se závěsy [39]

**Vyhlazovací lišta** - je jeden z přídavného příslušenství ke stroji. Vyhlazovací lišta se užívá k zamezení vzniku zvlnění na vnitřní straně ohybu. Uplatňuje se především při ohybu tenkostěnných trubek.

Vyhlazovací lišty se nejčastěji vyrábí z hliníkových bronzů. Na obr. 21 je zobrazen skládaný nástroj s výměnnou vložkou. Měkký materiál je upřednostněn při ohýbání ocelových trubek. Tenký volný konec by se totiž mohl snadno ulomit.



Obr. 21 Vyhlazovací lišta s výměnnou vložkou [39]

**Stabilizační trn** - je vkládán do trubky jako podpora stěny proti zplošťování trubky při navíjení. Trn zároveň redukuje zvlnění na vnitřní straně. Další funkcí je polohování trubky. Ustavení trnu má přitom významný vliv na jeho správnou funkci. Největší průměr trnu se umísťuje vždy za bod ohybu. Míra přesazení závisí na parametrech trnu a tabulkově je výrobci doporučována na základě experimentů. Trn je konstruován v různých provedeních:

- jednoduchý trn,
- tvarový trn,
- segmentový kuličkový trn (obr. 22).



Obr. 22 Segmentový trn [39]

**Kleština** – součástí podávacího mechanismu stroje je kleština. Kleština slouží k uchopení vstupního materiálu na jednom konci a přesnému polohování polotovaru. Jako vložka je v podavači obměňována v závislosti na průměru vstupního materiálu. Kleština manipuluje s trubkou i během ohybu a vytváří dodatečnou oporu jejím vedením. Konstrukce kleštin často respektuje použití trnů a svírá polotovar za vnější průměr. Kleštiny se vyrábí v provedení:

- dělené (obr. 23),
- pružinové.



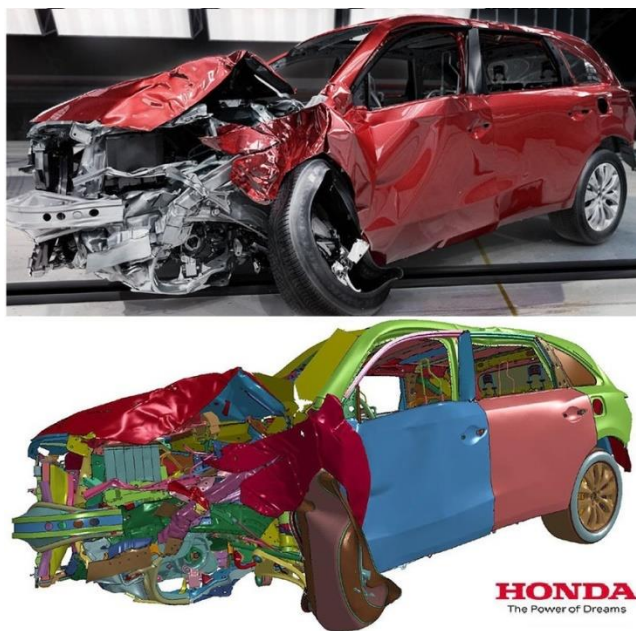
Obr. 23 Dělená kleština [39]

### 3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ [4]

Metoda konečných prvků, dále MKP, je jednou z numerických metod používaných v technické praxi. Numerické metody popisují reálný systém pomocí modelu. Na zjednodušeném modelu simulují okolní vlivy a okrajové podmínky procesů. Simulacemi technologických procesů jsou získávány různorodé analýzy. Na základě analýz se řeší procesní problémy výroby, nebo se optimalizuje řešení.

Metoda konečných prvků (angl. Finite Element Method, FEM) rozděljuje těleso na konečný počet prvků. Prvky zaujímají definovaný tvar a uchovávají si vlastnosti. Prvky tvoří na modelu síť, která se deformuje současně s modelem. Vyhodnocením deformace jednotlivých prvků se získávají údaje o dalších zkoumaných veličinách jako např.: napětí, přetvoření, teplotě, atd.

MKP vznikla v padesátých letech minulého století na základě požadavku kosmického průmyslu k získání výkonného výpočetního nástroje. Po uvedení do civilního sektoru se metoda rozšířila do mnoha oblastí, včetně průmyslových. Rozvoj je spjat s rostoucí výpočetní kapacitou počítačů. Obecná matematická formulace umožňuje řešit jak úlohy mechaniky těles či soustav, tak i problematiku proudění kapalin a plynů, šíření tepla, elektromagnetiky, meteorologie, apod. MKP je v současnosti považována za nejefektivnější numerickou metodu (obr. 24) matematicky popsatelných fyzikálních problémů.



Obr. 24 Porovnání přesnosti simulace s crash testem vozidla Honda [45]

#### 3.1 Diskretizace [4], [12], [42]

MKP - název metody zdůrazňuje, že pracuje s prvky konečných rozměrů. To je základní myšlenkou metody. Na rozdíl od analytických přístupů, které aplikují zobecněnou silovou rovnováhu na nekonečně malý element. MKP řeší úlohy po částech, přičítá dílčí výsledky prvků s konkrétními polohami. Výsledek je kombinací známých funkcí a neznámých parametrů.

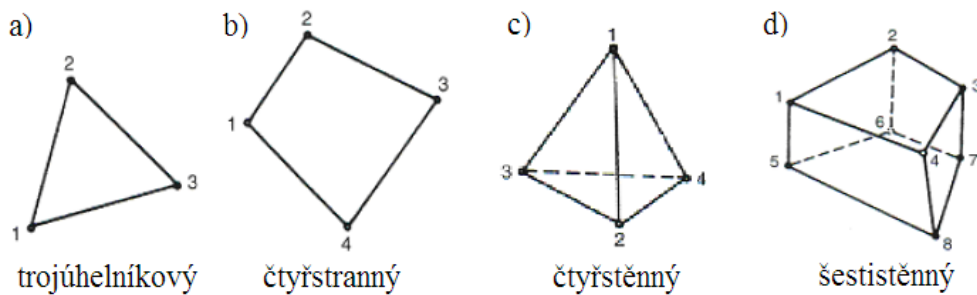
Primárním krokem je nahrazení mechanické soustavy konečnoprvkovou sítí, tzv. diskretizace. Tento termín označuje nahrazení spojitého kontinua systémem bodů. Nepřímo vyjádřeno, míru zjednodušení řešené oblasti. Je zřejmé, že míra diskretizace, přímo souvisí s přesností výpočtu. Pro dosažení relevantních výsledků musí být geometrie vhodně reprezentována prvky. Výpočetní programy nabízejí automatické generátory sítí a také několik možností typů prvků. Dělení prvků však není jednoznačné a je ovlivněno technickými zkušenostmi řešitele. Je třeba analyzovat kritická místa pro danou aplikaci a v místě největších očekávaných přetvoření zjemňovat síť. Prvky lze dělit dle několika kritérií:

a) dle dimenze úlohy:

- 1D prvek (prutový),
- 2D prvek (plošný) – trojúhelníkový prvek, čtyřúhelníkový prvek,
- 3D prvek (tělesový) – čtyřstěn (tetraedr), pětistěn (pentaedr), šestistěn (hexaedr), skořepinový prvek (shell).

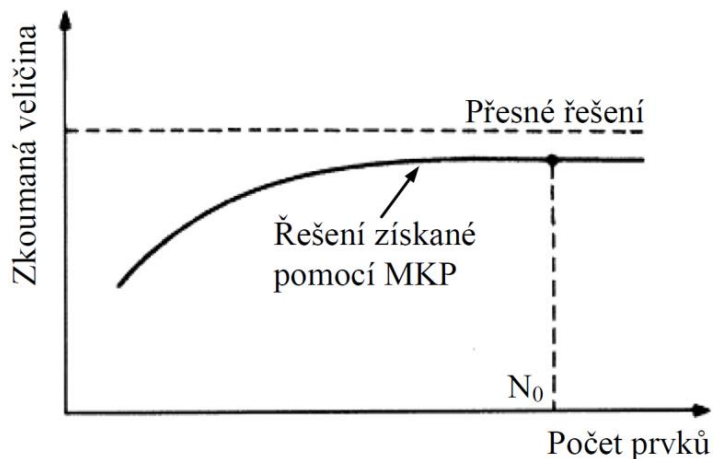
b) dle počtu uzlů:

- lineární prvky – nosníkový prvek (2 uzly), trojúhelníkový (3 uzly), čtyřúhelníkový (4 uzly), čtyřstěn (4 uzly), pětistěn (5 nebo 6 uzlů), šestistěn (8 uzlů), skořepinový (4 uzly). Znáznorněny na obr. 25,
- kvadratické prvky – nosníkový (3 uzly), trojúhelníkový (9 uzlů), čtyřúhelníkový (8 uzlů), čtyřstěn (10 uzlů), pětistěn (13 nebo 15 uzlů), šestistěn (20 uzlů), skořepinový prvek (8 uzlů).



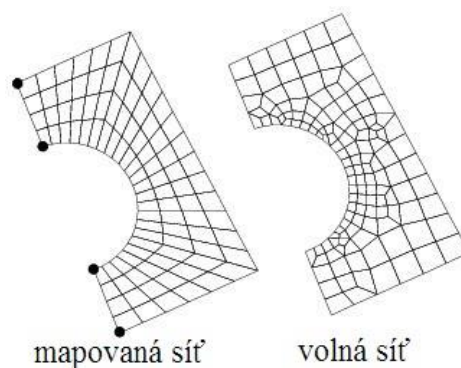
Obr. 25 Lineární prvky [4]

Prvky lze ve zvolené dimenzi volně kombinovat. S cílem dosáhnout optimálního popisu geometrie při nízké výpočtové náročnosti. Mezi proměnné faktory při definici sítě patří typ, tvar ale také velikost, či počet prvků. Velikost elementu koresponduje s celkovým počtem prvků sítě. Více elementů znamená větší přesnost. Tato zákonitost má však omezenou platnost. Pro každou úlohu existuje kritický počet prvků (uzlů), nad kterým přesnost zůstává nadále konstantní, což dokládá obr. 26.



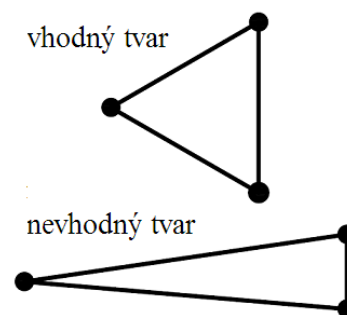
Obr. 26 Závislost počtu prvků na dosažené přesnosti [4]

Přesnost je velkou mírou ovlivněna tvarem prvku. U rovinných úloh je zpravidla použit trojúhelníkový prvek vzhledem k rovnoměrným průběhům napětí a přetvoření. Není však příliš přesný ve srovnání s ostatními 2D prvky stejné velikosti (požadavek na zhušťování sítě). Menší přesnost se projevuje v oblastech ohybové napjatosti. Nejen v takových případech je vhodné aplikovat tvarově nadřazený prvek, tj. čtyřúhelník. U trojrozměrných těles je při automatickém generování sítě standardně aplikován čtyřstěnný prvek (obr. 25), který vychází z trojúhelníku. Procesor, po zadání velikosti prvku, automaticky diskretizuje tělesa a utváří volnou síť (free mesh). Při manuální aplikaci sítě uživatel dělí řešenou oblast na suboblasti, které vyhovují rozdělení na šestistěny. Takto sestavená síť je označena jako mapovaná (mapped mesh). Nanesením mapované sítě se snižuje počet vygenerovaných prvků, a tím se snižují výpočetní nároky. Porovnání volné a mapované sítě pro rovinný případ je zobrazen na obr. 27.



Obr. 27 Způsoby nanesení sítě na plošný prvek [44]

Prvky se během výpočtu deformují dle zatěžování. Ideální tvar prvku je hodnocen například velikostí vnitřních úhlů, viz obr. 28. Nadměru deformovaný prvek lokálně degraduje přesnost. Pro obnovení vlastností deformované sítě má velký význam metoda remeshingu, která během výpočtu nanáší novou nedeformovanou síť.



Obr. 28 Deformace prvku [4]

### 3.2 Napět'ově-deformační analýza [7], [15], [21]

Simulace metodou konečných prvků zkoumá chování zatěžovaného systému v závislostech na okolních podmínkách. Metoda je primárně uplatňována při numerických řešeních mechaniky poddajných těles. Soustavy těles jsou definovány geometrickými a materiálovými modely. Okolní vlivy zahrnují zatěžující působení a zavazbení těles soustavy.

Systém je rozdělen na konečný počet prvků s hraničními uzlovými body, jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole. Sledovaná odezva systému je prvotně vypočtena pro uzlové body a z nich druhotně dopočtena pro libovolné body prvků. Pro oblast tváření má význam především napět'ově-deformační, popř. teplotní analýza. V případě napět'ově-deformační analýzy figuruje 15 neznámých hodnot:

- složek posuvů ( $u, v, w$ ),
- složek přetvoření ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ),

- složek napětí ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ).

K určení neznámých parametrů by bylo třeba 15 rovnic. Rovnice se postupným dosazováním a eliminací omezují na nezávislé neznámé parametry jedné skupiny, což zjednodušuje výpočtovou náročnost. Dle osamostatněných neznámých složek rozlišujeme přístupy:

- silový – neznámé složky napětí,
- deformační – neznámé složky posuvů,
- rychlostní – neznámé pole rychlostí.

Nejpoužívanější variantou přístupu je deformační řešení. Výpočet složek posuvů je proveden Lagrangeovým variačním přístupem. Lagrange popisuje polohu částic splňujících geometrické okrajové podmínky a podmínky spojitosti tělesa. Z definovaných funkcí posuvů se uskuteční pouze ty, které dosahují minimálních hodnot potenciální energie.

Volba typu úlohy závisí na požadovaných výstupech. Po prvotní volbě typu úlohy se dále definuje dimenzionalita úlohy, symetrická zjednodušení a rychlost procesu. Z časového hlediska se MKP dělí na:

- a) statické úlohy,
- b) dynamické úlohy.

Oba typy úloh se dále dělí dle linearity. Lineární, či nelineární závislost vyjadřuje charakteristiku vnějšího zatížení, napjatosti, nebo přetvoření:

- a) lineární úlohy,
- b) nelineární úlohy.

### 3.3 Nelineární úlohy [9], [11], [12]

Použití metody MKP v oblasti tvářecích technologií zahrnuje řadu problematik. V oblasti plasticity neplatí lineární závislost síla-posuv. Analýzy tvářecích procesů, proto vyžadují inkrementální řešení. Komplexnost úloh nemusí vést k úspěšnému řešení. Chyby mohou být obsaženy v zadání, fyzikálních zákonitostech nebo nejednoznačném řešení. Nelineární chování soustavy je následujícího charakteru:

- a) materiálové nelinearity,
- b) geometrické nelinearity,
- c) kontaktní nelinearity.

Nelineární chování materiálu nastává při přechodu z pružného do plastického stavu. V elastické oblasti jsou materiálové vlastnosti popsány lineárně na základě Hookova zákona. Při překročení meze kluzu za splnění podmínek plasticity, nastává trvalá plastická deformace s nelineárním průběhem. Nelineární charakter je zřetelně popsán tzv. pracovními diagramy. Tahové, či tlakové zkoušky zachycují nelineární závislost napětí na přetvoření referenčních vzorků. Nelineární charakter je ovlivněn zpevňováním materiálu.

Geometrické nelinearity vznikají při velkých deformacích. Velké hodnoty posuvů mohou být navíc doprovázeny velkými přetvořeními. Při zvyšující míře přetvoření se více projevují vzájemné odchylky a projevuje se nelinearita mezi posuvy a přetvořeními. Kompenzace problematiky logicky spočívá v postupném řešení úlohy, po částech s aktualizací geometrie.

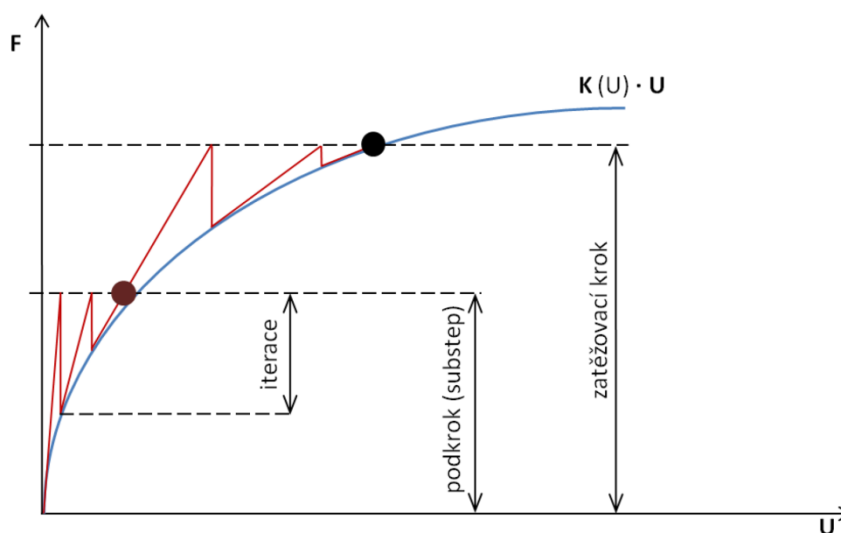
Kontaktní nelinearity, označované také jako kinematické nelinearity, jsou provázány s deformací struktur. Nelinearity vznikají, pokud se v průběhu zatěžování mění velikost a poloha styčných ploch. Rozdílné kontaktní oblasti mění okrajové podmínky a celkovou tuhost matice. Opět je proto žádoucí řešení úlohy po částech s průběžným přepočtem okrajových podmínek. K zabezpečení vzájemného nepronikání těles jsou kontaktním plochám přiřazeny kontaktní prvky. Prvky jsou dle výběru entit bodového, či plošného typu a je jim přiřazena míra poddajnosti. Problematika rovněž zahrnuje definici tření v místech kontaktu.

### 3.4 Algoritmy řešení [12],[27], [28]

Základní rovnice MKP lze řešit dvěma algoritmy výpočtů. Sestavování pohybových rovnic je spjato s jejich řešením a dělí se dle způsobu časové integrace na následující varianty:

- a) implicitní,
- b) explicitní.

Implicitní přístup řeší úlohu postupně po krocích. Po přírůstcích aktualizuje a počítá soustavy rovnic. Nepoužívanější metoda řešení je modifikovaná Newton-Raphsonova metoda. Celkové zatížení rozděljuje do více kroků a podkroků. Iterační proces v rámci jednoho podkroku opakovaně počítá dílčí výpočet do splnění podmínek konvergence. Graficky je nárůst zatížení zobrazen na obr. 29.



Obr. 29 Princip řešení modifikovanou Newton-Raphsonovou metodou [28]

Explicitní algoritmus má na rozdíl od implicitního řešiče pevně daný časový krok. Během jednoho kroku neprobíhají žádné iterace a je tak známá i doba výpočtu. Stabilita algoritmu je zajištěna při dostatečně malé délce časového kroku, závislého na hustotě sítě a rychlosti šíření vln prostředím. Srovnání charakteristik je přehledně uvedeno v tab. 3.

Tab. 3 Srovnání MKP algoritmů [27].

Algoritmus	Implicitní	Explicitní
Výhodné pro třídu problémů	statické a kvazistatické úlohy s mírnými nelinearitami (plasticita)	rychlé přechodové děje s výrazně nelineárním chováním
Vhodné aplikace	procesy tváření, analýzy napjatosti a přetvoření nástrojů	„crash“ testy, exploze, dynamické únosnosti konstrukcí
Charakter softwaru	komplikovanější programy, komunikace s vnější pamětí	jednoduchý kód, vše ve vnitřní paměti
Požadavky na paměť	velké	malé
Časový krok	velký (typicky $100 \div 1000x$ )	malý

### 3.5 Členění simulačního software [4], [13],[28]

V současné době existuje široká nabídka softwarů k numerickým simulacím. Pro technickou praxi jsou uzpůsobené specializované programy zaměřené na konkrétní technologie. Přináší jednoduché intuitivní ovládání s odpovídajícími analýzami procesů. V oblasti tváření například softwarů: PAM-STAMP, FormFEM, Deform, Forge.

Další skupinou jsou univerzální programy jako ANSYS, NASTRAN, ABAQUS. Tyto obsáhlé softwary nabízejí všestranné využití. Možnost detailního nastavení výpočetních analýz však vyžaduje hlubší znalosti problematiky. Složitější ovládání a zkušenosti s exportem výsledků.

Programy jsou zpravidla modulově uspořádány. Práce se simulacemi se dělí do etap:

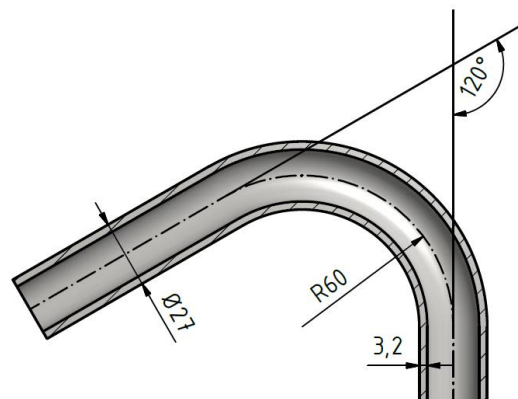
- a) preprocessing – příprava materiálového a geometrického modelu,
- b) processing (solver) – samotný výpočet, řešení rovnic,
- c) postprocessing – zobrazení a export výsledků.

Všechny fáze jsou mezi sebou provázány. Processing představuje numerické jádro, tělo programu. Pre-postprocessor zahrnuje grafické rozhraní programu k vytváření a úpravě modelu a zobrazování výsledků. Běžným požadavkem je spolupráce s CAD programy.

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

### 4.1 Rozbor zadání

Cílem diplomové práce je analyzovat proces ohybu trubek. Na základě analýzy výchozího stavu navrhnout optimalizaci procesu ve snaze snížit ovalitu ohýbaných trubek, jakožto jeden z nežádoucích defektů vyskytující se při ohýbání. Firmou byl vznesen požadavek k analýze ohybu trubky (obr. 30), jejíž specifikace je uvedena v tab. 4.



Tab. 4 Zadané parametry ohybu.

Obr. 30 Zadaný ohyb

Trubka			poloměr ohybu - <b>R</b>	úhel ohybu - <b>φ</b>
materiál	průměr - <b>D<sub>0</sub></b>	tloušťka stěny - <b>t<sub>0</sub></b>		
34MnB5	27 mm	3,2 mm	60 mm	120°

Strojový park firmy zahrnuje CNC ohýbací stroj Wafios RBV 60 ST, na kterém je možné realizovat uvedený ohyb. Počítačem řízená ohýbačka je zobrazena na obr. 31. Ohyb je prováděn rotací ohýbací hlavy, na které je upevněna matrice včetně upínací čelisti. Jedná se tedy o ohyb technologií navíjení přiblížený v teoretické části práce. Ohýbací hlava může být osazena nástroji na obou koncích k provedení pravého, či levého ohybu tyčí nebo trubek. K provedení zadaného ohybu stroj plně vyhovuje. Maximální technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 31 Ohýbací zařízení Wafios RBV 60 ST [41]

Tab. 5 Technická data ohýbačky Wafios RBV 60 ST [41].

Wafios RBV 60 ST							
Kapacita stroje		Maximální parametry ohybu		Maximální rychlosti		Přesnost	
Ohybový moment	8 kNm	Průměr trubky	35 mm	Podavače	1700 mm/s	Podavače	± 0,05 mm
Přidržovací síla	140 kN	Délka trubky	3500 mm	Rotace	450 °/s	Rotace	± 0,05 °
Axiální přítlak	50 kN	Úhel ohybu	195°	Ohybu	180 °/s	Ohyb	± 0,05 °

Technologičnost ohybu – zhodnocení technologičnosti zadaného ohybu. Vyhodnocení relativní tloušťky stěny:

$$\frac{t_0}{D_0} = \frac{3,2}{27} = 0,12 > 0,1$$

Poměr tloušťky stěny vůči výchozímu průměru hodnotí trubku jako tlustostěnnou, jelikož hodnota převyšuje 10 %. Při vyhodnocení relativního poloměru ohybu je třeba brát v potaz fakt, že výchozí poloměr ohybu je vztažen k ose trubky. Poloměr ve vzorci počítá s vnitřním poloměrem matrice, a proto je hodnota ponížena o poloměr trubky:

$$\frac{R_{\text{vnitřní}}}{D_0} = \frac{R - \frac{D_0}{2}}{27} = \frac{60 - 13,5}{27} = 1,7\bar{2} \leq 6$$

Dle literatury [29] se jedná o ostrý ohyb. Tab. 2 vyhodnocuje kombinaci parametrů jako přijatelné podmínky procesu. Stále však lze předpokládat výskyt defektů.

## 4.2 Návrhy ke snížení ovality

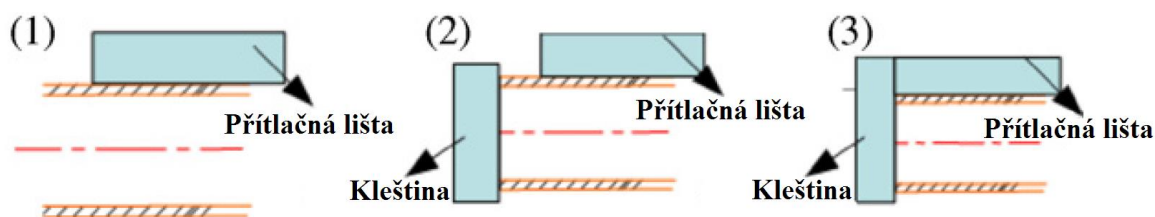
V této kapitole budou představeny způsoby, jak lze ovalitu ovlivnit, respektive snížit.

### 4.2.1 Axiální tlaková síla [17], [29]

Jednou z možností jak zmenšit zploštění je přidavným tlakovým působením na trubku. Axiální silové působení tlačí více materiálu do ohniska deformace. V kritickém místě se snižuje podíl tahového napětí. Nedochází k takovému ztenčování stěny. Proto je vhodné uplatnit přítlak u ohybů na ostré poloměry, kde hrozí riziko přílišného ztenčení a vzniku trhlin. Metoda je vhodná pro strojní ohyb. Nejlepších výsledků dosahuje v kombinaci s indukčním ohřevem.

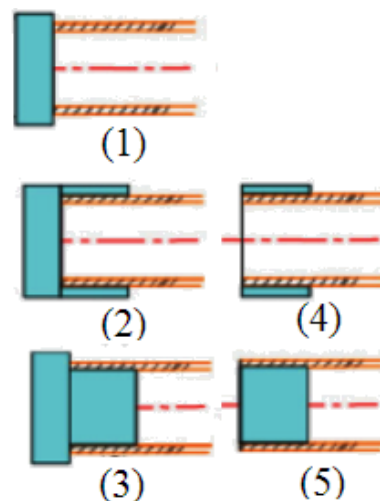
Článek [17] dokládá pozitivní účinky na proces. Vliv tlakové síly jednak snižuje koeficient ovality a současně snižuje ztenčování stěny na vnějším poloměru trubky.

Nabízí se několik možností, jak vyvodit přidavnou axiální sílu. Dodatečnou axiální sílu lze docílit přítlakem kleštiny a přítlačné lišty. Obr. 32 naznačuje kombinace obou možností. V prvním případě poskytuje přítlačnou sílu pouze přítlačná lišta třením vzniklým v kontaktu s trubkou. V druhém případě působí navíc i tlačný čep (kleština). Regulace tlaku na konci trubky generovaná čepem je nezávislá na pohybu lišty. Třetí případ sjednocuje rychlost kleštiny a přítlačné lišty. Synchronní pohyb vykazuje dle provedených experimentů nejlepších výsledků. [17]



Obr. 32 Způsoby vyvození axiální tlakové síly [17]

Obr. 33 uvádí způsoby uchopení trubky kleštinou. První model vyvozuje tlak přímo na volný konec trubky. Stejně jako v případech 2 a 3, avšak s větší oporou v radiálním směru. Modely 4, 5 vyvozuje tlak pouze třením ve styku s trubkou. Možný prokluz v těchto případech limituje tlačnou sílu. Li a kolektiv [17] analyzovali vhodnost modelů při 90° ohybu trubky o vnějším průměru  $D = 38$  mm, tloušťce stěny  $t_0 = 1$  mm, poloměru ohybu  $R = 57$  mm. Porovnání pěti modelů je provedeno podle změn tloušťek stěn v tab. 6. Značný efekt oproti výchozímu stavu je patrný v případech 1, 2 a 3. U těchto modelů je trubka tlačena axiálně. Nejlepší výsledek je dosažen s třetím modelem, který poskytuje trubce největší oporu.



Obr. 33 Způsoby úchopu kleštinou [17]

Limitním kritériem pro vyvození přitlačné síly na trubku je ztráta vzpěrné stability, uskutečněná zvlněním vnitřní stěny před místem ohybu.

Tab. 6 Vliv způsobu uchopení trubky kleštinou na změnu tloušťky stěny [17].

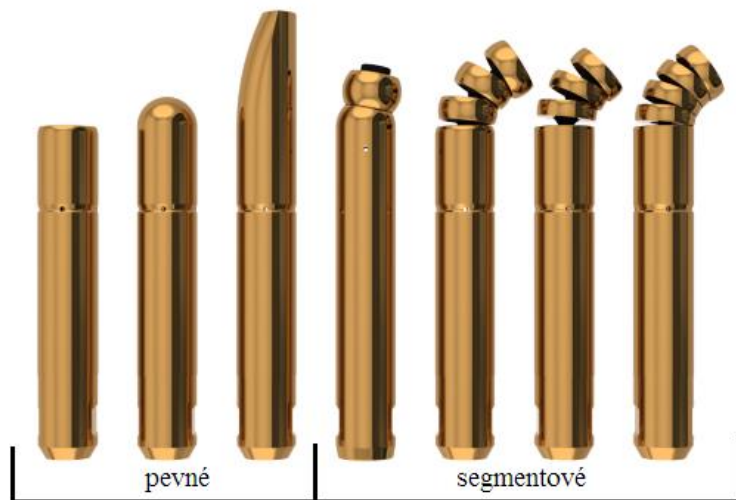
model úchopu	maximální ztenění stěny [%]	maximální spěchování stěny [%]	efekt
bez přitlaku	20,21	27,7	-
1	16,7	26,1	značný
2	16,65	26,1	značný
3	16,62	25,9	značný
4	19,52	27,6	minimální
5	19,72	28,0	minimální

#### 4.2.2 Výplně [17], [29]

Vyplnění dutiny trubky před ohybem je další přístup potlačující vznik zploštění. Výplně se používají:

- tuhé,
- tekuté,
- sypké,
- či mechanické.

Tuhá plnidla jsou vhodná pro krátké dílce větších průměrů. Tato tuhá lehce tavitelná plnidla se odstraňují výplachem horké vody. Tekuté výplně v podobě hydraulických olejů jsou vhodné především pro dlouhé tyče. Trubky musí být opatřeny šroubením pro upevnění ventilů. K plnění se využívá jednoúčelové zařízení. Trubky jsou tlakovány až na 40 MPa. Mezi sypké výplně se řadí jemnozrný sklářský písek, nebo ocelové kuličky malých průměrů. Oba konce musí být opět utěsněny zátkou. Nevýhodou při použití ocelových kuliček je vznik důlků na vnitřní stěně. Mechanické výplně se používají u kratších dílců relativně větších průměrů. Jde např. o hustě vinuté pružiny, polyuretanové válečky, silonové ohebné vložky a kovové stabilizační trny. Ve strojní výrobě jsou v současné době přednostně využívány kovové trny, stručně představené v kapitole 2.7.1.



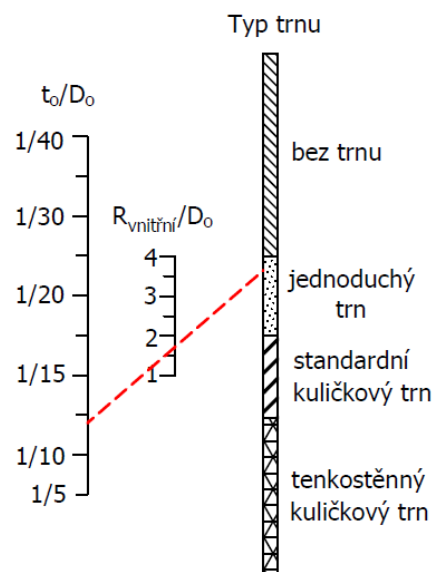
Obr. 34 Kovové trny [39]

Nabídka stabilizačních trnů je široká (obr. 34). Konstrukčně jednoduché trny jsou pevné kolíkové trny. Případně pevné s tvarovanou hlavou. Trny složené ze segmentů jsou určeny pro tenkostěnné trubky. Čím je stěna trubky tenčí, tím jsou kulové segmenty uspořádány těsněji. Segmenty jsou tenčí s větším vybráním k větší podpoře stěny ohýbané části. Segmentové trny kladou vyšší nároky na přesnost kvůli těsnému uložení v trubce.

Stabilizační trny jsou primárně určeny pro tenkostěnné trubky. Prvotní otázkou tedy je, zda je aplikace trnu pro zadaný ohyb vhodná. K orientačnímu posouzení slouží nomogram na obr. 35. Z nomogramu je patrné, že čím je poměrná tloušťka stěny nižší, tím je vhodnější aplikovat segmentový trn. Ke stanovení vhodného trnu konkrétních parametrů slouží i tabulky vydané výrobcí, které případně doporučí i vyhlazovač.

Červená čárkovaná čára v nomogramu označuje vhodnost užití trnu pro zadaný ohyb. Doporučení hraničí na možnostech použít jednoduchý trn, či trnu nevyužít vůbec. Volba je na posouzení technologa. Aplikace trnu je však komplexní rozhodnutí ovlivňující celý proces s několika úskalími:

- uzpůsobení stroje - ohýbání s trnem je prováděno výhradně strojně. Stroj proto musí být k usazení trnu uzpůsoben. Trny se šroubují na distanční tyče upnuté ve stroji. Distanční tyče jsou staticky upevněny ke skřini stroje. Kleština proto musí být zkonstruována dutě s uchopováním tyče za vnější poloměr,
- usazení – důležitou roli pro správnou funkci trnu má jeho poloha vůči matici. Trny se mírně přesazují vůči tangentě ohybu. Přesná poloha bývá



Obr. 35 Nomogram pro určení užití trnu [35]

doporučována výrobcem. V případě špatného ustavení hrozí lokální vydutí stěny,

- mazání – kvůli zvýšenému tření na kontaktních plochách trnu je nutné mazat vnitřní stěnu trubky, nebo trn samotný. Mazivem je nejčastěji minerální olej. Do trubky se buď předem vstříkne, nebo je lubrikant přiváděn mazacími otvory trnu i během ohybu,
- náklady – stabilizační trny rozšiřují sestavu základních nástrojů o další prvek. Pro každý vnitřní průměr trubky je nutno pořídit nový nástroj, který splňuje toleranční vůle mezi trnem a trubkou. Zvýšené náklady jsou vynaloženy také skrze zmíněnou lubrikaci,
- produktivita – ohyb s trnem vyžaduje pečlivé seřízení. Trubky se na trn ručně navlékají. V některých případech nastávají komplikace při vyjmutí trnu. Zvýšená manipulace má razantní vliv na výrobní čas jednoho kusu. Navíc se ohyb provádí za snížených rychlostí.

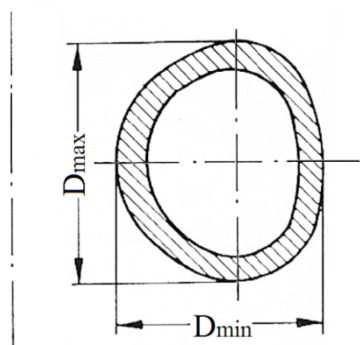
Užití trnů jednoznačně vykazuje lepší výsledky [16], [19], [14]. Nejvýznamnějším negativem tohoto přístupu je ovšem snížená produktivita výrobních zařízení. Výrobní takt je při velkosériové výrobě klíčovým hlediskem. Přejít na technologii ohýbání s trnem je značně limitováno tímto kritériem. V případě, že je ohyb realizovatelný stávajícími technologiemi v požadovaných tolerancích, aniž by docházelo k trhlinám, je upřednostněn ohyb bez trnu. Zlepšení kvality ohybu je dosahováno úpravou ostatních procesních parametrů nebo požadavkem na konstrukční změnu ohybu.

#### 4.2.3 Úprava geometrie nástroje [6], [31]

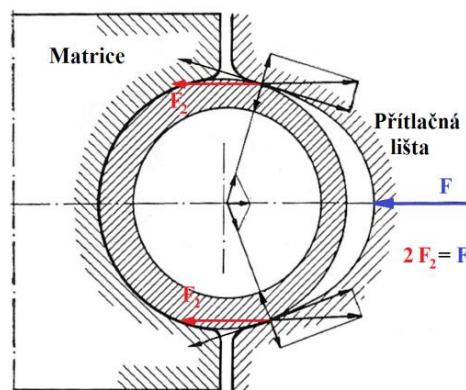
Další z možností jak redukovat ovalitu je konstrukční úprava tvářecích nástrojů. Funkční plochy nástrojů, které přicházejí do kontaktu s trubkou a mají největší vliv na výslednou kvalitu ohybu, jsou drážky. Tvar drážek tvoří negativ ohýbaného polotovaru. V případě tyčí a trubek vyfrézovaná drážka kopíruje kruhovitý tvar. Výrobci nástrojů dodržují tuto koncepci.

Novou koncepci konstrukce nástrojů publikoval již v roce 1961 německý autor W. D. Franz. Franz se v publikaci [6] zabývá ohybem trubek za studena pro uplatnění v chemickém průmyslu a u kotlů. Aby dodržel vzrůstající nároky na nízkou ovalitu ohybů, modifikoval tvar drážky matrice a přítlačné lišty.

Jak bylo vysvětleno v kapitole 2.6.1, při ohybu působí radiální složky napětí, které se snaží trubku zploštit. Při ohybu bez trnu se Franz snažil toto působení kompenzovat vnějšími silami na trubku. Upravil tvar drážky nástroje tak, aby vyvozené síly od přítlačné lišty vyztužovaly trubku proti tendenci zplošťování. Na obr. 36 je zobrazen příčný řez deformované trubky. K potlačení vlivu distorze je nutné silově působit právě v místech největšího zakřivení. Tvar drážky proto nabývá tvar znázorněný na obr. 37. Úpravou přítlačné lišty dochází ke změně kontaktních ploch a zároveň k přesunu silového působení. Lze uvažovat, že na trubku náhle od nástroje působí silová dvojice  $F_2$ .

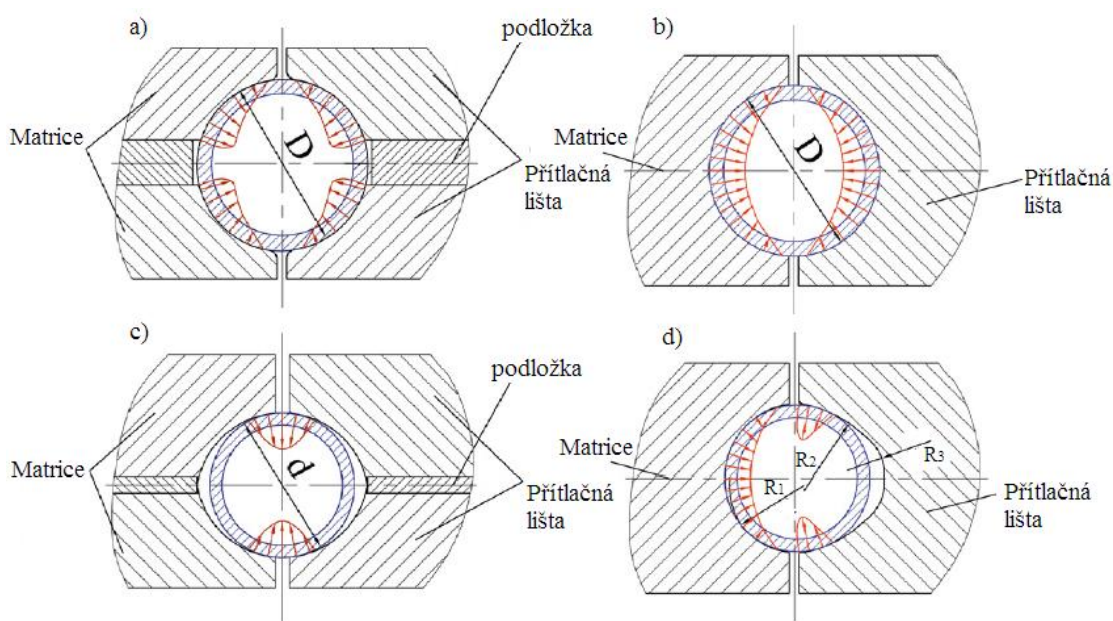


Obr. 36 Zdeformovaný průřez trubky



Obr. 37 Vliv nového designu nástroje [6]

Obdobnou úpravu nástroje prezentuje článek [32]. Autor řeší problematiku nákladů spojených s pořízením kompletních sestav nástrojů. Nástroje lze standardně použít pouze pro daný průměr polotovaru. V článku autor navrhuje univerzální nástroj. Nástroj je symetricky rozdělen a mezi funkční plochy je vložena podložka. Šířka podložky je závislá na ohýbaném průměru a dle potřeby upravena. V případě maximální šířky podložky (maximální možný průměr trubky) působí nástroj (obr. 38a) na trubku jako běžné komerční nástroje (obr. 38b). V případě ohybu menší trubky poloměru  $d$  (obr. 38c) je mezi nástroje vložena užší podložka. Průběh kontaktní síly na trubku působí blíže k ose trubky. Silové působení má podobný charakter jako zmíněná úprava dle Franze prezentována na obr. 38d.



Obr. 38 Průběh silového působení: a) dělený nástroj – tlustá podložka, b) standardní nástroj, c) dělený nástroj – tenká podložka, d) nástroj s rádiusovou drážkou [32]

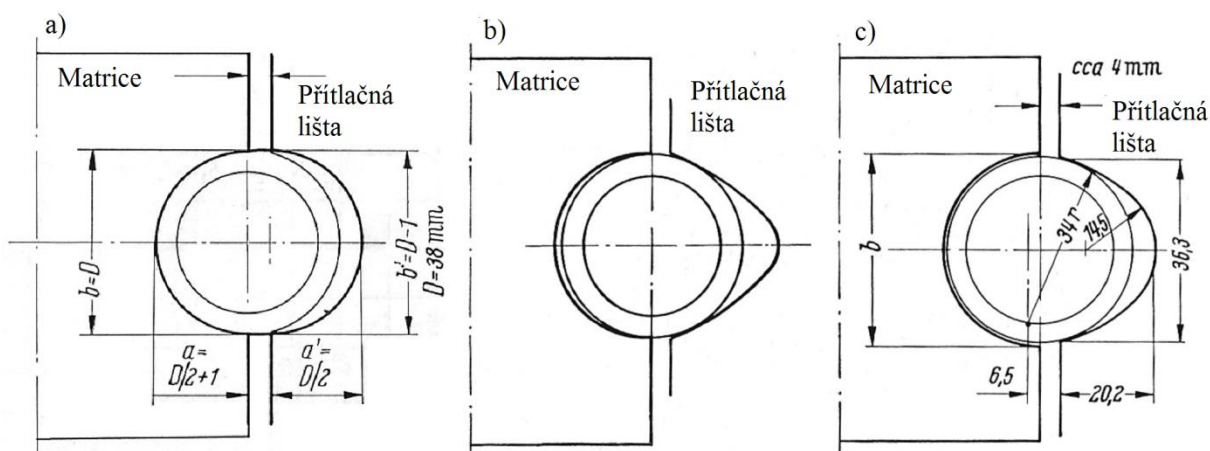
Fenoménu úpravy nástroje se bude autor v práci nadále věnovat. Tento přístup ke snížení ovality představuje potenciál ke zlepšení, který však v praxi není tolik využíván.

### 4.3 Návrh optimalizace geometrie nástroje [6], [23], [37], [46]

W. D. Franz jako jediný uvádí přibližné rozměry drážek a objasňuje postup při úpravách nástrojů k dosažení lepší ovality trubek. Ohyb je sice prováděn technologií nabalování, ale konstrukce nástrojů je stejná.

Postup úpravy drážek je v knize [6] rozdělen do třech fází:

- model 1 (obr. 39a) – drážka matrice zůstává kruhová. Drážka přítlačné lišty je eliptická,
- model 2 (obr. 39b) – drážka matrice zůstává opět kruhová. Drážka přítlačné lišty má špičatý profil,
- model 3 (obr. 39c) – upravuje se drážka matrice a zároveň přítlačné lišty.



Obr. 39 Modifikované tvary drážek [6]

U každého modelu je uveden vztah pro výpočet rozměru drážky. Doporučena je pouze šířka a hloubka drážky, jak je převzato na obr. 39a. Tvar křivek není dále specifikován. Franz tvrdí, že nejlepšími výsledky bylo dosaženo s modelem číslo 3. Zkoumána byla trubka o průměru 38 mm, tloušťce stěny 4 mm a poloměru ohybu  $R = 60$  mm. Pro tuto specifikaci uvádí na obr. 39c i poloměry rádiusů. Přesto jsou zbylé rozměry na výkresu neokótované a tím pádem nejednoznačné. K převzetí doporučených rozměrů pro zadanou trubku s vnějším průměrem 27 mm jsou rozměry drážky dopočteny poměrem hodnot.

Další inspirací z technické praxe je konstrukce kuličkových šroubů. Drážky šroubů a matic pro odvalování kuliček jsou dvojího provedení (obr. 40). Prvním je kruhový profil, který je jednodušší na výrobu ale s horší účinností. Druhým je profil gotický, jehož název je odvozen z lomeného gotického oblouku. Výhodou je možnost zajištění menší axiální vůle a větší styčná plocha. Drážka, identická na obou stranách, je tvořena dvěma oblouky, jež vytváří styk ve 4 bodech působících do kříže. Na kuličky působí menší zatížení, nedeformují se tolik a nedochází k takovému opotřebení. Závitový profil je z hlediska tuhosti konstruován tak aby úhel styku  $\alpha$  byl menší než  $45^\circ$ .



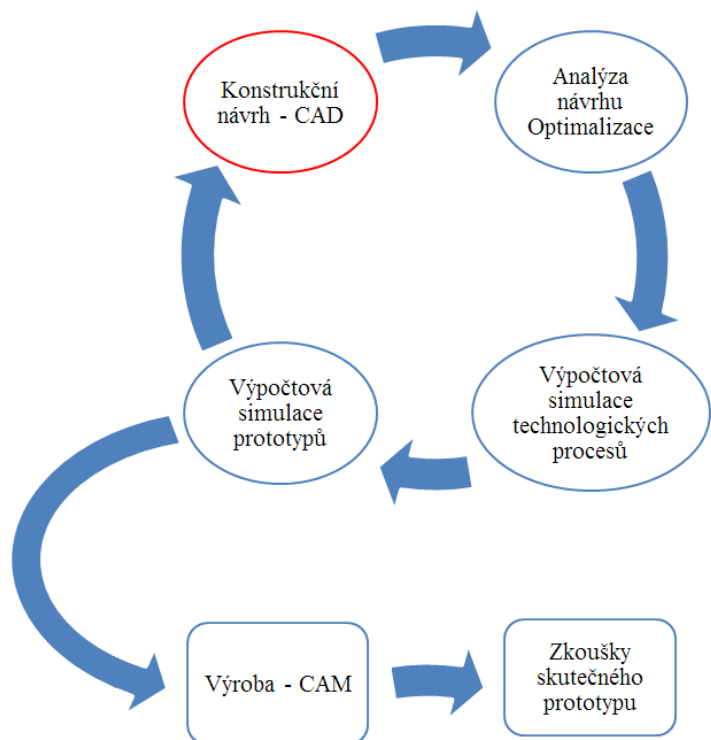
Obr. 40 Drážky kuličkových šroubů [37], [46]

Ověření vlivu modifikovaných nástrojů na proces bude provedeno numerickou metodou konečných prvků v softwaru ANSYS.

#### 4.4 Numerická analýza

Jednou z možných analýz tvářecích procesů jsou teoretické modely. Proces ohybu trubek bude analyzován numerickým přístupem metodou konečných prvků. Simulace provedené touto metodou lze považovat za univerzální, rychlé a velmi přesné. MKP umožňuje řešit řadu problematik technické praxe, jak bylo představeno v kapitole 3. Komplexní definice simulovaného modelu ovlivňuje chování systému a je kritické při interpretaci výsledků. Pro dosažení relevantních výsledků je třeba popsat systém co nejvíce experimentálně podloženými zkouškami.

Úloha optimalizace tvářecího nástroje bude řešena nejdříve početně. Numerické simulace jsou velmi účinné při vývoji prototypu. Výchozí konstrukční návrh je řešen pro konkrétní systém se zadanými okrajovými podmínkami. Na základě výsledků probíhá optimalizace návrhu. Opakováním výpočtů navržených řešení vzniká cyklus návrhu nástroje na obr. 41. Tvar a rozměry nástroje jsou dle průběžných výsledků odladěny do finální podoby. Optimalizovaný nástroj je následně dle dodaných výkresů vyroben. Vliv nového nástroje na proces je v posledním kroku ověřen reálnými zkouškami.



Obr. 41 Blokové schéma vývoje prototypu [13]

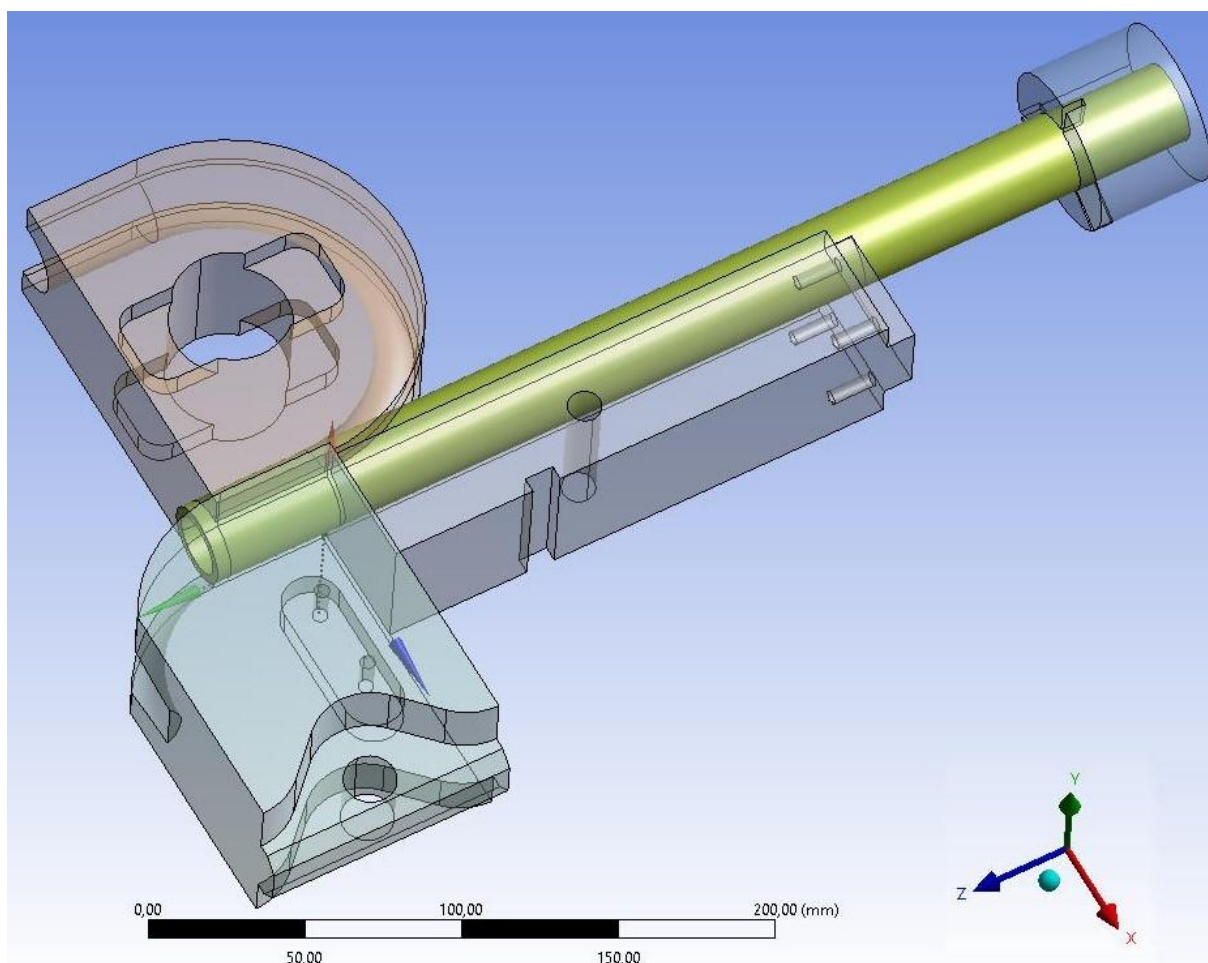
Vývojový cyklus uskutečněný simulacemi značně redukuje dobu realizace. Optimalizace tvaru nástroje šetří náklady na výrobu a testování nástrojů. Postup práce bude probíhat analogicky nastíněnému schématu. Vliv upravených ohýbacích nástrojů bude vyšetřen implicitním algoritmem softwaru ANSYS Workbench verze 17.1. Zavedení výpočtového modelu je chronologicky popsáno v následujících kapitolách.

#### 4.4.1 Geometrický model

Pro účely práce dodala firma výkresovou dokumentaci jednotlivých ohýbacích nástrojů. Nástroje byly objemově vymodelovány v programu Autodesk Inventor. Konverzí do univerzálního formátu IGES (.igs) byly objemové modely naimportovány do preprocessingu simulačního softwaru. Na obr. 42 je sestava nástrojů s vloženou trubkou uspořádána k procesu navíjení. Tab. 7 doplňuje důležité rozměry modelovaných součástí.

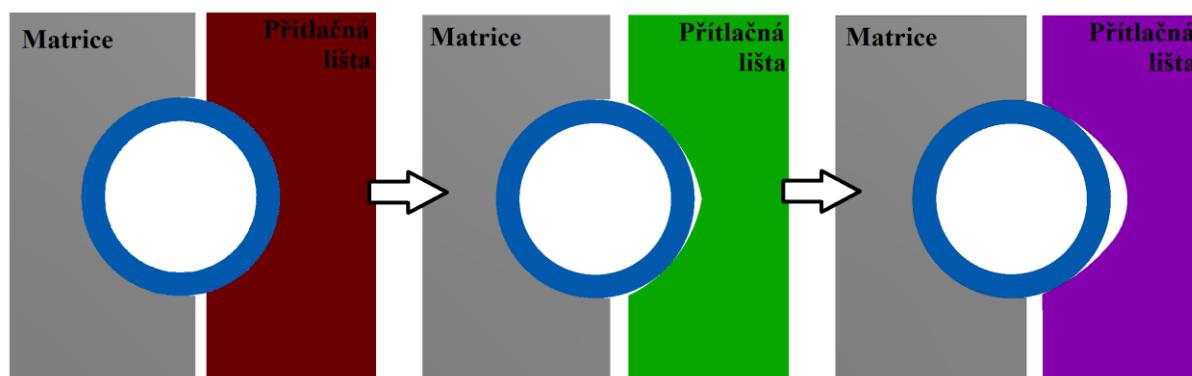
Tab. 7 Rozměry součástí ve výpočtovém modelu

Součást	Rozměry [mm]
průměr trubky	27
tloušťka stěny trubky	3,2
délka trubky	300
rádus ohybu	60
délka upínací čelisti	40
délka přítlačné lišty	180
délka úchopu kleštiny	40



Obr. 42 Sestava nástrojů s trubkou

Proces byl nejprve simulován s původními nástroji, viz obr. 43 vlevo. V rámci analýzy výsledné kvality ohybu byla geometrie nástrojů obměňována. V první fázi byla modifikována pouze drážka přítlačné lišty. Návrhy vycházely z předešlých doporučení a mezivýsledků simulací. Postup úprav přítlačné lišty je znázorněn na obr. 43. V druhé fázi byla modifikována rovněž drážka matrice. Vyhodnocení nastíněných úprav bude v práci dále vyhodnoceno v kapitole 4.4.6.



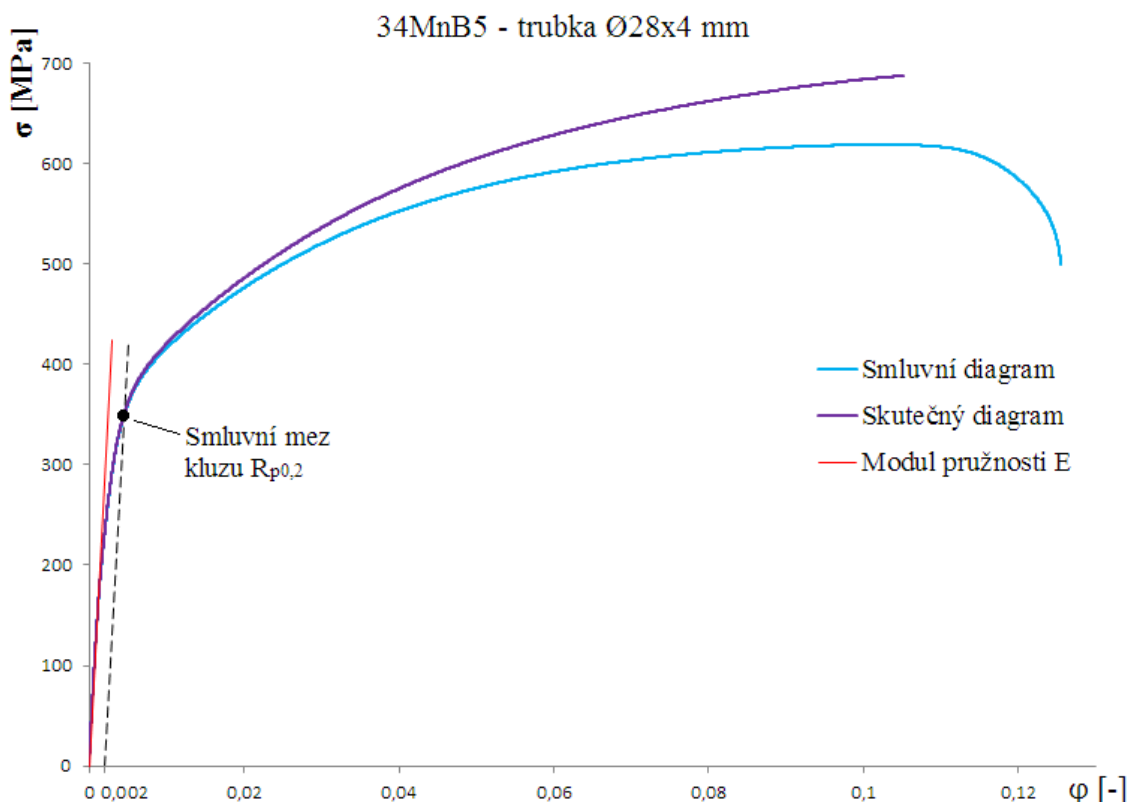
Obr. 43 Postup úpravy drážky přítlačné lišty

#### 4.4.2 Materiálový model

Výpočtový model je třeba doplnit materiálovými charakteristikami. Modelová úloha je sestavena z nástrojů a tvářeného polotovaru. Pro zjednodušení úlohy jsou kalené nástroje z nástrojové oceli uvažovány jako ideálně tuhé. Jejich chování je nepoddajné. Ohýbaná trubka je z nízkouhlíkové oceli 34MnB5. Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli jsou uvedeny normou v tab. 1. Firemní dokumentace dále doplňuje požadavky na vstupní materiál adekvátně pro jejich tepelné zpracování dle odpovídajících norem.

Nejdůležitější charakteristikou oceli jsou její mechanické vlastnosti reprezentované přirozeným přetvárným odporem. Přirozený přetvárný odpor je závislý na chemickém složení, struktuře, stavu materiálu a přetvoření. Pro zavedení napětově-deformačního chování oceli do zadání je vhodné provést základní zkoušky mechanických vlastností materiálu. Ve firmě jsou prováděny tahové zkoušky v rámci kontroly jakosti vstupního materiálu. Poskytnutá data pocházejí ze zkoušek trubek průměrů 23,6 mm, 25 mm a 28 mm. Tahové zkoušky probíhaly za konstantní teploty a rychlosti přetvoření. K vyhodnocení (obr. 44) byly použity zprůměrované hodnoty zkoušek trubek s nejbližším průměrem 28 mm.

Chování oceli je popsáno pružně-plastickým modelem. Pružná oblast je definována modelem pružnosti  $E$  a poissonovým číslem  $\mu$ . Data z průtahoměru popisují smluvní napětí k výchozímu průřezu. Pro zavedení materiálu do systému MKP je smluvní diagram přepočítán na skutečný, znázorněný fialovou barvou. Plastická oblast materiálu je definována průběhem skutečného napětím na skutečném logaritmickém přetvoření  $\varphi$  od smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  po mez pevnosti  $R_m$ . Vyhodnocení tahové křivky shrnuje tab. 8, přičemž tažnost oceli je v materiálových listech deklarována minimálně 20 %.



Obr. 44 Tahová zkouška oceli 34MnB5

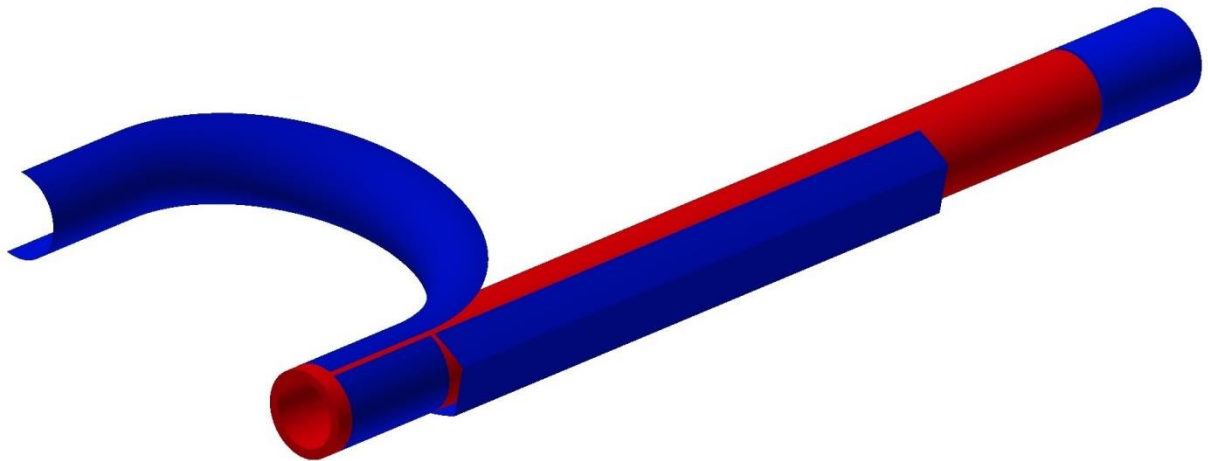
Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli 34MnB5

Modul pružnosti E	Poissonovo číslo $\mu$	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	Mez pevnosti $R_m$	Tažnost $A_5$
141370 MPa	0,3	350 MPa	619 MPa	12,5 %

#### 4.4.3 Kontaktní plochy

Nedílnou součástí tvářecí operace je tření mezi stýkajícími se tělesy. Dalším krokem v zadávání výpočtové úlohy je klasifikace kontaktních ploch. Styčným plochám je třeba definovat třecí vlastnosti. Uvažováním tření se zahrnuje přítomnost smykových složek napětí. Jejich velikost je v tomto případě určena Coulombovým přístupem. Třecí napětí je určeno normálovou složkou napětí a koeficientem tření, který je nutno zhodnotit. Hodnota koeficientu závisí na materiálech, tlaku, relativní rychlosti ploch a u ohýbání především na drsnostech a mazání.

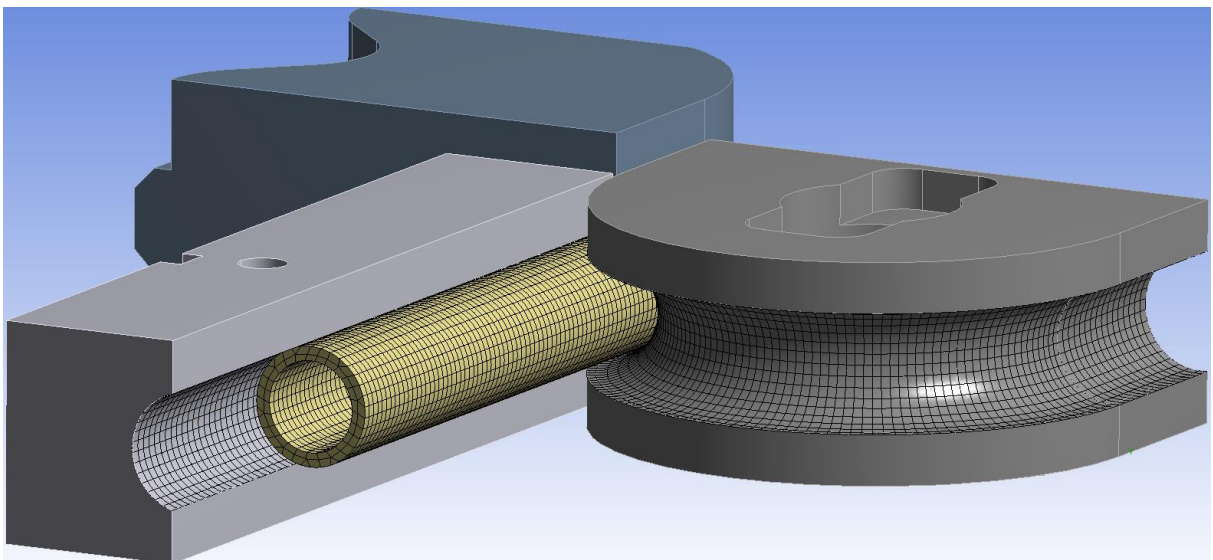
Trubka přichází během procesu do kontaktu se všemi nástroji. Styk tedy nastává mezi vnějším povrchem trubky a drážkami nástrojů viz obr. 45. Trubky nejsou před ohybem mazány. Uvažuje se proto suché tření bez lubrikačního filmu. Dle těchto okolností a konzultace byla zvolena hodnota součinitele tření na 0,15. Mezi nástroji samotnými ke kontaktům nedochází.



Obr. 45 Kontaktní plochy

#### 4.4.4 Nanesení sítě

Důležitým krokem charakterizujícím celou metodu je diskretizace modelu konečnoprvkovou sítí. Model je tvořen ohýbanou trubkou a nástroji. Materiál nástrojů je ke zjednodušení úlohy považován za ideálně tuhý. V rámci analýzy tak nebudou vyšetřeny případné deformace nástrojů. Působení nástrojů na trubku je v modelu reprezentováno plochami drážek, jak je představeno na obr. 45. Na plochy drážek byla nanesena mapovaná síť tvořená kvadratickými čtyřúhelníkovými prvky *Quad8*, u níž je každý prvek popsán 8 uzly. Chování trubky bylo ve fázi navrhování nové geometrie popsáno skořepinovými prvky (*shell*), pro urychlení výpočtů. K finálnímu vyhodnocení deformací trubky je trubka reprezentována objemovými prvky. Síť byla na trubku nanesena metodou *sweep*. Trubka je nahrazena kombinací šestistěnných prvků *Hex20* a pětistěnnů *Wed15*. Zmíněné prvky jsou rovněž kvadratické a reprezentují prvek 20, respektive 15 uzly.



Obr. 46 Nanesení konečnoprvkové sítě

Velikost a typ prvků byly voleny v závislosti na výslednou kvalitu elementů sítě, jenž je ovlivněna i návazností prvků na rozhraní kontaktních ploch. Deformace trubky je vyhodnocována především v místě ohybu, proto byla trubka rozdělena na 3 části (viz obr. 47) a generovaná síť je zjemněna především v oblasti ohybu. Vygenerovaná síť modelu, s trubkou zobrazenou v řezu, je zobrazena na obr. 46.

#### 4.4.5 Model zatížení

Finálním krokem preprocessingu je zavazbení úlohy. Celý proces je rozdělen do 24 kroků, během kterých je proveden 120 ° ohyb. Hlavním pohybem je rotace matrice (obr. 47). Spolu s matricí se o 5 ° během 1 kroku otáčí i upínací čelist. Na parametrech ohybu závisí translační pohyb přítlačné lišty a kleštiny. Jejich pohyb je vztažen k posuvu trubky, tak aby nedocházelo ke tření. Celková délka posuvu podavače a přítlačné lišty je rovna délce oblouku ohnuté části trubky spočítané následovně. Nejdříve je vypočítán střední relativní poloměr ohybu  $k$ . Do vztahu (2.1) je dosazen rádius ohybu 60 mm a střední poloměr trubky roven součtu vnitřního poloměru a poloviny tloušťky stěny trubky.

$$k = \frac{R}{2 \cdot r_s} = \frac{60}{2 \cdot 11,9} = 2,52$$

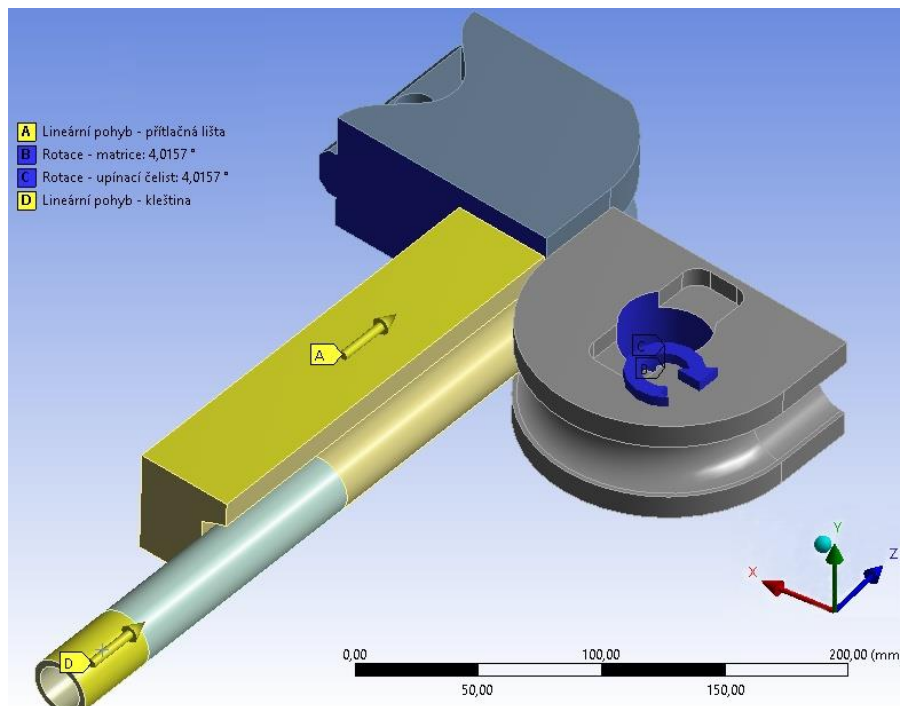
Výsledek je dosazen pro zjištění maximální odchylky neutrální osy od poloměru ohybu.

$$x = \frac{0,42}{k} \cdot r_s = \frac{0,42}{2,52} \cdot 11,9 = 1,98 \text{ mm}$$

Rádius je pro dosažení přesnějších výsledků vztažen k neutrální ose. Poloměr neutrální osy je na délce ohybu proměnlivý, což respektuje odvozený vztah (2.4). Oblouk je vymezen 120° výsečí. Úhel  $\beta$  je roven 20 % z celkového úhlu ohybu  $\varphi$ . Úhly jsou do vzorce dosazeny v radiánech.

$$l = R \cdot \varphi - x(\varphi + \beta) = 60 \cdot \frac{2\pi}{3} - 1,98 \cdot \left( \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{15} \right) = 120,69 \text{ mm}$$

Kleština a přítlačná lišta se pohybují přímočaře v axiálním směru (osa Z na obr. 47) v délce 120,69 mm. Boční přítlak lišt na trubku byl původně zadán silovým působením, které však v závislosti na odporech během procesu kolísá. Pro větší stabilitu výpočtů, rychlejší výpočet a lepší interpretaci výsledků jsou nástroje kontrolovány opět jejich polohou. V základním nastavení drží přítlačná lišta v ose X vzdálenost prvotního kontaktu s trubkou. Upínací čelist si taktéž drží konstantní vzdálenost od matrice, aby nedošlo k prokluzu trubky.



Obr. 47 Silové působení na model

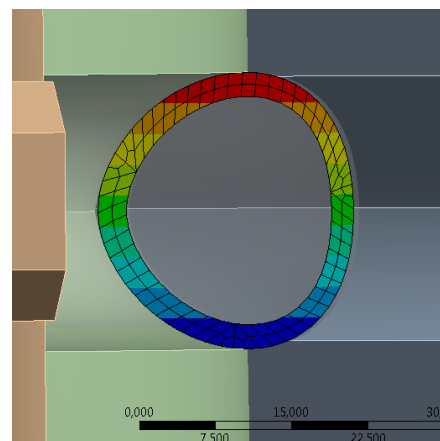
#### 4.4.6 Numerické výsledky

Simulacemi byl analyzován proces ohybu trubky navíjením. Nastavení okrajových podmínek úlohy bylo objasněno v předchozích kapitolách. Po provedení výpočtu je ve stejném prostředí programu v rámci postprocessingu umožněno zobrazit požadované výsledky.

Hlavním důvodem simulování procesu zůstává optimalizace tvářecího nástroje. Prvotní simulace proběhly se sestavou původních nástrojů ke zjištění výchozích hodnot. Následně byly implementovány nástroje s novou geometrií k posouzení jejich vlivu na proces. Úprava nástrojů se týkala především jejich funkčních částí. Do kontaktu s trubkou přichází drážky nástrojů. Vhodná modifikace jejich tvaru měla způsobit vnější silové působení potlačující vliv radiálních sil způsobujících zploštění. V oblasti vyskytující se ovality působí na trubku matrice a přítlačná lišta. Úprava drážky matrice byla inspirována designem kuličkového šroubu, zato drážka přítlačné lišta vychází především z publikace [6].

**Drážka matrice** - v rámci zkoumání byla upravována i drážka matrice. Drážky matrice a přítlačné lišty byly vmodelovány osově symetricky. Působící síly měly trubku zatěžovat symetricky do kříže, jak bylo zobrazeno na obr. 40. Při ohýbání se tak však neděje. Je nutné si uvědomit, že v drážce matrice se pohybují většinou kalené ocelové kuličky, které jsou předepnuty. Na kuličky je vyvíjen zvýšený tlak při rotaci šroubu. Velikost a rozložení zatížení kuliček závisí na profilu oběžných drah. Velikost zatížení je však vždy v oblasti malých pružných deformací. Drážka do tvaru V, tak akorát vhodně rozkládá silové působení. Zatímco při aplikaci drážky tvaru V u ohýbací matrice je vložený materiál tvářen. Ohýbaná trubka se plasticky deformuje. Materiál se pohybuje cestou nejmenšího odporu, a jelikož nemá ve středu oporu, intenzivně se v těchto místech vtláčuje. Trubka zcela kopíruje tvar drážky, což není žádoucí. Na obr. 48 je příčný řez deformované trubky vtláčený do matrice na levé straně.

Dalším rozdílem těchto dvou případů je orientace drážek. Směr hlavního zatížení drážek je vůči sobě pootočený o 90 °. Kuličky přenášejí axiální síly, zatímco trubka je nejvíce zatížena ve směru radiálním. Analogii konstrukce drážek do tvaru V tedy není vhodné aplikovat. Profil drážky matrice byl upraven vícekrát, vždy však s negativním vlivem. Matrice proto zůstane původní, bez úprav. Stejně tak je kruhový profil zachován v místech úchopu trubky tzn. na upínací čelisti a kleštině.



Obr. 48 Deformace průřezu

**Drážka přítlačné lišty** - při návrhu přítlačné lišty se vycházelo ze schématických výkresů dle Franze. Vymodelované drážky na liště i matrici měly často ostrou hranu na přechodech, jak lze pozorovat na obr. 39a. Šířka drážek je vždy užší, než je průměr trubky, a proto dochází k bodovému kontaktu na hranách drážky. Geometrie byla proto nadále upravována, neboť by na trubkách z měkkého materiálu vznikaly otlaky. Profil byl upravován tak, aby s trubkou docházelo k tečnému kontaktu. Průběžným vyhodnocováním ovality provedených simulací byl profil upraven do finálního provedení (obr. 49).

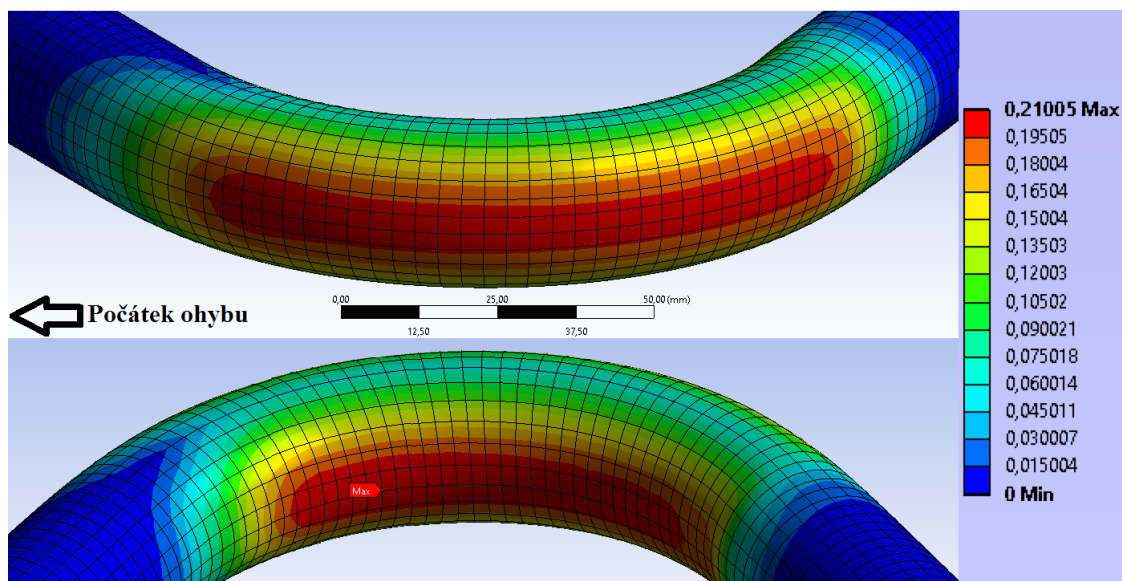


Obr. 49 Pohled na optimalizovanou drážku přítlačné lišty

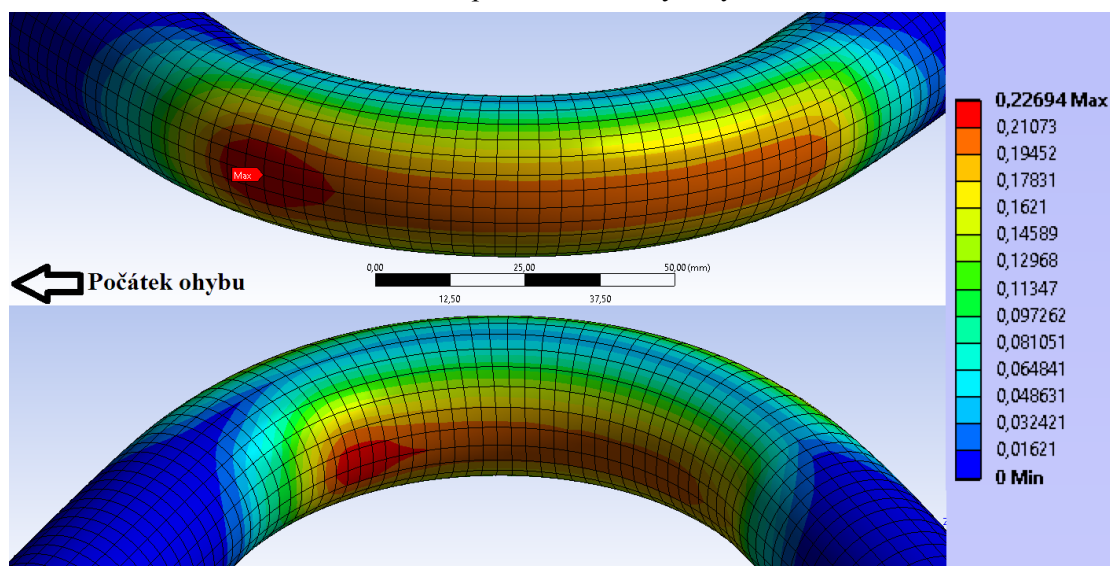
Na následujících stranách budou prezentovány výsledky dosažené s optimalizovanou geometrií přítlačné lišty v porovnání s výchozím nástrojem.

#### 4.4.7 Numerické vyhodnocení

**Celkové přetvoření** - první parametr, který bylo třeba při vývoji nástroje kontrolovat je maximální hodnota celkového přetvoření trubky. Pokud by byla překročena mezní hodnota, došlo by ke vzniku trhlin a prasknutí trubky. Trubky by tak nebylo možno za studena ohnout. Na obr. 50 je zobrazen průběh celkového přetvoření při výchozím stavu. Maximální hodnota  $\epsilon_{\max}$  nabývá 21,01 %. Průběh přetvoření je viditelně rovnoměrně rozložený po celé délce ohybu.



Obr. 50 Celkové přetvoření trubky – výchozí stav



Obr. 51 Celkové přetvoření trubky – optimalizovaný nástroj

Optimalizovaný nástroj vyvolává na začátku ohybu lokální extrém (obr. 51). Hodnota přetvoření je v tomto místě nepatrně větší,  $\epsilon_{\max} = 22,69\%$ . Míra přetvoření na zbylé části ohybu odpovídá původnímu stavu (obr. 50).

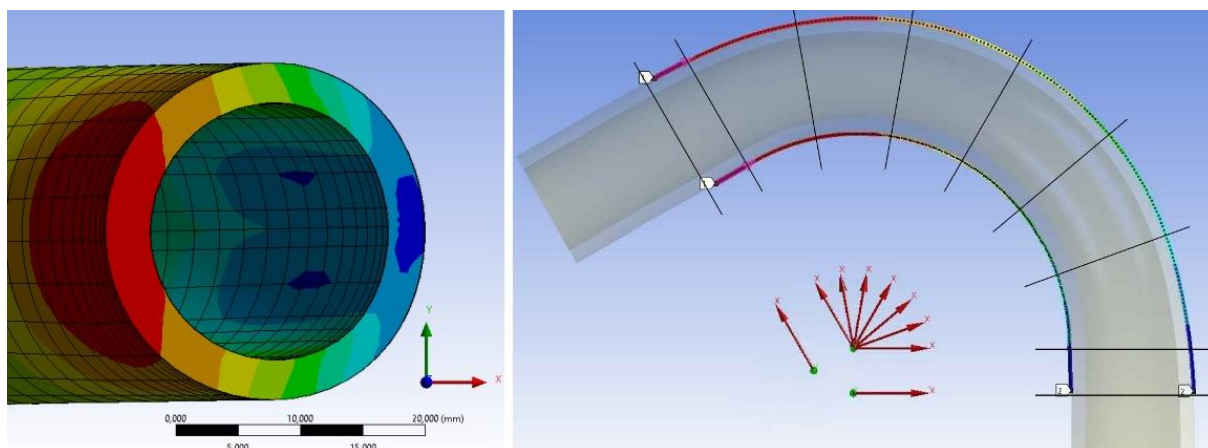
Interní dokumentace firmy dokládá experimentální měření skutečného přetvoření trubky. Přetvoření trubky bylo stanoveno programem Argus. Systém Argus opticky zachycuje deformační síť naleptanou na trubku v místě ohybu před a po provedení ohybu. Porovnáním nedeformované sítě s deformovanou vyhodnocuje výsledná přetvoření. Model sítě je v softwaru běžně sestaven ze snímků pořízených fotoaparátem. Rotační tvar trubky značně komplikuje identifikaci bodů rozdílnou odrazivostí povrchu. Pro naskenování sítě trubky bylo proto využito dvou kamerového zařízení primárně užívaného pro systém Aramis. Analyzovaná trubka měla totožné rozměry, rovněž i úhel a poloměr ohybu. Trubka, z velmi podobného materiálu 26MnB5, vykazovala maximální přetvoření v rozmezí 24 až 29 %. V návaznosti na tyto experimenty autor usuzuje, že při aplikaci navrženého nástroje nedojde během ohybu k porušení trubky.

**Ovalita** - stěžejním tématem práce je výsledná ovalita ohnutých trubek. Popisu vzniku ovality a jejímu hodnocení se věnuje kapitola 2.6.1. Na rozdíl od vztahů vyjadřujících koeficient ovality často užívaných v literatuře bude v práci použit vztah (4.1). Běžně je koeficient vypočítán odečtením menšího naměřeného průměru od většího (2.8). Koeficient proto vždy nabývá kladné hodnoty, ale nijak nevyjadřuje tvar deformace průřezu. Pro lepší interpretaci výsledků bude v práci k výpočtu ovality užíván následující vztah:

$$K = \frac{Y - X}{D_0} \cdot 100 \quad (4.1)$$

kde: K koeficient ovality [%]  
 Y deformovaný průřez v axiálním směru k ose rotace [mm]  
 X deformovaný průřez v radiálním směru k ose rotace [mm]

Pokud bude maximální deformovaný průměr v radiálním směru, koeficient vyjde záporný. Indexace rozměrů průřezu je zřejmá dle souřadného systému na obr. 52, kde červené šipky označují směr X.



Obr. 52 Vyhodnocení ovality

Ovalita ohybu je hodnocena v délce ohybu po 20 ° a nadále aproximována. Nulový úhel ohybu je zvolen v oblasti upínací čelisti a narůstá směrem ke kleštině. Průřez se deformuje i mimo hranice ohybu, a proto je ovalita vyhodnocena i 10 mm před a za ohybem. Způsob vyhodnocení ovality v prostředí programu je na obr. 52 vpravo. V ose rotace je vytvořen nový souřadný systém pootočený o zvolený úhel, k němu jsou vztaženy okrajové rozměry trubky. Vzdálenosti krajních bodů pro daný řez jsou zaznamenány do zkrácené vzorové tab. 9.

Tab. 9 Stanovení ovality výchozího simulovaného modelu

úhel $\varphi$ [°]	$X_{\max}$ [mm]	$X_{\min}$ [mm]	$Y_{\max}$ [mm]	$Y_{\min}$ [mm]	X [mm]	Y [mm]	K' [%]
-10	73,26	46,50	13,50	-13,51	26,76	27,01	0,93
0	72,59	46,48	13,50	-13,50	26,11	27,00	3,28
20	71,88	46,56	13,49	-13,49	25,32	26,98	6,13
40	72,01	46,60	13,49	-13,50	25,41	26,98	5,83

Vzorový výpočet ovality pro úhel ohybu 20 °:

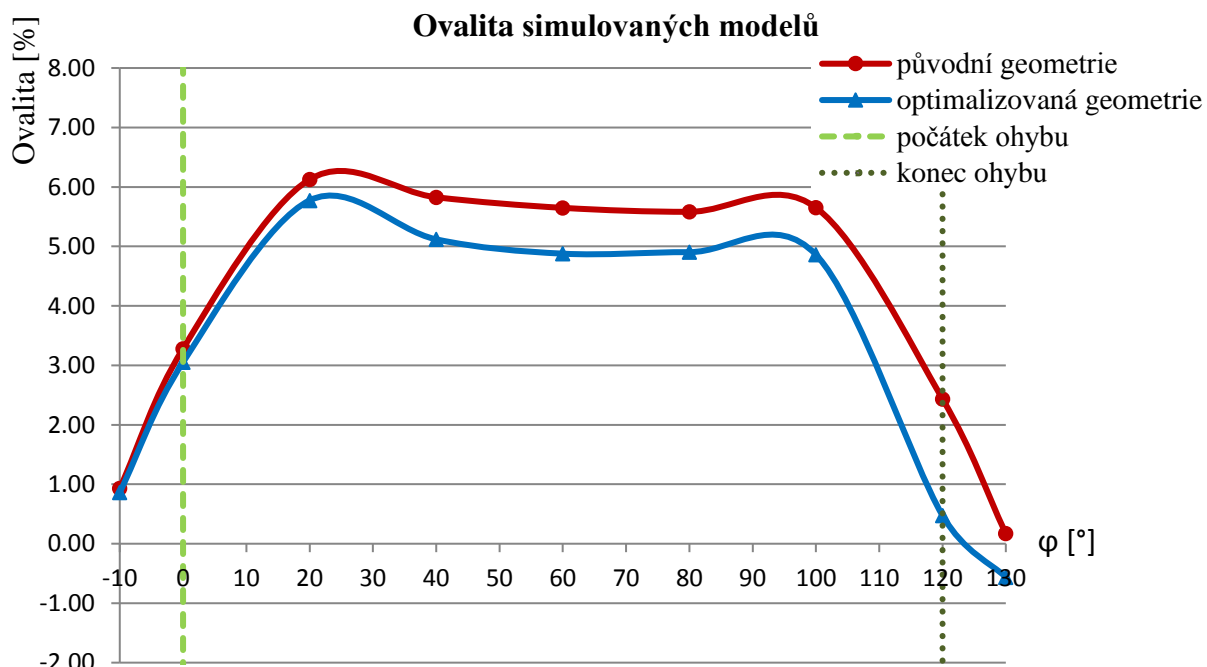
$$K' = \frac{Y - X}{D_0} \cdot 100 = \frac{(Y_{max} - Y_{min}) - (X_{max} - X_{min})}{D_0} \cdot 100$$

$$K' = \frac{(13,49 - (-13,49)) - (71,88 - 46,56)}{27} \cdot 100 = 6,13 \%$$

Kompletní tabulky s výslednou ovalitou ohybů jsou uvedeny v příloze 1. Tab. 10 porovnává výslednou ovalitu výpočtových modelů v jednotlivých řezech. Hodnoty druhého sloupce platí pro původní nástroj. Ve třetím sloupci jsou hodnoty dosažené s optimalizovaným nástrojem. Porovnání je zřetelnější na obr. 53. Aplikovaný nástroj vykazuje lepší výsledky po celé délce ohybu. V kritickém místě s nejvyšší ovalitou, v oblasti 20 °, dosahuje zlepšení pouze 6 %.

Tab. 10 Porovnání ovality simulovaných modelů

úhel $\varphi$ [°]	ovalita $K'_{p\u00fcdv}$ [%]	ovalita $K'_{opt}$ [%]	zlepšení [%]
-10	0,93	0,86	7
0	3,28	3,05	7
20	6,13	5,77	6
40	5,83	5,12	12
60	5,65	4,88	14
80	5,58	4,90	12
100	5,65	4,86	14
120	2,43	0,47	81
130	0,17	-0,56	430



Obr. 53 Ovalita simulovaných modelů

**Změna tloušťky stěny** – dalším zkoumaným defektem ohýbané trubky je ztenčení stěny na vnějším poloměru. Změnu tloušťky trubky lze vyhodnotit obdobně jako ovalitu. Zjištěním polohy dalších dvou bodů na vnitřní straně trubky. Tloušťka stěny je vypočtena v rovině pro daný řez průřezu. Názornější přístup je prostorově zobrazen na obr. 54. Barevná škála znázorňuje hodnotu logaritmické deformace v radiálním směru. Platností zákona konstantního objemu ( $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$ ) lze odlogaritmováním vztahu (4.2) zjistit tloušťku stěny v libovolném místě trubky výpočtem (4.3).

$$\varphi_r = \ln \frac{t}{t_0} \quad (4.2)$$

$$t = t_0 \cdot e^{\varphi_r} \quad (4.3)$$

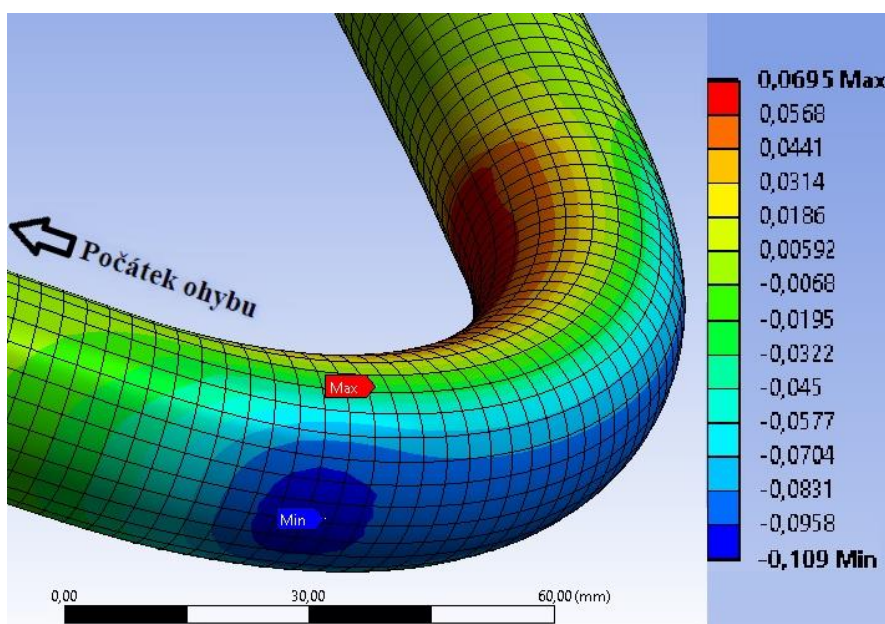
kde:  $\varphi_r$  logaritmické přetvoření v radiálním směru [-]  
 $t$  lokální tloušťka stěny [mm]

Hodnotu přetvoření libovolného bodu trubky lze zjistit sondou. Pro maximální hodnoty radiálního přetvoření (obr. 54) je vypočtena konečná tloušťka stěny.

$$t_{min} = t_0 \cdot e^{\varphi_{rmin}} = 3,2 \cdot e^{-0,109} = 2,87 \text{ mm}$$

$$t_{max} = t_0 \cdot e^{\varphi_{rmax}} = 3,2 \cdot e^{0,0695} = 3,43 \text{ mm}$$

Stěna trubky se v kritickém místě ztenčila o 10,3 %. Obdobné výsledky jsou zjištěny rozdílem rozměrů vnější a vnitřní stěny. Výsledky simulovaného modelu lze považovat za přijatelné. V interních podkladech byla doložena minimální tloušťka stěny pro totožný ohyb (lišící se opět pouze materiálem trubky - 26MnB5) změřená na 2,81 mm. Průběh radiálního přetvoření znázorňuje obr. 54. Modré izoplochy vyznačují intenzivní ztenčování na vnějších vláknech trubky. Zatímco červené izoplochy značí pěchování materiálu. Tato skutečnost vyhovuje technickým předpokladům. V příčném řezu 60° jsou izoplochy vybarveny na obr. 52.



Obr. 54 Změna tloušťky stěny

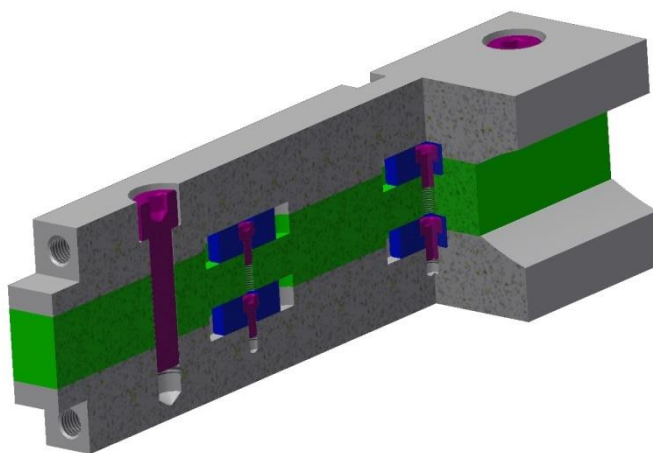
**Další vlivy na ovalitu** – ovalitu lze kromě samotné geometrie nástrojů ovlivnit ostatními procesními parametry. V kapitole 4.2.1 byl objasněn pozitivní vliv axiálního přitlaku na trubku. Během procesu lze kontrolovat pohyb nástrojů i v příčném směru. Tzn. velikost síly, kterou působí přitlačná a upínací lišta na trubku. Upínací čelist slouží především k pevnému uchycení volného konce trubky. Velikost přitlaku upínací čelisti neovlivňuje ovalitu, proto nebude upravována. Přítlak způsobený přitlačnou lištou má vliv na ovalitu, a proto byl v rámci simulací zkoumán.

W. D. Franz [37] ohýbal trubky metodou nabalování. V experimentech rameno páky, které rotuje s přitlačnou lištou kolem matrice, posunul mimo střed. Excentrické uchycení ramene způsobuje nerovnoměrné zatížení trubky od přitlačné lišty podél ohybu. Hodnota přitlaku narůstá do maxima v polovině procesu a klesá zpět na minimum při dokončení ohybu trubky. Tímto způsobem je dosaženo většího přitlaku v oblasti rovnoměrné ovality. Vyhodnocení vlivu axiálních a radiálních přitlaků bude následovat až v experimentální části, kde je řízení os stroje nezávislé.

#### 4.4.8 Optimalizovaný nástroj

Na základě výsledků simulací byl navržen optimální tvar drážky. Jak bylo výše komentováno, z tvářecích nástrojů bude optimalizována pouze přitlačná lišta. Matrice a ostatní nástroje zůstávají v sestavě původní.

Konstrukce přitlačné lišty vychází z původní výkresové dokumentace pro zajištění správného upnutí ve stroji. Rozměry nástroje jsou rovněž omezeny geometrií matrice, tak aby byly mezi nástroji dodrženy tolerance. Prototypový nástroj je zhotoven jako skládaný (obr. 55). Střední díl slouží jako distanční podložka mezi funkčními díly. Toto uspořádání nástroje umožňuje měnit šířku drážky a otestovat trubky rozdílných průměrů. Čtyři pera zapuštěné v drážkách zajišťují souměrnost nástroje, který je sešroubován v celek.



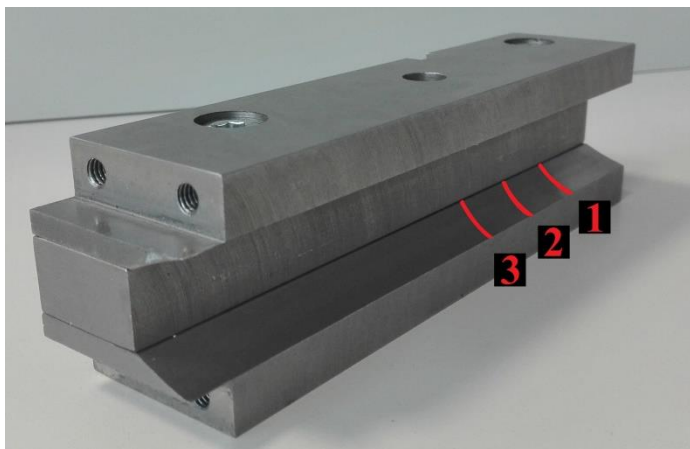
Obr. 55 Prototypový nástroj v řezu

Z modelu byla vytvořena výkresová dokumentace k výrobě prototypu. Výkresy nejsou v přílohách doloženy, neboť jsou vlastnictvím firmy A.

## 4.5 Experimentální ověření

### 4.5.1 Kontrola geometrie nástroje

Jednotlivé díly nástroje byly obrobena podle výkresů a přítlačná lišta byla dodána ve smontovaném stavu. Nástroj, jakožto prototyp, nebyl tepelně zpracován. Před ověřením samotné funkce byla ověřena přesnost frézovaných funkčních ploch. Ve třech rovinách byla měřena odchylka rádiusu od zadané hodnoty. Místa řezů jsou zvýrazněny na obr. 56. Obě části lišty byly změřeny třiosou dotekovou sondou Zeiss PRISMO navigator 7. Kontrola geometrie vyrobeného nástroje vůči modelu je uvedena v tab. 11. Změřené odchylky od ideálního tvaru se nacházejí v tolerančním poli.



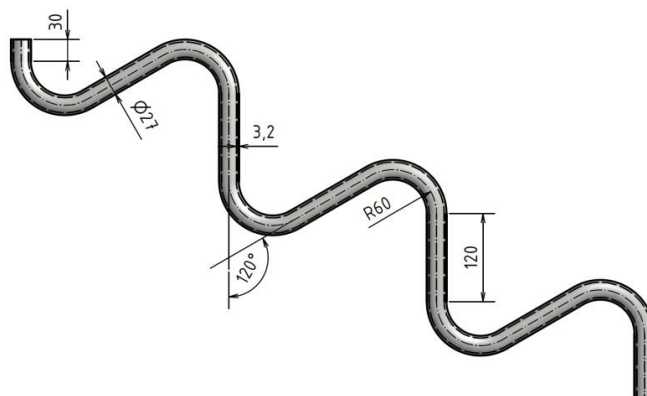
Obr. 56 Optimalizovaný nástroj

Tab. 11 Kontrola geometrie drážky nástroje

Část nástroje [-]	Řez #	Rádus [mm]	Horní odchylka [mm]	Dolní odchylka [mm]	Odchylka [mm]
levá	1	utajen	+ 0,300	- 0,300	+ <b>0,100</b>
	2	utajen	+ 0,300	- 0,300	+ <b>0,025</b>
	3	utajen	+ 0,300	- 0,300	+ <b>0,022</b>
pravá	1	utajen	+ 0,300	- 0,300	- <b>0,126</b>
	2	utajen	+ 0,300	- 0,300	- <b>0,070</b>
	3	utajen	+ 0,300	- 0,300	- <b>0,056</b>

### 4.5.2 Příprava experimentů

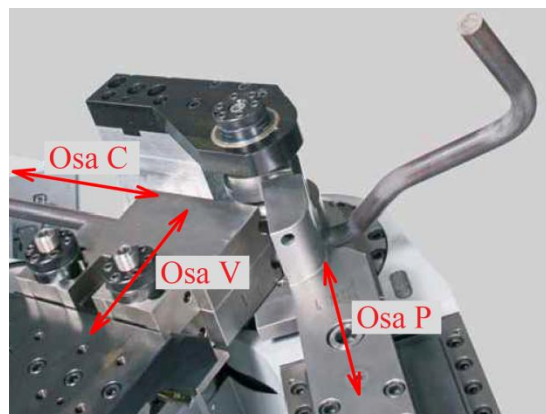
Zkoumaný úhel ohybu byl zvolen na 120 ° k získání zřetelných výsledků průběhu ovality po délce ohybu. Trubka daných parametrů je dostupná v délce 1500 mm. Dle možností stroje byl navržen zkušební tvar vzorku. Geometrie zkušebního vzorku (obr. 57) je navržena k maximálnímu využití polotovaru, aniž by došlo ke kolizi se strojem. Na každé zkušební trubce bude provedeno 6 totožných ohybů.



Obr. 57 Geometrie vzorku

Ohyb bude proveden na představeném stroji Wafios. Strojní provedení ohybů zajišťuje přesnost a reprodukovatelnost zkoušek. Stroj je řízen počítačem prostřednictvím kontrolního panelu. Pohon všech pohyblivých částí je zajištěn elektromotory v 9 osách, tři z nich jsou zobrazeny na obr. 58. Při ohybu zkušební vzorku budou seřizovány především osy:

- Osa „P“ – příčný posuv upínací čelisti,
- Osa „V“ – příčný posuv přítlačné lišty,
- Osa „C“ – posuv podavače v axiálním směru polotovaru.



Obr. 58 Řízené osy stroje [41]

Zakládání polotovaru do stroje je manuální. Obsluha stroje vkládá trubku do kleštiny. Po spuštění programu odjíždí podavač a je zahájeno automatické ohýbání od volného konce trubky. Kleština trubku neustále svírá a během procesu s ní manipuluje. Pokud nemůže být trubka při závěrečném ohybu nadále sevřena kleštinou, je trubka uchopena pouze upínací čelistí. Po dokončení posledního ohybu je díl ze stroje obsluhou opět odebrán.

#### 4.5.3 Provedení experimentů

Zkušební vzorky pochází z jedné šarže materiálu. V první fázi byly trubky naohýbány s původní sestavou nástrojů. V druhé fázi byla do stroje upnuta optimalizovaná přítlačná lišta. Nutno dodat, že zbylé nástroje sestavy zůstaly ve stroji upnuty. Především změna matrice by mohla mít vliv na kvalitu ohybu. Na obr. 59 je představen konstrukční rozdíl mezi přítlačnými lištami.



Obr. 59 Porovnání nástrojů

Všechny nástroje použité k experimentu byly nové. Při seřizování stroje byly ohnuty 2 trubky, na kterých se vyskytly otlaky a vrypy. V důsledku toho došlo k lokálnímu přebroušení nástrojů. Pro ohyb 120 ° v jednom plynulém kroku nedostačuje délka obou lišt. Tyto ohyby byly provedeny ve dvou krocích, tzn., že navíjení bylo přerušeno při ohnutí trubky na úhel 60 ° a došlo k odsunutí lišty od matrice. Potom byla lišta ustavena zpět do výchozí pozice k dokončení ohybu trubky. K potvrzení domněnky, že výše popsany

proces ohybu ve 2 krocích nemá vliv na ovalitu, byly trubky ohýbány i na úhel 100 °. Tento ohyb byl proveden plynule v jednom kroku.

K verifikaci vlivu nástroje bylo experimentálně provedeno 104 ohybů s rozdílnými parametry. Parametry ohybu trubky spolu s nastavením stroje jsou uvedeny v tab. 12. Tabulka zároveň kategorizuje provedené ohyby do 3 skupin, které budou samostatně vyhodnoceny. Zvlášť bude analyzovaná ovalita trubek pro různé úhly ohybu. Ve sloupci „osa V“ lze pozorovat změnu hodnot přítlaku působící na přítláčnou lištu. V posledním fázi bylo zkoumáno působení axiálních přítlaků v ose C. V posledním sloupci je orientačně uveden zprůměrovaný koeficient ovality pro řez s maximální hodnotou (většinou v úhlu 20 °) z celého ohybu. Kompletní vyhodnocení koeficientů ovality následuje v další kapitole.

Tab. 12 Přehled provedených ohybů

číslo trubky	počet ohybů	nástroj	ohyb [ ° ]	osa P [%]	osa V [%]	osa C [%]	max.ovalita [%]
<b>Ohyb 100°</b>							
3. 6		původní	100	21,5	16,5	0	↑ 6,24
4. 6		původní	100	21,5	16,5	0	↑ 6,36
7. 6		optimalizovaný	100	21	9,5	0	↓ 5,44
8. 6		optimalizovaný	100	21	9,5	0	↓ 5,53
9. 6		optimalizovaný	100	21	9,5	0	↓ 5,51
<b>Ohyb 120°</b>							
5. 6		původní	120	21,5	16,5	0	↑ 6,27
6. 6		původní	120	21,5	16,5	0	↑ 6,32
13. 6		optimalizovaný	120	21	4,5	0	↘ 5,85
14. 6		optimalizovaný	120	21	4,5	0	↘ 5,87
10. 6		optimalizovaný	120	21	9,5	0	↓ 5,52
11. 6		optimalizovaný	120	21	9,5	0	↓ 5,59
12. 6		optimalizovaný	120	21	9,5	0	↓ 5,50
15. 6		optimalizovaný	120	21	15	0	↓ 5,50
<b>Axiální přítlaky</b>							
19. 4		původní	120	21,5	16,5	2	↑ 5,85
20. 4		původní	120	21,5	16,5	6	↑ 4,82
21. 4		původní	120	21,5	16,5	10	↑ 4,31
16. 6		optimalizovaný	120	21	15	2	↓ 4,54
17. 4		optimalizovaný	120	21	15	6	↓ 3,85
18. 4		optimalizovaný	120	21	15	10	↓ 2,67

#### 4.5.4 Vyhodnocení ovality

Vzorky byly označeny číslem trubky a pořadovým číslem ohybu. Označen byl také počátek ohybu. Pro lepší manipulaci se vzorky byly trubky rozřezány na jednotlivé ohyby.

Měření ovality proběhlo v 9 rovinách po délce ohybu. Stejně jako v numerické části byla ovalita vyhodnocena po 20 stupních od 0 ° do 120 °. Další 2 hodnoty ovality byly doplněny pro oblast 10 mm před a za ohybem. Místa měření jsou zobrazena na obr. 60.

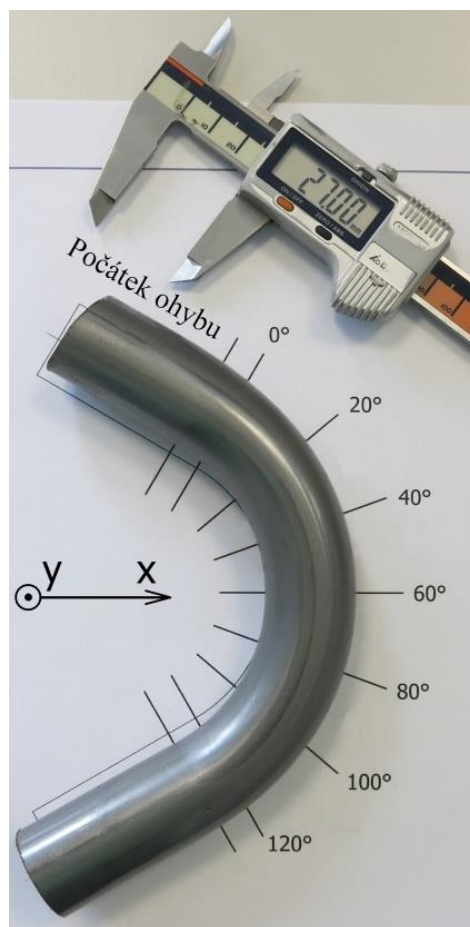
Vyhodnocení proběhlo obdobně, jako tomu bylo v experimentální části. Koeficient ovality je spočítán dle vzorce (4.1). Měření bylo provedeno digitálním posuvným měřítkem Garant délky 150 mm. Rozměr trubky v radiálním směru k ose rotace byl měřen pod označením X. Rozměr Y v axiálním směru k ose rotace. Hodnota výchozího průměru trubky  $D_0$  byla změřena v odchyškách jedné setiny milimetru. Ve výpočtech byl proto dosazován idealizovaný průměr 27 mm.

Měření bylo provedeno ručně. Na přesnost výsledků mělo vliv již ustavení ohybu na šabloně. K minimalizaci chyb měření byly měření provedeny pouze jedním pracovníkem (autorem). Ke zpřesnění výsledků byla měření opakována a ovalita byla v jednom místě zprůměrována až z 15 ohybů.

**Ohyby provedené s kleštinou** - na zkušebních tyčích bylo provedeno 6 ohybů. Zbývající délka trubky při posledním ohybu nestačuje pro uchycení kleštinou. Ohyb probíhá bez asistence podavače a trubka je vedena pouze přítlačnou lištou, což vede ke zhoršené kvalitě ohybu. Z tohoto důvodu jsou poslední ohyby indexované šestým pořadovým číslem vyhodnoceny zvlášť.

Měření byla zaznamenána do tabulek. Koeficient ovality byl k vyhodnocení zprůměrován. Kompletní data z měření jsou doložena v přílohách. Vzorový výpočet třetího řádku zkrácené tab. 13:

$$K = \frac{27,18 - 25,46}{27} \cdot 100 = 6,37 \%$$



Obr. 60 Měření ovality

Tab. 13 Záznam měření ovality - původní nástroj

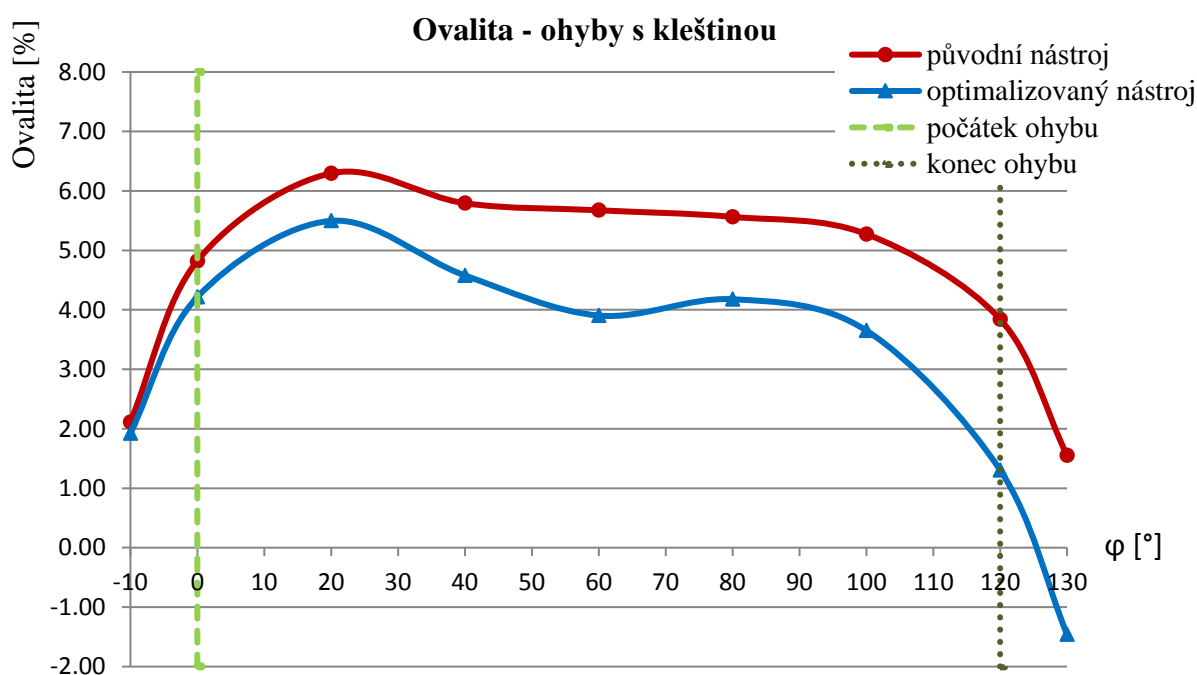
Trubka č. 5										
původní nástroj										
φ	5.1			5.2			5.3			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
[°]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[%]	[%]
-10	26,50	27,11	2,26	26,59	27,11	1,93	26,44	27,12	2,52	2,16
0	25,75	27,14	5,15	25,93	27,14	4,48	25,86	27,14	4,74	5,33
20	25,46	27,18	6,37	25,52	27,21	6,26	25,60	27,26	6,15	6,27
40	25,58	27,16	5,85	25,67	27,29	6,00	25,63	27,21	5,85	5,87

Všechny následující hodnoty ovality jsou při vyhodnocení zprůměrovány. Tab. 14 porovnává výsledky při upnutí původní a optimalizované přítlačné lišty. V posledním sloupci je dopočítáno procentuální zlepšení absolutních hodnot ovalit. Výsledky v tabulce jsou zprůměrovány z ohybů trubek číslo: 5, 6 a 15. V těchto případech působil stroj přibližně stejnými silami na nástroje.

Výsledky jsou graficky zpracovány na obr. 61. Optimalizovaný nástroj vykazuje lepší kvalitu výsledných ohybů. Požadavek na nástroj byl splněn. Ohyby provedené s optimalizovaným nástrojem vykazují nižší koeficient ovality. Při daném nastavení stroje je ovalita v kritickém místě 20 ° snížena o 13 %.

Tab. 14 Porovnání ovality – ohyby s kleštinou

úhel φ	ovalita K <sub>pův</sub>	ovalita K <sub>opt</sub>	zlepšení
[°]	[%]	[%]	[%]
-10	2,11	1,93	9
0	4,82	4,21	13
20	6,30	5,50	13
40	5,79	4,58	21
60	5,67	3,90	31
80	5,56	4,18	25
100	5,27	3,65	31
120	3,84	1,30	66
130	1,55	-1,46	6



Obr. 61 Ovalita ohybů vedených kleštinou

**Ohyby provedené bez kleštiny** – poslední ohyb na trubce byl vždy proveden bez vedení kleštinou. Zbývající délka polotovaru pro poslední ohyb nepřekračovala délku přítlačné lišty. Trubka zůstala sevřena pouze v upínací čelisti a ohyb byl zahájen po odsunu podavače. Ve všech případech nastavení stroje nabývají trubky větších distorzí průřezu. Na ohybu se však více projeví vliv přítlačné lišty, jelikož se trubka opírá výhradně o ni. Při porovnání lze konstatovat, že míra zlepšení kvality ohybu vzrostla. Koeficient ovality se však u obou nástrojů zhoršil. Výsledky v tab. 15 jsou získány z posledních ohybů trubek: 5, 6, 10, 11 a 12. Na obr. 62 je vynesena závislost ovality na úhlu ohybu  $\varphi$ .

Tab. 15 Porovnání ovality ohybů bez kleštiny

úhel $\varphi$ [°]	ovalita $K_{pův}$ [%]	ovalita $K_{opt}$ [%]	zlepšení [%]
-10	2,06	2,56	-24
0	5,11	4,63	9
20	7,09	5,83	18
40	6,76	5,10	25
60	6,76	4,75	30
80	6,98	4,73	32
100	6,85	4,30	37
120	4,33	1,70	61
130	2,02	-1,57	22



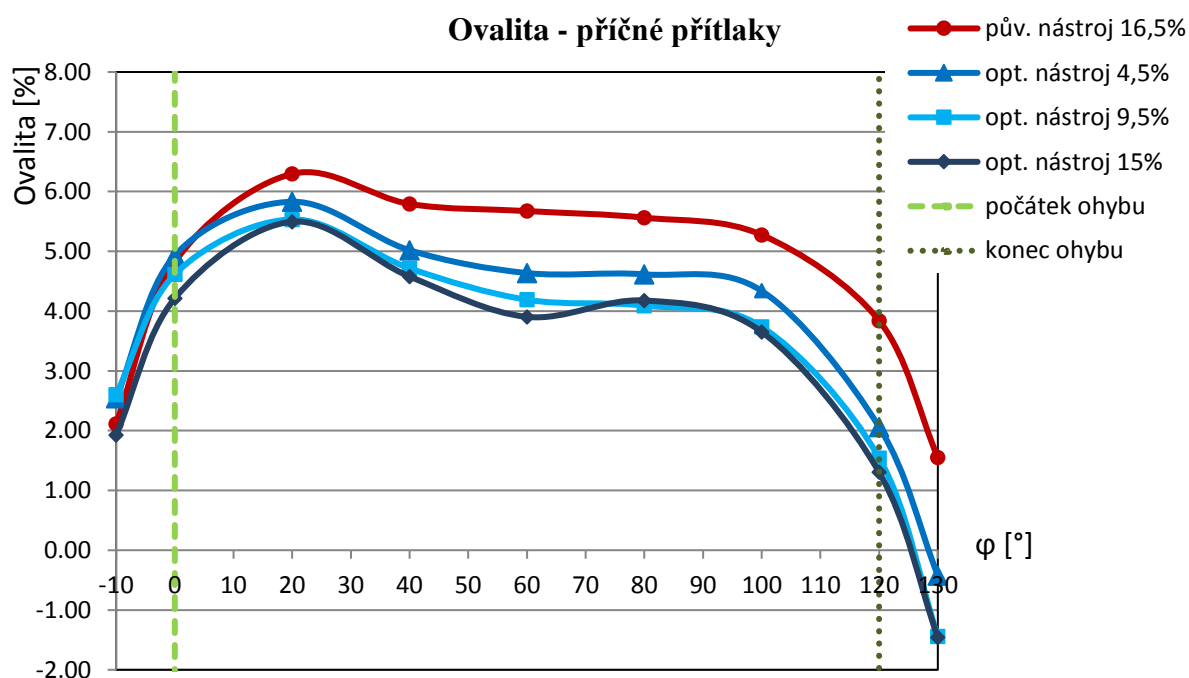
Obr. 62 Ovalita ohybů bez kleštiny

**Příčné přitlaky** – v rámci seřizování stroje byly ohyby provedeny se třemi příčnými přitlaky na přítlačnou lištu. Zvyšující se tlak působící z boku na lištu zlepšuje výslednou ovalitu, viz tab. 16. Uvedená procenta přitlaku reprezentují podíl maximálního zatížení stroje v dané ose. Nastavený přitlak je platný při předepnutí trubky během seřízení. Zatížení osy během ohybu vzrůstá kvůli odporu materiálu proti přetvoření. Stroj neustále zajišťuje zvolenou pozici nástroje. Pokud by při procesu došlo ke kritickému zatížení motorů, proces by se automaticky přerušil, aby nedošlo k poškození. Maximální zatížení osy stroje lze kontrolovat na panelu. Zatížení motoru se doporučuje zachovat pod 60 % k zamezení nadměrného opotřebení stroje a jeho časté údržbě. Maximální zaznamenané zatížení osy V bylo 40 %.

Tab. 16 Porovnání ovality – příčné přitlaky na lištu

úhel $\varphi$ [°]	ovalita	ovalita	ovalita
	$K_{opt}$ [%]	$K_{opt}$ [%]	$K_{opt}$ [%]
<b>příčný přitlak:</b>	<b>4,5%</b>	<b>9,5%</b>	<b>15%</b>
-10	2,54	2,60	1,93
0	4,93	4,62	4,21
20	5,83	5,53	5,50
40	5,02	4,72	4,58
60	4,64	4,19	3,90
80	4,61	4,09	4,18
100	4,34	3,74	3,65
120	2,06	1,54	1,30
130	-0,42	-1,44	-1,46

V grafu na obr. 63 jsou vynesena data z tabulky. Pro porovnání je červeně zobrazena i ovalita dosažená s původním nástrojem. Nejlepších výsledků dosahuje nástroj při nastavení osy V na 15 %. Dle tab. 5 kapacity stroje tomu odpovídá síla 21 kN.



Obr. 63 Ovalita ohybů s různými přitlaky

**Axiální přitlak** - v rámci výzkumu byly ohyby provedeny i s axiálními přitlaky. Axiální tlak je vytvořen kleštinou spolu s přitlačnou lištou. Kleština svírá trubku za vnější průměr v délce 40 mm. Oba nástroje se pohybují nastavenou rychlostí. Rychlost je zrychlena o uvedená procenta vztažená k původní rychlosti přísunu trubky (dle rotace matrice).

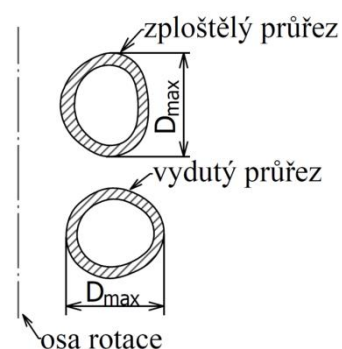
Jak bylo dříve vysvětleno, axiálním přitlakem je do místa ohybu vtlačeno více materiálu. Na výchozím polotovaru jsou proto ohnuty pouze 4 ohyby zadaných parametrů. Všechny ohyby jsou vedeny kleštinou.

Axiální působení zlepšuje, dle předpokladů, ovalitu. Klíčové je v této části srovnání výsledků mezi nástroji. V tab. 17 jsou zprůměrované výsledky tří testovaných přitlaků. Na obr. 65 je opět průběh ovality v závislosti na ohnutém úhlu. Křivky červených odstínů byly získány s původním nástrojem, zato modré odstíny reprezentují optimalizovaný nástroj. Obr. 65 graficky porovnává jednotlivá nastavení.

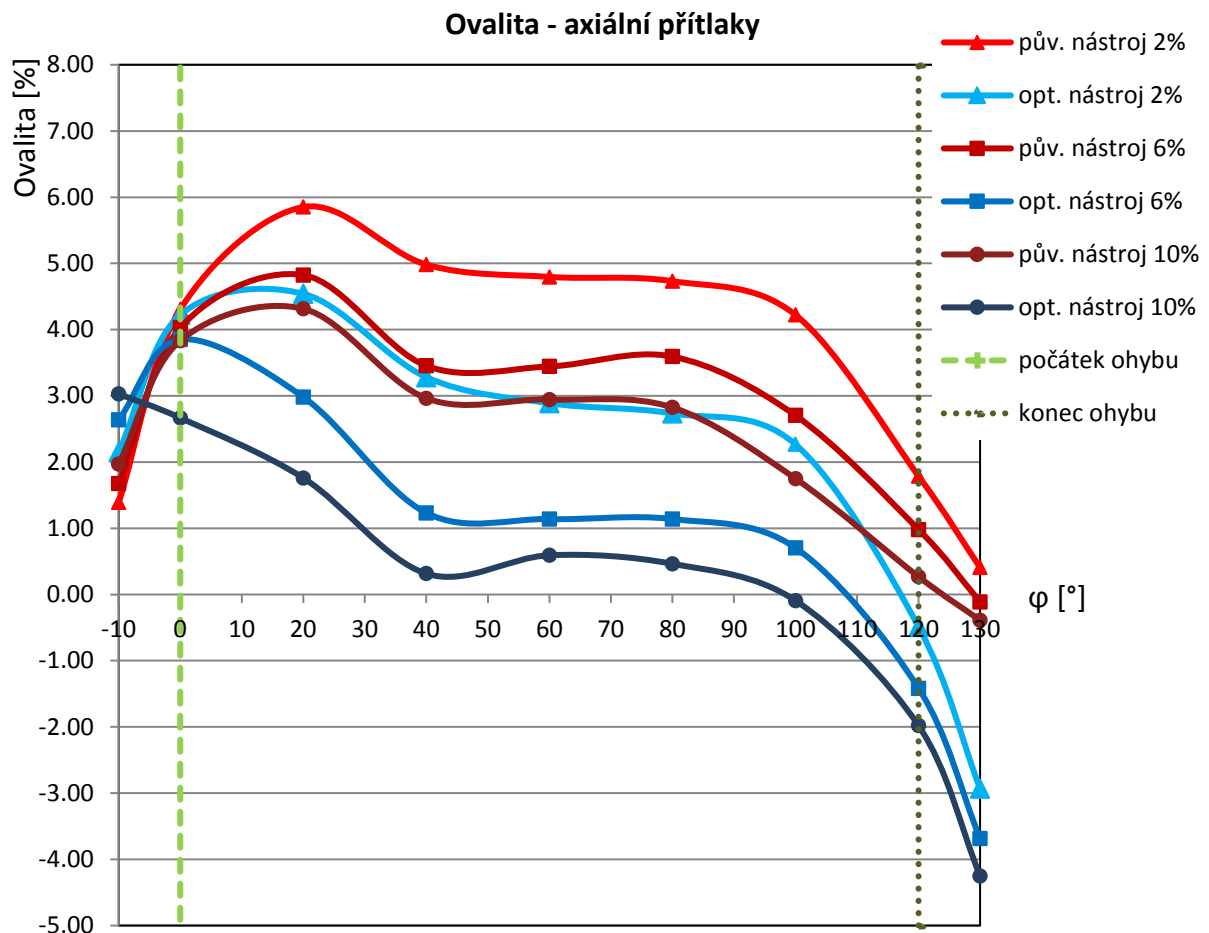
Tab. 17 Porovnání ovality – axiální přitlaky

úhel $\varphi$ [°]	ovalita zlepšení			ovalita zlepšení			ovalita zlepšení		
	$K_{pův}$ [%]	$K_{opt}$ [%]	[%]	$K_{pův}$ [%]	$K_{opt}$ [%]	[%]	$K_{pův}$ [%]	$K_{opt}$ [%]	[%]
<b>axiální přitlak:</b>	<b>2%</b>			<b>6%</b>			<b>10%</b>		
-10	1,39	2,15	-55	1,68	2,64	-57	1,97	3,03	-54
0	4,31	4,22	2	4,03	3,85	4	3,83	2,67	30
20	5,85	4,54	22	4,82	2,98	38	4,31	1,76	59
40	4,98	3,28	34	3,45	1,23	64	2,96	0,31	89
60	4,80	2,89	40	3,44	1,14	67	2,94	0,59	80
80	4,73	2,73	42	3,59	1,14	68	2,82	0,46	84
100	4,22	2,27	46	2,70	0,70	74	1,75	-0,09	95
120	1,79	-0,49	73	0,98	-1,42	-44	0,27	-1,98	-638
130	0,41	-2,93	-620	-0,11	-3,69	-3217	-0,39	-4,25	-993

Optimalizovaný nástroj má tendenci zvyšovat míru zlepšení ovality při aplikaci axiálního přitlaku. V řezu 20 ° roste procentuální zlepšení z 22 %, přes 38 % na 59 % při rychlosti podavače 110 %. Významné zlepšení kvality lze pozorovat na ohybu v oblasti do 100 °, kde dosahuje trubka téměř kruhovitěho tvaru. Opačný vliv nástroje lze pozorovat na konci ohybu. Za hranicí 110 ° se ovalita zhoršuje. Zajímavým poznatkem je však změna charakteru deformace. Nová geometrie nástroje umožnila zdeformovat průřez trubky do opačného směru. Tvarem drážky byl dosažen vydutý tvar trubky namísto zploštělého (obr. 64). Po zavedení upraveného koeficientu ovality (4.1) vychází výsledky při dosažení vydutého tvaru záporně. Míra zlepšení je v těchto případech mírně zavádějící.



Obr. 64 Změna deformace průřezu



Obr. 65 Ovalita ohybů s axiálním přitlakem

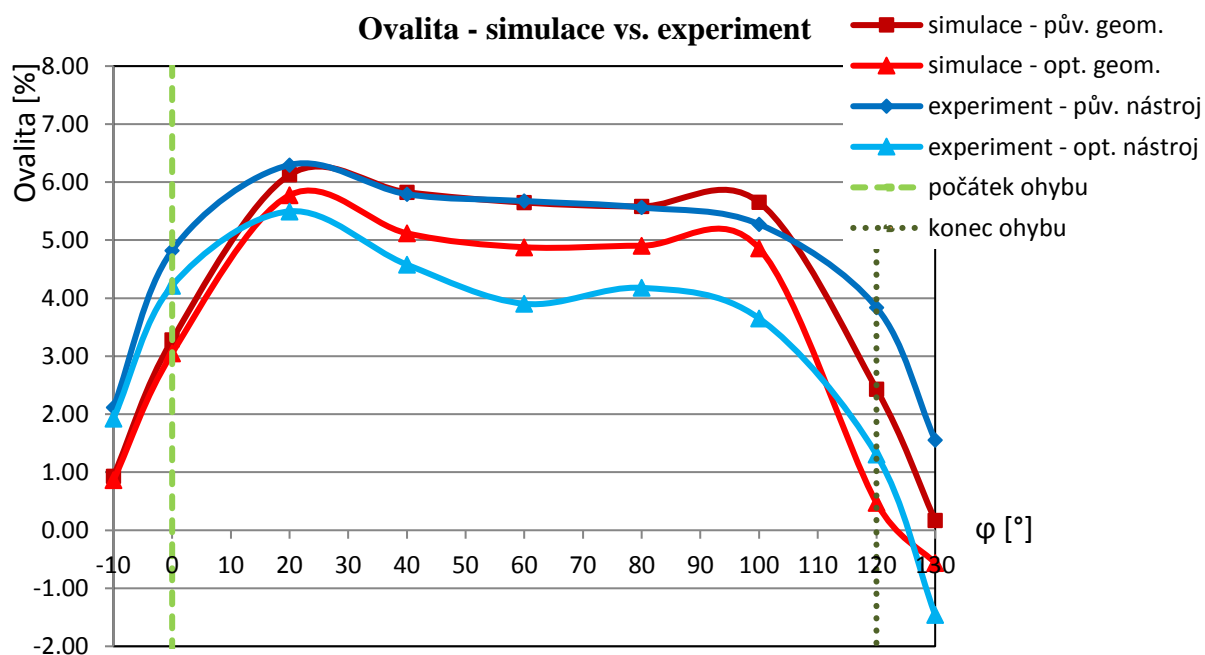
**Ohyb 100 °** - v rámci výzkumu bylo provedeno 30 ohybů úhlu 100 °. Kompletní změřená data jsou doložena v příloze 2. Tab. 18 shrnuje výsledky experimentů. Ovalita 100° ohybů potvrzuje dříve prezentované pozitivní výsledky optimalizovaného nástroje. Ovlivnění výsledků ohybu na 120 ° při provedení procesu ve dvou krocích lze zamítnout. Průběh ovality po délce ohybů má podobný charakter. Zprůměrované výsledky, spolu s mírou zlepšení, mají přitom velice blízké hodnoty 120° ohybům. Data v tab. 18 jsou získána z ohybů vedených kleštinou trubek číslo: 3 až 9 a 15.

Tab. 18 Porovnání ovality – úhly ohybu

úhel $\varphi$ [°]	ovalita	ovalita	zlepšení [%]	úhel $\varphi$ [°]	ovalita	ovalita	zlepšení [%]
	$K_{p\u00favy}$ [%]	$K_{opt}$ [%]			$K_{p\u00favy}$ [%]	$K_{opt}$ [%]	
<b>úhel ohybu:</b>	<b>120 °</b>			<b>100 °</b>			
-10	2,11	1,93	9	-10	2,34	2,04	13
0	4,82	4,21	13	0	4,80	4,13	14
20	6,30	5,50	13	20	6,30	5,50	13
40	5,79	4,58	21	40	5,84	4,75	19
60	5,67	3,90	31	60	5,37	4,12	23
80	5,56	4,18	25	80	5,12	3,72	27
100	5,27	3,65	31	100	3,64	1,09	70
120	3,84	1,30	66	110	1,11	-1,45	-31
130	1,55	-1,46	6				

## 4.6 Porovnání simulace s experimentem

Po provedení experimentů lze zpětně hodnotit přesnost simulovaných modelů. Pro následující práci s MKP modely je žádoucí upravit okrajové podmínky simulací a přiblížit se tak experimentálně změřeným výsledkům. Odladění je provedeno úpravou např.: koeficientů tření, materiálových charakteristik, způsobem nanesení sítě apod. Velký vliv na proces ohybu má samotný software stroje. Software automaticky řídí celý proces, nad rámec výchozího seřízení stroje. CNC ohýbačka je nelineárně naprogramována výrobcem na základě jeho zkušeností, což dotváří know-how jejich produktu. Kompletní sladění podmínek není proto reálné.



Obr. 66 Porovnání simulovaných výsledků s experimentem

Na obr. 66 je porovnání ovality simulací s reálnými experimenty. Znázorněná data jsou získána z tabulek číslo 10 a 14. Mírnou odlišností při experimentech bylo použití kratší upínací čelisti délky 30 mm.

## 4.7 Diskuze

Optimalizovaný nástroj prokazuje snížení ovality ohybů. Potlačení tohoto defektu je, kromě simulace, ověřeno 68 ohyby provedenými na CNC ohýbacím stroji. Dosažené výsledky potvrzují přímou návaznost geometrie přítlačné lišty na kvalitu ohybu. Trend úpravy drážky tvářecího nástroje lze doporučit pro navazující výzkum. Lze očekávat obdobné zlepšení i u odlišných parametrů ohybu.

Požadavku na lepší ovalitu ohybu lze dosáhnout aplikací zhotoveného nástroje namísto axiálního přítlaku s původním nástrojem. Optimalizovaný nástroj vykazuje lepších výsledků, než je dosaženo s 2% axiálním přítlakem při použití původního nástroje. Případně lze aplikovat výrazně nižší tlak pro dosažení obdobného výsledku. Na obr. 62 lze pozorovat přibližně stejný průběh ovality po délce ohybu s 2% přítlakem nového nástroje a 10% přítlakem nástroje původního. Axiální působení na trubku výrazně zatěžuje stroj ve všech jeho osách. Významný vliv na zatížení má tvářený materiál. Axiální přítlaky jsou limitovány kapacitou stroje. Poddajnost zkušebních vzorků umožnila provedení všech ohybů, přičemž 10% hodnotu přítlaku lze považovat za extrémní. U obtížně tvaritelných ocelí dosahuje axiální přítlak i záporných hodnot k provedení ohybu, bez přetížení stroje. Axiálního přítlaku proto nelze vždy ke snížení ovality využít.

Geometrie přítlačné lišty byla navržena s ohledem na stávající nástroje v sestavě. Pokud bychom přistoupili k úpravám tvaru matrice, vzniklo by více možností konstrukčních návrhů ke změně drážky přítlačné lišty a jejím možným zlepšením.

Na základě publikace [6] a provedených simulací autor usuzuje, že by proměnlivé řízení os stroje pozitivně působilo na ovalitu ohybu. Větší míra přítlaku na nástroje by měla být vyvozena při ohybu oblasti rovnoměrné ovality  $\varphi_A$ , jak ve směru axiálním, tak i ve směru příčném na přítlačnou lištu. V publikaci [6] bylo nerovnoměrného zatížení nástroje dosaženo mechanicky - excentrickým uchycením. V případě CNC stroje by se jednalo o úpravu kódu programu. Zavedení korekcí pro jednotlivé ohyby se ve velkosériové výrobě jeví jako nevyhovující. Jednak z důvodu objemu projektů a i kvůli rozladění stroje. Silové působení na nástroje bylo proto v experimentech analyzováno pouze s konstantní hodnotou.

## 5 ZÁVĚRY

Diplomová práce se zabývá tématem ohybu trubek za studena. Při ohýbání dochází k velkým přetvořením tvářeného materiálu způsobující různé defekty. Tok materiálu, jakožto nedílná součást procesu, zhoršuje výslednou kvalitu ohybů. Během ohýbání je materiál v oblasti vnějšího poloměru tažen ve 2 směrech, což má za následek jednak ztenčování stěny a také distorzi průřezu. Zploštění průřezu je jeden z hlavních defektů ohýbaných trubek, který je v práci důkladně prozkoumán.

Téma práce je zadáno na požadavky firmy A ve snaze zlepšit dosavadní technologii výroby a produkovat kvalitnější díly. Cílem práce je navrhnout geometrii nástroje, která způsobí co největší snížení ovality. Firmou byl definován výchozí polotovar a parametry ohybu. Předmětem analýzy je trubka o průměru 27 mm, tloušťce stěny 3,2 mm z nízkouhlíkové oceli 34MnB5. Zkoumaný ohyb byl ohnut o úhel 120 ° na poloměru matrice 60 mm. K provedení zadaného ohybu je ve firmě dostupný stroj Wafios RBV 60 ST, který provádí ohyb navíjením trubky na matrici.

V teoretické části práce byla popsána problematika ohýbání trubek zároveň s defekty vyskytujícími se při výrobě. V rámci výzkumu je přiblížena technologie navíjení s používanými ohýbacími nástroji. Teoreticky jsou rozebrány příčiny vzniku ovality a v úvodu praktické části, jsou představeny možnosti jejího snížení. Jedním ze způsobů snížení ovality je úprava tvářecích nástrojů.

Optimalizace tvářecího nástroje je řešena s využitím simulačního softwaru ANSYS Workbench 17. Program numericky počítá simulované modely na základě metody konečných prvků, jejich přínosy byly stručně zhodnoceny ve 3. kapitole. Geometrie ohýbacích nástrojů byla nejdříve upravena dle doporučení literatury. Numerické výsledky simulací ověřily vliv navržených nástrojů na výslednou ovalitu ohybu. Na základě simulovaných výsledků byl stanoven finální tvar optimalizované drážky přítlačné lišty, který vykazoval nejlepší výsledky. Jelikož modifikovaná geometrie nástroje vykazovala zlepšení ovality ohybů, byla optimalizovaná přítlačná lišta vyrobena pro experimentální ověření.

Prototypový nástroj byl zhotoven dle výkresové dokumentace vycházející ze simulací. Po dodání byla zkontrolována jeho rozměrová přesnost. K verifikaci vlivu nástroje na proces bylo provedeno 104 ohybů. Přibližně polovina z nich byla provedena s původní přítlačnou lištou pro porovnání výsledků. Na vznik ovality má vliv i nastavení stroje, respektive síly vyvinuté na nástroje. Ovalita byla proto vyhodnocena v kategoriích pro jednotlivé osy stroje ke zjištění optimálních podmínek procesu.

Požadavky kladené na optimalizovaný nástroj byly splněny. Experimentální výsledky potvrdily pozitivní vliv nástroje na výslednou ovalitu ohybu. V kritickém místě ohybu 20 °, kde dochází k největší distorzi průřezu, bylo dosaženo 13% zlepšení koeficientu ovality. V oblasti rovnoměrné ovality  $\varphi_A$  bylo vždy dosaženo většího zlepšení. Kompletní vyhodnocení ovality je uvedeno v kapitole 4.5.4. Součástí vyhodnocení jsou výsledky ohybů provedených bez vedení kleštinou, u kterých se více projevuje vliv navrženého nástroje. Zlepšení ovality v řezu 20 ° v tomto případě nabývá hodnoty 18 %. V rámci výzkumu byly provedeny i ohyby s axiálními přítlakami a také ohyby s úhlem ohybu

100 ° k ověření vlivu nástroje při mírně odlišném způsobu ohybu. Experimentálně zjištěná míra zlepšení ovality překonala výsledky získané při simulacích.

Optimalizací geometrie přítláčné lišty bylo dosaženo zlepšení ovality trubek v místě ohybu. Ovalitu ohybu lze snížit nejen axiálním přítlakem ale také vhodnou úpravou drážky nástroje. Analýza procesu představila i ostatní návrhy, které by mohly mít pozitivní vliv na ovalitu ohybu. Trend úpravy ohýbacích nástrojů lze nepochybně doporučit k navazujícímu výzkumu, neboť prokázal potenciál ve zlepšení kvality ohybu trubek ohýbaných bez trnu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [38]

1. AL-QURESHI, H.A. Elastic-plastic analysis of tube bending. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 1999, **39**(1), 87-104 [cit. 2017-04-19]. ISSN 08906955.
2. DAXIN, E., Yafei LIU a Huaibei FENG. Deformation Analysis for the Rotary Draw Bending Process of Circular Tubes: Stress Distribution and Wall Thinning. *Steel research international* [online]. Weinheim: WILEY- VCH Verlag, 1012, **81**(12), 1084-1088 [cit. 2017-01-21]. DOI: 10.1002/srin.201000109. ISSN 16113683.
3. EL MEGHARBEL, A., G.A. EL NASSER a Aly EL DOMIATY. Bending of tube and section made of strain-hardening materials. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2008, **203**(1), 372-380 [cit. 2017-05-12]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.078. ISSN 09240136.
4. FABÍK, Richard. *Modelování tvářecích procesů* [online]. Ostrava, 2013, , 76 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik\\_Modelovani\\_tvarecich\\_procesu.pdf](http://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf)
5. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. Brno: CERM, 2004, 167 s. ISBN 8021427647.
6. FRANZ, Wolf Dietrich. *Das Kalt-Biegen von Rohren: Verfahren und Maschinen*. Berlin: Springer, 1961.
7. FUSEK, Martin a Radim HALAMA. *MKH a MHP*. Ostrava, 2011, , 95.
8. GHAFOR, Khodayari. How material influences bending for hydroforming: Effects on ovality, springback, and wall thickness in tubes. *The Tube & Pipe Journal* [online]. **2001** [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/hydroforming/how-material-influences-bending-for-hydroforming>
9. HARTLEY, Peter, Ian PILLINGER a Clive STURGESS. *Numerical modelling of material deformation processes: research, development and applications*. Berlin: Springer, 1992, xviii, 460 s. : il. ISBN 354019584x.
10. JIANG, Z.Q., H. YANG, M. ZHAN, X.D. XU a G.J. LI. Coupling effects of material properties and the bending angle on the springback angle of a titanium alloy tube during numerically controlled bending. *Materials and Design* [online]. Elsevier, 2010, **31**(4), 2001-2010 [cit. 2017-03-16]. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.10.029. ISSN 02613069.
11. KIM, Nam-Ho. *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. New York: Springer US, 2015. ISBN 978-1-4419-1745-4.
12. KOLÁŘ, Vladimír, Ivan NĚMEC a Viktor KANICKÝ. *FEM: principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997, 401 s. ISBN 8072260219.

13. KOPŘIVA, Miroslav. *Počítačová podpora technologie: sylaby* [online]. Brno, **2002** [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/pocitacova\\_podpora\\_technologie\\_\\_kopriva.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/pocitacova_podpora_technologie__kopriva.pdf)
14. KUMAR, A. Optimizing the Rotary Draw Tube Bending Process to Avoid Wrinkles. *International Journal of Modelling and Simulation* [online]. Taylor, 2008, **28**(3), 281-291 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1080/02286203.2008.11442479. ISSN 02286203.
15. LEE, Huei-Huang. *Finite element simulations with ANSYS workbench 14: [theory, applications, case studies]*. Mission: SDC Publications, 2012, 602 s. : il. 1 CD-ROM. ISBN 9781585037254.
16. LI, H, H YANG, J YAN a M ZHAN. *Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube NC bending with large diameter and small bending radius* [online]. 2009, **45**(4), 921-934 [cit. 2017-03-20]. ISSN 09270256. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0927025609000032>
17. LI, H., H. YANG, M. ZHAN a Y.L. KOU. Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2010, **210**(1), 143-158 [cit. 2017-04-26]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.07.024. ISSN 09240136.
18. LI, H., H. YANG, Z.Y. ZHANG, G.J. LI, N. LIU a T. WELO. Multiple instability-constrained tube bending limits. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1402, **214**(2), 445-455 [cit. 2016-12-11]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.027. ISSN 09240136.
19. LI, Heng a He YANG. A Study on Multi-defect Constrained Bendability of Thin-walled Tube NC Bending Under Different Clearance. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. Elsevier, 2011, **24**(1), 102-112 [cit. 2017-05-15]. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60013-7. ISSN 10009361.
20. LIU, Yafei a Daxin E. Effects of Cross-Sectional Ovalization on Springback and Strain Distribution of Circular Tubes Under Bending. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. Boston: Springer US, 1112, **20**(9), 1591-1599 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1007/s11665-010-9813-z. ISSN 10599495.
21. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. 4th ed. United States: Thomson, c2007. ISBN 05-345-5298-6.
22. MARCINIAK, Z, J.L DUNCAN a S.J HU. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, xx, 211 s. : il. ISBN 0750653000.
23. MAREK, Jiří. Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabcich-stroju-cast-1.html>
24. MILLER, Gregory. *Tube forming processes: a comprehensive guide*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2003. ISBN 08-726-3633-X.

25. MILLER, J.E., S. KYRIAKIDES a A.H. BASTARD. On bend-stretch forming of aluminum extruded tubes — I: experiments. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. Elsevier, 2001, **43**(5), 1283-1317. DOI: 10.1016/S0020-7403(00)00039-4. ISSN 00207403.
26. PETERKOVA, Eva a Radko SAMEK. A New Approach to Determining the Bending Moment in Tube Forming. *Advanced Materials Research* [online]. 2015, **1127**, 31-37 [cit. 2017-01-26]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1127.31. ISBN 9783038356233. ISSN 10226680.
27. PETRUŠKA, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2499>
28. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: Část tváření*. FSI VUT v Brně. Brno, 2015.
29. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření. Část II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. : obr., čb. fot., grafy, tabulky ; 30 cm. ISBN 9788021444065.
30. TANG, N.C. Plastic-deformation analysis in tube bending. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. Elsevier, 2000, **77**(12), 751-759 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/S0308-0161(00)00061-2. ISSN 03080161.
31. VÍTEK, Antonín. *Ohýbání trubek*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966.
32. WEN, T. On a new concept of rotary draw bend-die adaptable for bending tubes with multiple outer diameters under non-mandrel condition. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1402, **214**(2), 311-317 [cit. 2017-04-29]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.019. ISSN 09240136.
33. YANG, He, Heng LI, Zhiyong ZHANG, Mei ZHAN, Jing LIU a Guangjun LI. Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies. *Chinese Journal of Aeronautics* [online]. Elsevier, 1202, **25**(1), 1-12 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/S1000-9361(11)60356-7. ISSN 10009361.
34. Gallery - Bend dies. *OMNI-X: Tube bending and End Forming Tools* [online]. [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: [http://www.omnibend.com/gallery\\_bend\\_dies.aspx](http://www.omnibend.com/gallery_bend_dies.aspx)
35. *ASM handbook. Volume 14B Metalworking: Sheet Forming*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2006. ISBN 978-0-87170-710-9.
36. 34MnB5: Boron alloyed quenched and tempered steel. *Salzgitter Flachstahl* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: [https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte\\_produkte/eng/34mnb5.pdf](https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/34mnb5.pdf)
37. *Produktový katalog: Kuličkové šrouby Kuřim, a.s.* [online]. In: . KSK precise motion, 2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: [http://www.ksk-pm.cz/fileadmin/user\\_upload/Ostatni\\_pdf\\_soubory/Ke\\_stazeni/Nove\\_prospekty/2016\\_Produktovy\\_katalog\\_CZ.pdf](http://www.ksk-pm.cz/fileadmin/user_upload/Ostatni_pdf_soubory/Ke_stazeni/Nove_prospekty/2016_Produktovy_katalog_CZ.pdf)

38. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. 2016 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
39. OMNI-X: Nástroje a přípravky na ohýbání trubek za studena. *OMNI-X Výrobce nástrojů pro ohýbání trubek* [online]. 2017 [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <https://www.omni-x.cz/cs/pruvodce-ohybanim>
40. *Huth Benders: Controlled Wrinkle Dies* [online]. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.huthbenders.com/huth-products/tooling/bending-dies-and-back-shoes/controlled-wrinkle-dies>
41. *CNC Tube bending machine: RBV 42 ST, RBV 60 ST, RBV 60 HD* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: <http://www.wafios.com/nc/maschinen/produktgruppe/einkopfrohrbiegemaschine/>
42. *Mecway Finite Element Analysis* [online]. Version 7.0. 2017 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://mecway.com/manual.pdf>
43. *Euro Inox: Bending stainless steel tube - Design benefits in engineering and architecture*. 2012. ISBN 978-2-87997-045-5.
44. *FEMAP V10.1.1 & NX Nastran 7.0: Mesh, Mesh Control, Approach On Surface* [online]. 2010 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [http://www.iberisa.com/soporte/femap/soldadura\\_punto\\_a\\_punto.htm](http://www.iberisa.com/soporte/femap/soldadura_punto_a_punto.htm)
45. Real and simulated car crash. In: *Make software, change the world!* [online]. Honda R&D Americas, 2014 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.computerhistory.org/makesoftware/exhibit/car-crash-simulation/>
46. *Svět CNC strojů: Kuličkové šrouby* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.cnc.estranky.cz/clanky/kulickove-srouby.html>
47. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie: Určeno pro posl. fak. strojní*. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. ISBN 80-214-0128-1.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
$D_{max}$	[mm]	Maximální průměr deformované trubky
$D_{min}$	[mm]	Minimální průměr deformované trubky
$D_o$	[mm]	Výchozí průměr trubky
$E$	[MPa]	Modul pružnosti materiálu
$J_x$	[mm <sup>4</sup> ]	Kvadratický moment průřezu
$K_o$	[%]	Koeficient ovality dle literatury
$K$	[%]	Koeficient ovality užívaný v práci
$K'$	[%]	Koeficient ovality simulovaných modelů
$K_{pův}$	[%]	Koeficient ovality při užití původního nástroje
$K_{opt}$	[%]	Koeficient ovality při užití optimalizovaného nástroje
$k$	[-]	Střední relativní poloměr ohybu
$l$	[mm]	Celková délka oblouku
$l_k$	[mm]	Délka oblouku v rovnoměrně deformované oblasti
$l_p$	[mm]	Délka oblouku v nerovnoměrně deformované oblasti
$M_x$	[Nmm]	Ohybový moment před odlehčením
$R$	[mm]	Poloměr ohybu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$R_x$	[mm]	Poloměr ohybu před odlehčením
$R_{zb}$	[mm]	Zbytkový poloměr ohybu
$r_s$	[mm]	Střední poloměr trubky
$t$	[mm]	Lokální tloušťka stěny
$t_{min}$	[mm]	Minimální tloušťka stěny
$t_o$	[mm]	Výchozí tloušťka stěny
$X$	[mm]	Deformovaný průřez v axiálním směru k ose rotace
$X_{max}$	[mm]	Maximální vzdálenost trubky ve směru X
$X_{min}$	[mm]	Nejbližší vzdálenost trubky ve směru X
$x$	[mm]	Posuv neutrální osy
$Y$	[mm]	Deformovaný průřez v radiálním směru k ose rotace
$Y_{max}$	[mm]	Maximální vzdálenost trubky ve směru Y
$Y_{min}$	[mm]	Minimální vzdálenost trubky ve směru Y
$\alpha$	[°]	Úhel pozice elementu v průřezu
$\beta$	[rad]	Úhel oblouku s proměnným přetvořením
$\Delta\alpha$	[°]	Úhel odpružení
$\gamma_{xy}$	[-]	Úhlová poměrná deformace v rovině xy
$\gamma_{yz}$	[-]	Úhlová poměrná deformace v rovině yz

$\gamma_{zx}$	[-]	Úhlová poměrná deformace v rovině zx
$\epsilon_{\max}$	[-]	Maximální přetvoření
$\epsilon_x$	[-]	Přetvoření ve směru x
$\epsilon_y$	[-]	Přetvoření ve směru y
$\epsilon_z$	[-]	Přetvoření ve směru z
$\mu$	[-]	Poissonovo číslo
$\sigma_c$	[MPa]	Obvodové napětí v průřezu
$\sigma_k$	[MPa]	Mez kluzu
$\sigma_x$	[MPa]	Podélné napětí v průřezu
$\tau_{xy}$	[MPa]	Smykové napětí v rovině xy
$\tau_{yz}$	[MPa]	Smykové napětí v rovině yz
$\tau_{zx}$	[MPa]	Smykové napětí v rovině zx
$\varphi$	[°]	Úhel ohybu
$\varphi_A$	[°]	Oblast rovnoměrné ovality
$\varphi_r$	[-]	Logaritmické přetvoření v radiálním směru
<b>2D</b>	[-]	Dvě dimenze
<b>3D</b>	[-]	Tři dimenze
$A_5$	[%]	Tažnost krátké tyče
<b>FEM</b>	[-]	Finite element method
<b>CAD</b>	[-]	Computer aided design
<b>CNC</b>	[-]	Computer numerical control
<b>MKP</b>	[-]	Metoda konečných prvků

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Aplikace trubek .....	10
Obr. 2 Způsoby ohybu .....	13
Obr. 3 Průřez ohnutou trubkou .....	13
Obr. 4 Modely finálních příčných průřezů .....	15
Obr. 5 Silové rozložení .....	16
Obr. 6 Rozdělení napětí .....	16
Obr. 7 Materiálové modely: a) průběh osového přetvoření, b) průběh osového napětí. ....	17
Obr. 8 Zbytkové napětí .....	17
Obr. 9 Ovalita průřezu .....	19
Obr. 10 Rozklad sil v místě ohybu .....	19
Obr. 11 Nerovnoměrné rozložení ovality .....	20
Obr. 12 Ztenčení stěny .....	20
Obr. 13 Zvlnění stěny .....	21
Obr. 14 Odpružení po ohybu a) zbytkový poloměr, b) elastická část deformace .....	21
Obr. 15 Ohyb navíjením .....	23
Obr. 16 Ohýbací matrice .....	23
Obr. 17 Matrice v zásobníku .....	24
Obr. 18 Matrice pro záhybový ohyb .....	24
Obr. 19 Upínací lišta.....	24
Obr. 20 Přítlačná lišta se závěsy.....	25
Obr. 21 Vyhlazovací lišta s výměnnou vložkou.....	25
Obr. 22 Segmentový trn .....	26
Obr. 23 Dělená kleština .....	26
Obr. 24 Porovnání přesnosti simulace s crash testem vozidla Honda.....	27
Obr. 25 Lineární prvky .....	28
Obr. 26 Závislost počtu prvků na dosažené přesnosti .....	28
Obr. 27 Způsoby nanesení sítě na plošný prvek.....	29
Obr. 28 Deformace prvku.....	29
Obr. 29 Princip řešení modifikovanou Newton-Raphsonovou metodou .....	31
Obr. 30 Zadaný ohyb.....	33
Obr. 31 Ohýbací zařízení Wafios RBV 60 ST .....	33
Obr. 32 Způsoby vyvození axiální tlakové síly .....	34
Obr. 33 Způsoby úchopu kleštinou .....	35
Obr. 34 Kovové trny.....	36
Obr. 35 Nomogram pro určení užití trnu.....	36
Obr. 36 Zdeformovaný průřez trubky.....	38
Obr. 37 Vliv nového designu nástroje .....	38
Obr. 38 Průběh silového působení: a) dělený nástroj – tlustá podložka, b) standardní nástroj, c) dělený nástroj – tenká podložka, d) nástroj s rádiusovou drážkou.....	38
Obr. 39 Modifikované tvary drážek .....	39
Obr. 40 Drážky kuličkových šroubů .....	40
Obr. 41 Blokové schéma vývoje prototypu .....	40
Obr. 42 Sestava nástrojů s trubkou.....	41
Obr. 43 Postup úpravy drážky přítlačné lišty .....	42
Obr. 44 Tahová zkouška oceli 34MnB5.....	43
Obr. 45 Kontaktní plochy .....	44
Obr. 46 Nanesení konečnoprvkové sítě.....	44
Obr. 47 Silové působení na model.....	46
Obr. 48 Deformace průřezu .....	47

Obr. 49 Pohled na optimalizovanou .....	47
Obr. 50 Celkové přetvoření trubky – výchozí stav.....	48
Obr. 51 Celkové přetvoření trubky – optimalizovaný nástroj .....	48
Obr. 52 Vyhodnocení ovality .....	49
Obr. 53 Ovalita simulovaných modelů.....	50
Obr. 54 Změna tloušťky stěny .....	51
Obr. 55 Prototypový nástroj v řezu .....	52
Obr. 56 Optimalizovaný nástroj .....	53
Obr. 57 Geometrie vzorku .....	53
Obr. 58 Řízené osy stroje .....	54
Obr. 59 Porovnání nástrojů.....	54
Obr. 60 Měření ovality .....	56
Obr. 61 Ovalita ohybů vedených kleštinou .....	57
Obr. 62 Ovalita ohybů bez kleštiny .....	58
Obr. 63 Ovalita ohybů s různými přítlaky .....	59
Obr. 64 Změna deformace průřezu.....	60
Obr. 65 Ovalita ohybů s axiálním přítlakem .....	61
Obr. 66 Porovnání simulovaných výsledků s experimentem .....	62

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Specifikace oceli 34MnB5 .....	12
Tab. 2 Kritéria technologičnosti .....	18
Tab. 3 Srovnání MKP algoritmů . .....	32
Tab. 4 Zadané parametry ohybu.....	33
Tab. 5 Technická data ohýbačky Wafios RBV 60 ST .....	33
Tab. 6 Vliv způsobu uchopení trubky kleštinou na změnu tloušťky stěny . .....	35
Tab. 7 Rozměry součástí ve výpočtovém modelu .....	41
Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli 34MnB5 .....	43
Tab. 9 Stanovení ovality výchozího simulovaného modelu.....	49
Tab. 10 Porovnání ovality simulovaných modelů .....	50
Tab. 11 Kontrola geometrie drážky nástroje .....	53
Tab. 12 Přehled provedených ohybů .....	55
Tab. 13 Záznam měření ovality - původní nástroj.....	57
Tab. 14 Porovnání ovality – ohyby s kleštinou .....	57
Tab. 15 Porovnání ovality ohybů bez kleštiny .....	58
Tab. 16 Porovnání ovality – příčné přítlaky na lištu .....	59
Tab. 17 Porovnání ovality – axiální přítlaky .....	60
Tab. 18 Porovnání ovality – úhly ohybu .....	62

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Simulované výsledky procesu
Příloha 2 Naměřená data ovality trubek – ohyby 100 °
Příloha 3 Naměřená data ovality trubek – ohyby 120 °
Příloha 4 Naměřená data ovality trubek – axiální přítlaky

Simulace ohybu - původní nástroj							
úhel $\varphi$	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$Y_{\max}$	$Y_{\min}$	X	Y	$K'$
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
-10	73,26	46,50	13,50	-13,51	26,76	27,01	<b>0,93</b>
0	72,59	46,48	13,50	-13,50	26,11	27,00	<b>3,28</b>
20	71,88	46,56	13,49	-13,49	25,32	26,98	<b>6,13</b>
40	72,01	46,60	13,49	-13,50	25,41	26,98	<b>5,83</b>
60	72,05	46,60	13,48	-13,50	25,46	26,98	<b>5,65</b>
80	72,05	46,58	13,48	-13,50	25,47	26,98	<b>5,58</b>
100	71,98	46,53	13,48	-13,49	25,45	26,97	<b>5,65</b>
120	72,83	46,49	13,49	-13,50	26,34	26,99	<b>2,43</b>
130	73,35	46,37	13,50	-13,53	26,99	27,03	<b>0,17</b>
Simulace ohybu - optimalizovaný nástroj							
úhel $\varphi$	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$Y_{\max}$	$Y_{\min}$	X	Y	$K'$
[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
-10	73,28	46,50	13,50	-13,51	26,78	27,01	<b>0,86</b>
0	72,67	46,49	13,50	-13,50	26,18	27,00	<b>3,05</b>
20	71,96	46,57	13,47	-13,48	25,39	26,95	<b>5,77</b>
40	72,19	46,61	13,48	-13,48	25,57	26,96	<b>5,12</b>
60	72,25	46,61	13,48	-13,48	25,64	26,95	<b>4,88</b>
80	72,22	46,59	13,48	-13,48	25,63	26,95	<b>4,90</b>
100	72,15	46,52	13,47	-13,47	25,63	26,94	<b>4,86</b>
120	73,39	46,54	13,49	-13,49	26,85	26,98	<b>0,47</b>
130	74,03	46,84	13,50	-13,53	27,18	27,03	<b>-0,56</b>

Trubka č. 3 Původní nástroj																			
	3.1			3.2			3.3			3.4			3.5			3.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,53	27,17	2,37	26,65	27,12	1,74	26,48	27,13	2,41	26,50	27,14	2,37	26,50	27,13	2,33	26,43	27,14	2,63	2,24
0	25,98	27,18	4,44	25,82	27,13	4,85	25,88	27,16	4,74	25,90	27,14	4,59	25,78	27,14	5,04	25,76	27,16	5,19	4,73
20	25,44	27,15	6,33	25,47	27,15	6,22	25,46	27,17	6,33	25,51	27,17	6,15	25,50	27,17	6,19	25,32	27,15	6,78	6,24
40	25,51	27,17	6,15	25,56	27,17	5,96	25,59	27,17	5,85	25,59	27,16	5,81	25,64	27,17	5,67	25,32	27,15	6,78	5,89
60	25,67	27,19	5,63	25,69	27,16	5,44	25,72	27,17	5,37	25,72	27,17	5,37	25,77	27,16	5,15	25,38	27,20	6,74	5,39
80	25,72	27,18	5,41	25,76	27,17	5,22	25,78	27,16	5,11	25,79	27,14	5,00	25,80	27,15	5,00	25,41	27,17	6,52	5,15
100	26,08	27,19	4,11	25,99	27,20	4,48	26,16	27,13	3,59	26,27	27,16	3,30	26,07	27,15	4,00	25,98	27,16	4,37	3,90
110	26,83	27,20	1,37	26,69	27,16	1,74	26,88	27,19	1,15	26,88	27,21	1,22	26,91	27,15	0,89	26,72	27,16	1,63	1,27
Trubka č. 4 Původní nástroj																			
	4.1			4.2			4.3			4.4			4.5			4.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,50	27,07	2,11	26,54	27,12	2,15	26,37	27,11	2,74	26,46	27,12	2,44	26,38	27,12	2,74	26,40	27,12	2,67	2,44
0	25,85	27,11	4,67	25,82	27,13	4,85	25,72	27,12	5,19	25,90	27,13	4,56	25,77	27,13	5,04	25,66	27,13	5,44	4,86
20	25,41	27,13	6,37	25,42	27,15	6,41	25,42	27,14	6,37	25,43	27,15	6,37	25,45	27,15	6,30	25,23	27,14	7,07	6,36
40	25,59	27,15	5,78	25,57	27,15	5,85	25,57	27,15	5,85	25,59	27,16	5,81	25,62	27,15	5,67	25,27	27,14	6,93	5,79
60	25,68	27,15	5,44	25,71	27,15	5,33	25,69	27,14	5,37	25,71	27,15	5,33	25,72	27,15	5,30	25,32	27,13	6,70	5,36
80	25,74	27,14	5,19	25,78	27,15	5,07	25,77	27,16	5,15	25,79	27,15	5,04	25,79	27,15	5,04	25,36	27,14	6,59	5,10
100	26,17	27,12	3,52	26,23	27,14	3,37	26,23	27,13	3,33	26,20	27,12	3,41	26,23	27,13	3,33	25,81	27,14	4,93	3,39
110	26,86	27,13	1,00	26,88	27,14	0,96	26,88	27,15	1,00	26,90	27,15	0,93	26,91	27,14	0,85	26,64	27,14	1,85	0,95
Trubka č. 7 Optimalizovaný nástroj																			
	7.1			7.2			7.3			7.4			7.5			7.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,53	27,07	2,00	26,64	27,09	1,67	26,59	27,12	1,96	26,56	27,09	1,96	26,41	27,07	2,44	26,70	27,10	1,48	2,01
0	25,89	27,10	4,48	25,95	27,10	4,26	26,00	27,10	4,07	25,94	27,11	4,33	25,99	27,11	4,15	25,95	27,11	4,30	4,26
20	25,66	27,11	5,37	25,64	27,12	5,48	25,63	27,12	5,52	25,64	27,13	5,52	25,68	27,12	5,33	25,55	27,12	5,81	5,44
40	25,83	27,12	4,78	25,82	27,12	4,81	25,83	27,12	4,78	25,86	27,12	4,67	25,89	27,13	4,59	25,75	27,11	5,04	4,73
60	25,94	27,09	4,26	25,99	27,10	4,11	26,01	27,10	4,04	25,98	27,09	4,11	26,03	27,11	4,00	25,80	27,07	4,70	4,10
80	26,05	27,09	3,85	26,08	27,09	3,74	26,07	27,06	3,67	26,08	27,10	3,78	26,11	27,11	3,70	25,85	27,04	4,41	3,75
100	26,65	27,02	1,37	26,81	27,03	0,81	26,80	27,00	0,74	26,80	27,02	0,81	26,82	27,03	0,78	26,43	27,00	2,11	0,90
110	27,33	26,97	-1,33	27,35	26,94	-1,52	27,30	26,97	-1,22	27,37	26,97	-1,48	27,41	26,99	-1,56	27,17	26,89	-1,04	-1,42
Trubka č. 8 Optimalizovaný nástroj																			
	8.1			8.2			8.3			8.4			8.5			8.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,48	27,10	2,30	26,48	27,08	2,22	26,41	27,12	2,63	26,41	27,09	2,52	26,57	27,12	2,04	26,60	27,12	1,93	2,34
0	25,98	27,13	4,26	25,99	27,11	4,15	25,95	27,11	4,30	26,07	27,12	3,89	26,22	27,11	3,30	25,88	27,12	4,59	3,98
20	25,63	27,14	5,59	25,63	27,11	5,48	25,63	27,14	5,59	25,65	27,12	5,44	25,65	27,15	5,56	25,50	27,11	5,96	5,53
40	25,83	27,14	4,85	25,80	27,12	4,89	25,84	27,12	4,74	25,80	27,14	4,96	25,85	27,13	4,74	25,65	27,10	5,37	4,84
60	25,98	27,11	4,19	25,96	27,12	4,30	25,99	27,12	4,19	26,02	27,12	4,07	26,02	27,11	4,04	25,76	27,10	4,96	4,16
80	26,06	27,11	3,89	26,05	27,09	3,85	26,11	27,09	3,63	26,11	27,09	3,63	26,11	27,13	3,78	25,83	27,05	4,52	3,76
100	26,86	27,14	1,04	26,72	27,10	1,41	26,89	27,03	0,52	26,70	27,11	1,52	26,90	27,07	0,63	26,68	27,06	1,41	1,02
110	27,45	26,97	-1,78	27,38	27,06	-1,19	27,43	27,10	-1,22	27,48	26,99	-1,81	27,46	27,00	-1,70	27,30	27,02	-1,04	-1,54
Trubka č. 9 Optimalizovaný nástroj																			
	9.1			9.2			9.3			9.4			9.5			9.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,58	27,10	1,93	26,60	27,06	1,70	26,63	27,10	1,74	26,62	27,10	1,78	26,64	27,09	1,67	26,55	27,11	2,07	1,76
0	25,89	27,12	4,56	26,03	27,10	3,96	26,02	27,11	4,04	26,03	27,12	4,04	25,99	27,11	4,15	25,97	27,11	4,22	4,15
20	25,61	27,12	5,59	25,65	27,11	5,41	25,63	27,13	5,56	25,63	27,14	5,59	25,67	27,13	5,41	25,57	27,12	5,74	5,51
40	25,82	27,11	4,78	25,84	27,13	4,78	25,89	27,13	4,59	25,85	27,12	4,70	25,88	27,13	4,63	25,71	27,09	5,11	4,70
60	25,97	27,08	4,11	25,98	27,11	4,19	26,00	27,10	4,07	26,00	27,11	4,11	26,03	27,11	4,00	25,82	27,08	4,67	4,10
80	26,07	27,06	3,67	26,09	27,10	3,74	26,10	27,08	3,63	26,11	27,11	3,70	26,13	27,09	3,56	25,88	27,07	4,41	3,66
100	26,88	27,02	0,52	26,66	27,04	1,41	26,76	27,07	1,15	26,14	27,04	3,33	26,92	27,02	0,37	26,59	26,99	1,48	1,36
110	27,37	26,97	-1,48	27,33	27,02	-1,15	27,32	27,00	-1,19	27,35	27,00	-1,30	27,41	26,91	-1,85	27,30	26,89	-1,52	-1,39

Trubka č. 5 Původní nástroj																			
	5.1			5.2			5.3			5.4			5.5			5.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,50	27,11	2,26	26,59	27,11	1,93	26,44	27,12	2,52	26,50	27,12	2,30	26,62	27,11	1,81	26,66	27,14	1,78	2,16
0	25,75	27,14	5,15	25,93	27,14	4,48	25,86	27,14	4,74	25,83	27,20	5,07	25,19	27,13	7,19	25,93	27,23	4,81	5,33
20	25,46	27,18	6,37	25,52	27,21	6,26	25,60	27,26	6,15	25,48	27,18	6,30	25,46	27,16	6,30	25,30	27,16	6,89	6,27
40	25,58	27,16	5,85	25,67	27,29	6,00	25,63	27,21	5,85	25,60	27,16	5,78	25,60	27,18	5,85	25,33	27,16	6,78	5,87
60	25,66	27,33	6,19	25,75	27,18	5,30	25,69	27,21	5,63	25,66	27,20	5,70	25,66	27,17	5,59	25,38	27,14	6,52	5,68
80	25,69	27,17	5,48	25,69	27,19	5,56	25,72	27,19	5,44	25,70	27,19	5,52	25,68	27,20	5,63	25,29	27,16	6,93	5,53
100	25,76	27,16	5,19	25,79	27,30	5,59	25,78	27,18	5,19	25,76	27,21	5,37	25,75	27,16	5,22	25,32	27,21	7,00	5,31
120	26,19	27,14	3,52	25,98	27,24	4,67	26,27	27,23	3,56	26,13	27,19	3,93	26,16	27,12	3,56	25,63	27,11	5,48	3,84
130	26,85	27,16	1,15	26,57	27,26	2,56	26,92	27,31	1,44	26,76	27,23	1,74	26,86	27,19	1,22	26,55	27,20	2,41	1,62
Trubka č. 6 Původní nástroj																			
	6.1			6.2			6.3			6.4			6.5			6.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,46	27,13	2,48	26,63	27,20	2,11	26,63	27,19	2,07	26,45	27,08	2,33	26,68	27,04	1,33	26,52	27,15	2,33	2,07
0	25,75	27,14	5,15	25,96	27,16	4,44	26,05	27,15	4,07	25,83	27,13	4,81	26,27	27,11	3,11	25,67	27,13	5,41	4,32
20	25,46	27,18	6,37	25,49	27,22	6,41	25,49	27,30	6,70	25,58	27,18	5,93	25,50	27,17	6,19	25,30	27,27	7,30	6,32
40	25,64	27,15	5,59	25,62	27,17	5,74	25,58	27,17	5,89	25,67	27,20	5,67	25,63	27,17	5,70	25,37	27,19	6,74	5,72
60	25,67	27,15	5,48	25,66	27,28	6,00	25,69	27,20	5,59	25,67	27,25	5,85	25,74	27,20	5,41	25,35	27,24	7,00	5,67
80	25,70	27,20	5,56	25,66	27,18	5,63	25,68	27,18	5,56	25,69	27,23	5,70	25,71	27,21	5,56	25,32	27,22	7,04	5,60
100	25,80	27,17	5,07	25,75	27,19	5,33	25,75	27,18	5,30	25,78	27,21	5,30	25,80	27,20	5,19	25,45	27,26	6,70	5,24
120	26,05	27,12	3,96	26,05	27,27	4,52	26,19	27,17	3,63	26,18	27,20	3,78	26,25	27,14	3,30	26,27	27,13	3,19	3,84
130	26,73	27,20	1,74	26,76	27,21	1,67	26,83	27,17	1,26	26,88	27,16	1,04	26,69	27,15	1,70	26,66	27,10	1,63	1,48
Trubka č. 10 Optimalizovaný nástroj																			
	10.1			10.2			10.3			10.4			10.5			10.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,35	27,11	2,81	26,33	27,10	2,85	26,35	27,10	2,78	26,42	27,09	2,48	26,35	27,09	2,74	26,40	27,10	2,59	2,73
0	25,80	27,12	4,89	25,74	27,12	5,11	25,84	27,12	4,74	25,81	27,11	4,81	25,84	27,10	4,67	25,86	27,11	4,63	4,84
20	25,63	27,13	5,56	25,66	27,14	5,48	25,63	27,13	5,56	25,63	27,13	5,56	25,66	27,13	5,44	25,56	27,12	5,78	5,52
40	25,85	27,13	4,74	25,89	27,12	4,56	25,85	27,11	4,67	25,85	27,14	4,78	25,87	27,15	4,74	25,73	27,11	5,11	4,70
60	26,00	27,10	4,07	26,00	27,10	4,07	26,00	27,11	4,11	25,97	27,12	4,26	25,98	27,12	4,22	25,82	27,09	4,70	4,15
80	26,04	27,06	3,78	26,03	27,12	4,04	26,01	27,13	4,15	26,00	27,14	4,22	26,00	27,12	4,15	25,83	27,08	4,63	4,07
100	26,09	27,05	3,56	26,10	27,08	3,63	26,07	27,08	3,74	26,01	27,06	3,89	26,05	27,10	3,89	25,88	27,01	4,19	3,74
120	26,53	27,00	1,74	26,51	27,00	1,81	26,55	27,00	1,67	26,43	27,04	2,26	26,39	27,01	2,30	26,61	27,00	1,44	1,96
130	27,27	26,96	-1,15	27,36	26,95	-1,52	27,30	26,97	-1,22	27,31	26,95	-1,33	27,25	26,92	-1,22	27,39	26,94	-1,67	-1,29
Trubka č. 11 Optimalizovaný nástroj																			
	11.1			11.2			11.3			11.4			11.5			11.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,43	27,11	2,52	26,47	27,10	2,33	26,41	27,10	2,56	26,43	27,11	2,52	26,36	27,10	2,74	26,30	27,10	2,96	2,53
0	25,86	27,12	4,67	25,85	27,11	4,67	25,76	27,11	5,00	25,90	27,10	4,44	25,89	27,12	4,56	25,74	27,11	5,07	4,67
20	25,60	27,13	5,67	25,61	27,14	5,67	25,63	27,12	5,52	25,61	27,12	5,59	25,65	27,13	5,48	25,53	27,12	5,89	5,59
40	25,85	27,13	4,74	25,83	27,13	4,81	25,86	27,14	4,74	25,85	27,13	4,74	25,90	27,11	4,48	25,72	27,10	5,11	4,70
60	25,97	27,10	4,19	25,97	27,11	4,22	25,97	27,11	4,22	25,98	27,12	4,22	26,00	27,12	4,15	25,78	27,08	4,81	4,20
80	26,05	27,11	3,93	26,00	27,13	4,19	26,02	27,13	4,11	26,01	27,13	4,15	26,01	27,14	4,19	25,80	27,10	4,81	4,11
100	26,07	27,11	3,85	26,07	27,10	3,81	26,08	27,10	3,78	26,08	27,10	3,78	26,07	27,09	3,78	25,86	27,05	4,41	3,80
120	26,63	26,99	1,33	26,49	27,00	1,89	26,63	27,05	1,56	26,60	27,01	1,52	26,67	26,98	1,15	26,52	26,99	1,74	1,49
130	27,30	26,99	-1,15	27,29	26,95	-1,26	27,32	26,96	-1,33	27,40	26,95	-1,67	27,30	26,91	-1,44	27,26	26,93	-1,22	-1,37

Trubka č. 12 Optimalizovaný nástroj																			
	12.1			12.2			12.3			12.4			12.5			12.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,38	27,12	2,74	26,41	27,11	2,59	26,56	27,11	2,04	26,41	27,11	2,59	26,36	27,10	2,74	26,54	27,11	2,11	2,54
0	25,88	27,18	4,81	26,00	27,11	4,11	25,95	27,15	4,44	25,92	27,13	4,48	26,07	27,11	3,85	25,98	27,11	4,19	4,34
20	25,70	27,14	5,33	25,63	27,14	5,59	25,62	27,16	5,70	25,65	27,15	5,56	25,73	27,16	5,30	25,58	27,15	5,81	5,50
40	25,82	27,14	4,89	25,85	27,14	4,78	25,84	27,16	4,89	25,88	27,16	4,74	25,93	27,13	4,44	25,77	27,14	5,07	4,75
60	25,95	27,11	4,30	25,99	27,11	4,15	25,98	27,13	4,26	26,01	27,13	4,15	26,00	27,15	4,26	25,82	27,10	4,74	4,22
80	26,05	27,14	4,04	26,07	27,19	4,15	26,02	27,16	4,22	26,03	27,13	4,07	26,07	27,15	4,00	25,82	27,10	4,74	4,10
100	26,08	27,03	3,52	26,08	27,05	3,59	26,10	27,11	3,74	26,08	27,10	3,78	26,08	27,08	3,70	25,89	27,05	4,30	3,67
120	26,83	26,98	0,56	26,64	27,03	1,44	26,67	27,00	1,22	26,67	27,05	1,41	26,60	26,95	1,30	26,51	27,03	1,93	1,19
130	27,43	26,88	-2,04	27,40	26,89	-1,89	27,40	26,93	-1,74	27,37	27,00	-1,37	27,22	26,88	-1,26	27,37	26,88	-1,81	-1,66
Trubka č. 13 Optimalizovaný nástroj																			
	13.1			13.2			13.3			13.4			13.5			13.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,12	27,11	3,67	26,48	27,10	2,30	26,58	27,10	1,93	26,40	27,10	2,59	26,47	27,09	2,30	26,46	27,11	2,41	2,56
0	25,80	27,13	4,93	25,88	27,12	4,59	25,82	27,12	4,81	25,75	27,13	5,11	25,85	27,11	4,67	25,78	27,13	5,00	4,82
20	25,58	27,13	5,74	25,60	27,14	5,70	25,56	27,14	5,85	25,58	27,15	5,81	25,56	27,14	5,85	25,63	27,14	5,59	5,79
40	25,80	27,14	4,96	25,79	27,14	5,00	25,75	27,13	5,11	25,79	27,14	5,00	25,79	27,14	5,00	25,72	27,13	5,22	5,01
60	25,93	27,13	4,44	25,90	27,14	4,59	25,93	27,14	4,48	25,86	27,13	4,70	25,86	27,14	4,74	25,70	27,11	5,22	4,59
80	25,96	27,14	4,37	25,93	27,15	4,52	25,90	27,18	4,74	25,90	27,17	4,70	25,89	27,16	4,70	25,70	27,15	5,37	4,61
100	26,03	27,14	4,11	25,99	27,14	4,26	25,99	27,15	4,30	25,95	27,14	4,41	25,95	27,15	4,44	25,73	27,14	5,22	4,30
120	26,54	27,08	2,00	26,48	27,09	2,26	26,56	27,07	1,89	26,21	27,11	3,33	26,59	27,09	1,85	26,33	27,10	2,85	2,27
130	27,41	27,05	-1,33	27,12	27,08	-0,15	27,05	27,04	-0,04	27,02	27,05	0,11	27,07	27,06	-0,04	27,02	27,05	0,11	-0,29
Trubka č. 14 Optimalizovaný nástroj																			
	14.1			14.2			14.3			14.4			14.5			14.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,40	27,13	2,70	26,52	27,13	2,26	26,30	27,12	3,04	26,42	27,11	2,56	26,53	27,09	2,07	26,40	27,12	2,67	2,53
0	25,81	27,16	5,00	25,72	27,12	5,19	25,80	27,15	5,00	25,79	27,16	5,07	25,82	27,15	4,93	25,76	27,15	5,15	5,04
20	25,55	27,17	6,02	25,59	27,15	5,78	25,61	27,16	5,74	25,57	27,18	5,96	25,57	27,15	5,85	25,44	27,14	6,30	5,87
40	25,76	27,17	5,22	25,87	27,15	4,74	25,80	27,15	5,00	25,80	27,18	5,11	25,79	27,15	5,04	25,62	27,15	5,67	5,02
60	25,87	27,16	4,78	25,90	27,16	4,67	25,89	27,15	4,67	25,90	27,17	4,70	25,89	27,13	4,59	25,67	27,15	5,48	4,68
80	25,93	27,23	4,81	25,96	27,16	4,44	25,93	27,17	4,59	25,93	27,18	4,63	25,92	27,17	4,63	25,69	27,14	5,37	4,62
100	25,99	27,19	4,44	26,00	27,14	4,22	25,98	27,15	4,33	26,00	27,19	4,41	25,99	27,19	4,44	25,76	27,14	5,11	4,37
120	26,62	27,08	1,70	26,61	27,11	1,85	26,50	27,10	2,22	26,66	27,12	1,70	26,60	27,09	1,81	26,54	27,14	2,22	1,86
130	27,18	27,10	-0,30	27,27	27,11	-0,59	27,18	27,04	-0,52	27,22	27,04	-0,67	27,20	27,01	-0,70	27,16	27,11	-0,19	-0,56
Trubka č. 15 Optimalizovaný nástroj																			
	15.1			15.2			15.3			15.4			15.5			15.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,54	27,14	2,22	26,67	27,09	1,56	26,55	27,14	2,19	26,56	27,07	1,89	26,60	27,08	1,78	26,63	27,10	1,74	1,93
0	25,94	27,17	4,56	26,07	27,12	3,89	26,00	27,10	4,07	25,94	27,11	4,33	25,95	27,09	4,22	26,07	27,20	4,19	4,21
20	25,64	27,13	5,52	25,62	27,13	5,59	25,67	27,13	5,41	25,66	27,15	5,52	25,65	27,12	5,44	25,60	27,11	5,59	5,50
40	25,84	27,11	4,70	25,88	27,14	4,67	25,88	27,12	4,59	25,94	27,11	4,33	25,87	27,11	4,59	25,72	27,09	5,07	4,58
60	26,02	27,11	4,04	26,02	27,10	4,00	26,03	27,08	3,89	26,08	27,12	3,85	26,09	27,10	3,74	25,87	27,08	4,48	3,90
80	26,07	27,22	4,26	26,05	27,20	4,26	26,06	27,11	3,89	26,04	27,24	4,44	26,04	27,13	4,04	25,88	27,20	4,89	4,18
100	26,13	27,08	3,52	26,10	27,07	3,59	26,12	27,06	3,48	26,12	27,15	3,81	26,12	27,16	3,85	25,92	27,15	4,56	3,65
120	26,68	27,08	1,48	26,60	26,98	1,41	26,67	26,98	1,15	26,71	26,99	1,04	26,65	27,04	1,44	26,57	27,09	1,93	1,30
130	27,53	27,06	-1,74	27,38	26,94	-1,63	27,42	27,02	-1,48	27,43	27,06	-1,37	27,35	27,06	-1,07	27,29	26,76	-1,96	-1,46

Trubka č. 16 Optimalizovaný nástroj																			
	16.1			16.2			16.3			16.4			16.5			16.6			Průměr K
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,50	27,10	2,22	26,46	27,09	2,33	26,57	27,09	1,93	26,50	27,10	2,22	26,55	27,10	2,04	26,64	27,11	1,74	2,15
0	25,90	27,10	4,44	25,96	27,10	4,22	25,95	27,10	4,26	25,96	27,12	4,30	26,05	27,10	3,89	26,06	27,11	3,89	4,22
20	25,83	27,18	5,00	26,03	27,13	4,07	25,89	27,12	4,56	25,89	27,12	4,56	25,93	27,15	4,52	25,67	27,12	5,37	4,54
40	26,18	27,10	3,41	26,18	27,15	3,59	26,35	27,11	2,81	26,20	27,11	3,37	26,23	27,10	3,22	25,86	27,13	4,70	3,28
60	26,36	27,13	2,85	26,34	27,14	2,96	26,36	27,13	2,85	26,34	27,13	2,93	26,36	27,13	2,85	25,96	27,11	4,26	2,89
80	26,51	27,17	2,44	26,36	27,18	3,04	26,45	27,17	2,67	26,36	27,12	2,81	26,38	27,11	2,70	25,93	27,09	4,30	2,73
100	26,52	27,07	2,04	26,45	27,08	2,33	26,44	27,07	2,33	26,46	27,07	2,26	26,50	27,14	2,37	25,98	27,04	3,93	2,27
120	27,26	26,93	-1,22	27,02	26,93	-0,33	27,04	26,98	-0,22	27,05	26,96	-0,33	27,06	26,97	-0,33	26,44	26,89	1,67	-0,49
130	27,59	26,86	-2,70	27,69	26,83	-3,19	27,62	26,85	-2,85	27,68	26,90	-2,89	27,67	26,85	-3,04	27,43	26,77	-2,44	-2,93
Trubka č. 17 Optimalizovaný nástroj																			
	17.1			17.2			17.3			17.4			Průměr K						
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K							
-10	26,43	27,08	2,41	26,32	27,07	2,78	26,34	27,06	2,67	26,36	27,09	2,70	2,64						
0	26,02	27,08	3,93	26,03	27,07	3,85	26,05	27,12	3,96	26,10	27,09	3,67	3,85						
20	26,15	27,11	3,56	26,32	27,12	2,96	26,34	27,12	2,89	26,43	27,11	2,52	2,98						
40	26,75	27,09	1,26	26,71	27,13	1,56	26,82	27,11	1,07	26,84	27,12	1,04	1,23						
60	26,88	27,10	0,81	26,72	27,12	1,48	26,78	27,11	1,22	26,86	27,14	1,04	1,14						
80	26,91	27,12	0,78	26,73	27,15	1,56	26,82	27,14	1,19	26,85	27,13	1,04	1,14						
100	27,02	27,13	0,41	26,85	27,12	1,00	26,94	27,15	0,78	26,94	27,11	0,63	0,70						
120	27,55	27,01	-2,00	27,32	27,00	-1,19	27,40	27,04	-1,33	27,32	27,01	-1,15	-1,42						
130	28,00	26,90	-4,07	27,92	26,91	-3,74	27,93	27,01	-3,41	27,91	26,96	-3,52	-3,69						
Trubka č. 18 Optimalizovaný nástroj																			
	18.1			18.2			18.3			18.4			Průměr K						
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K							
-10	26,51	27,14	2,33	26,30	27,09	2,93	26,19	27,11	3,41	26,19	27,12	3,44	3,03						
0	26,78	27,11	1,22	26,32	27,12	2,96	26,21	27,09	3,26	26,22	27,09	3,22	2,67						
20	26,65	27,10	1,67	26,64	27,11	1,74	26,65	27,14	1,81	26,64	27,13	1,81	1,76						
40	27,14	27,14	0,00	27,16	27,17	0,04	27,00	27,17	0,63	27,00	27,16	0,59	0,31						
60	27,16	27,13	-0,11	27,07	27,22	0,56	26,95	27,22	1,00	26,99	27,24	0,93	0,59						
80	27,18	27,17	-0,04	27,06	27,21	0,56	27,02	27,20	0,67	27,01	27,19	0,67	0,46						
100	27,22	27,13	-0,33	27,16	27,15	-0,04	27,11	27,14	0,11	27,19	27,16	-0,11	-0,09						
120	27,60	27,08	-1,93	27,46	27,00	-1,70	27,64	27,06	-2,15	27,61	27,03	-2,15	-1,98						
130	28,05	26,88	-4,33	27,95	26,84	-4,11	28,05	26,90	-4,26	28,04	26,88	-4,30	-4,25						

Trubka č. 19 Původní nástroj													Průměr K
	19.1			19.2			19.3			19.4			
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,77	27,07	1,11	26,60	27,05	1,67	26,68	27,05	1,37	26,67	27,05	1,41	1,39
0	25,95	27,13	4,37	25,91	27,11	4,44	25,93	27,11	4,37	26,00	27,09	4,04	4,31
20	25,50	27,13	6,04	25,58	27,14	5,78	25,55	27,15	5,93	25,61	27,14	5,67	5,85
40	25,69	27,13	5,33	25,81	27,14	4,93	25,79	27,15	5,04	25,89	27,14	4,63	4,98
60	25,85	27,13	4,74	25,85	27,16	4,85	25,82	27,16	4,96	25,89	27,14	4,63	4,80
80	25,89	27,14	4,63	25,89	27,16	4,70	25,85	27,16	4,85	25,88	27,16	4,74	4,73
100	26,00	27,14	4,22	26,02	27,17	4,26	26,00	27,16	4,30	26,04	27,15	4,11	4,22
120	26,57	27,10	1,96	26,62	27,10	1,78	26,65	27,13	1,78	26,68	27,12	1,63	1,79
130	26,99	27,11	0,44	27,01	27,12	0,41	27,00	27,11	0,41	27,02	27,12	0,37	0,41

Trubka č. 20 Původní nástroj													Průměr K
	20.1			20.2			20.3			20.4			
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,59	27,07	1,78	26,64	27,06	1,56	26,59	27,08	1,81	26,65	27,07	1,56	1,68
0	25,91	27,11	4,44	26,07	27,09	3,78	26,02	27,10	4,00	26,04	27,09	3,89	4,03
20	25,81	27,14	4,93	25,82	27,14	4,89	25,90	27,16	4,67	25,85	27,15	4,81	4,82
40	26,18	27,15	3,59	26,18	27,15	3,59	26,26	27,16	3,33	26,28	27,17	3,30	3,45
60	26,25	27,17	3,41	26,26	27,17	3,37	26,29	27,19	3,33	26,19	27,18	3,67	3,44
80	26,26	27,18	3,41	26,19	27,18	3,67	26,23	27,20	3,59	26,19	27,19	3,70	3,59
100	26,46	27,16	2,59	26,41	27,17	2,81	26,43	27,18	2,78	26,46	27,17	2,63	2,70
120	26,88	27,12	0,89	26,81	27,12	1,15	26,82	27,15	1,22	26,95	27,13	0,67	0,98
130	27,16	27,13	-0,11	27,16	27,14	-0,07	27,15	27,13	-0,07	27,18	27,13	-0,19	-0,11

Trubka č. 21 Původní nástroj													Průměr K
	21.1			21.2			21.3			21.4			
	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	X	Y	K	
-10	26,58	27,06	1,78	26,53	27,11	2,15	26,60	27,12	1,93	26,52	27,07	2,04	1,97
0	26,16	27,09	3,44	26,00	27,11	4,11	26,11	27,12	3,74	26,03	27,12	4,04	3,83
20	26,06	27,17	4,11	25,93	27,18	4,63	26,06	27,17	4,11	25,98	27,17	4,41	4,31
40	26,50	27,18	2,52	26,29	27,21	3,41	26,48	27,21	2,70	26,35	27,22	3,22	2,96
60	26,58	27,22	2,37	26,33	27,27	3,48	26,60	27,27	2,48	26,35	27,28	3,44	2,94
80	26,58	27,21	2,33	26,37	27,27	3,33	26,56	27,23	2,48	26,39	27,24	3,15	2,82
100	26,80	27,21	1,52	26,62	27,20	2,15	26,77	27,20	1,59	26,73	27,20	1,74	1,75
120	27,12	27,13	0,04	27,00	27,11	0,41	27,06	27,14	0,30	27,03	27,12	0,33	0,27
130	27,24	27,11	-0,48	27,23	27,13	-0,37	27,25	27,16	-0,33	27,23	27,13	-0,37	-0,39