

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza faktorů ovlivňující proces tváření  
trubek sloupů veřejného osvětlení**

**Autor: Tomáš Kamenský**

**Vedoucí práce: Ing. František Tatiček, Ph.D.**

**Rok: 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kamenský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **482638**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Analýza faktorů ovlivňujících proces tváření trubek sloupů veřejného osvětlení**

Název diplomové práce anglicky:

**Analysis of factors influencing the forming process of lighting column tubes**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou
2. Popis současného způsobu výroby sloupů veřejného osvětlení
3. Popis faktorů ovlivňujících výrobní postup
4. Ověření vlivu těchto faktorů na výrobní proces pomocí numerické simulace
5. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ASM Handbook Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming  
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming  
Simufact forming application manual  
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. František Tatiček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Vit Novák ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023** Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. František Tatiček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá rozborem faktorů ovlivňující výrobní proces tváření konců trubek. Teoretická část se zabývá tvářením, tvářitelností, zkouškou tahem, technologickými zkouškami ověřující tvářitelnost a numerickou simulací. Dále jsou popsány možné varianty výroby, analýza vlastností definovaných předpisy normami a možných problému při výrobě. Praktická část se věnuje ověřování vlivu jednotlivých faktorů pomocí numerických simulací, pomocí kterých jsou analyzovány výrobní problémy, dále je provedeno porovnání reálného procesu s numerickou simulací. V závěrečné části jsou uvedeny návrhy opatření k eliminaci možných problémů.

Klíčová slova:

Tvářitelnost, Simufact Forming, tváření trubek, matematické modelování, analýza procesu tváření

Počet stran:

76

Počet tabulek:

17

Počet obrázků:

71

## Abstract

The thesis deals with the analysis of factors influencing the production process of tube end forming. The theoretical part deals with forming, formability, tensile test, technological tests to verify formability and numerical simulation. Furthermore, possible production variants, analysis of properties defined by regulations standards and possible problems in production are described. The practical part is devoted to the verification of the influence of individual factors by means of numerical simulations, by means of which the production problems are analysed, as well as the comparison of the real process with the numerical simulation. In the final part, suggestions for measures to eliminate possible problems are given.

### Keywords:

Formability, Simufact Forming, tube forming, mathematical modelling, forming process analysis

Number of pages:

76

Number of tables:

17

Number of pictures:

71

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Analýza faktorů ovlivňující proces tváření trubek sloupů veřejného osvětlení vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

V Praze dne 11.8.2023

.....

Bc. Tomáš Kamenský

## Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Františkovi Tatičkovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za jeho podnětné rady a připomínky, které mi po celou dobu práce uděloval. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vítu Novákovi za pomoc s prací se simulačním softwarem. Závěrem chci poděkovat mým přátelům a rodině za podporu po celou dobu studia.

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Princip tváření .....	12
2.1	Tvářecí proces.....	12
2.1.1	Plastická deformace.....	12
2.1.2	Dělení tváření dle teploty .....	14
2.1.3	Stav napjatosti a deformace.....	15
2.1.4	Systém tváření .....	16
2.2	Tvářitelnost.....	17
2.2.1	Faktory ovlivňující tvářitelnost .....	17
2.2.2	Zkoušky tvářitelnosti.....	19
2.3	Numerické simulace .....	27
3	Popis problému.....	30
3.1	Popisem problematiky - definování tvaru, forma vstupního materiálu, materiálové jakosti, rozměry, tolerance .....	30
3.2	Rozbor možných způsobů úpravy konců trubky .....	34
3.2.1	Zužování trubek.....	34
3.2.2	Kovotlačitelství .....	35
3.2.3	Elektromagnetické tváření.....	36
3.2.4	Hydroforming .....	36
3.2.5	Popis současného tvářecího procesu.....	37
3.3	Rozbor možných problémů .....	40
3.3.1	Mechanické vlastnosti zpracovávaného materiálu .....	40
3.3.2	Ovalita .....	42
3.3.3	Tloušťka stěny .....	42
3.3.4	Dělení materiálu .....	42
3.3.5	Průhyb .....	43

3.3.6	Délka polotovaru .....	44
3.3.7	Polohování a nastavení tvářecího procesu.....	44
3.3.8	Ukončení procesu .....	45
4	Numerická simulace .....	46
4.1	Nastavení úlohy .....	46
4.2	Sledované parametry a jejich vliv na proces (citlivost parametrů) .....	47
5	Verifikace procesu.....	55
5.1	Polotovary šarže 22152 .....	58
5.2	Polotovary šarže 22151 .....	60
5.3	Polotovary šarže 22119 .....	62
6	Návrh opatření.....	64
7	Závěr.....	67
	Bibliografie.....	69
8	Seznam obrázků .....	74
9	Seznam tabulek .....	76

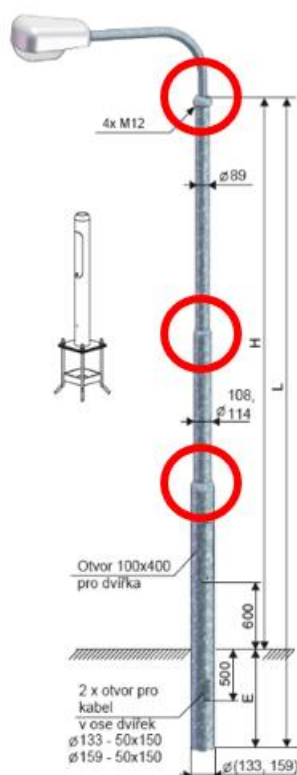


## Použité veličiny a jednotky

Značka	Jednotka	Veličina
$A$	%	Tažnost
$A_g$	%	Plastické prodloužení při maximálním zatížení
$A_{gt}$	%	Celkové prodloužení při maximálním zatížení
$A_t$	%	Celkové prodloužení v okamžiku lomu
$A_p$	%	Práce potřebná na vyčerpání kapacity
$e$	%	Smluvní potřebná deformace
$E$	MPa	Modul pružnosti v tahu
$F$	N	Síla
$I_y$	mm <sup>4</sup>	Moment setrvačnosti
$IT$	1	Index tvářitelnosti
$L$	mm	Délka
$n$	1	Exponent deformačního zpevnění
$n_m$	1	Střední hodnota exponentu deformačního zpevnění
$r$	1	Normálová anizotropie
$\Delta r$	1	stupeň plošné anizotropie
$r_m$	1	vážený průměr součinitele plastické anizotropie
$R_e$	MPa	Výrazná mez kluzu
$R_m$	MPa	Mez pevnosti v tahu
$R_p$	MPa	Smluvní mez kluzu
$S$	mm <sup>2</sup>	Plocha
$T_m$	°C	Teplota tavení
$t$	mm	Tloušťka stěny
$w$	mm	Průhyb
$Z$	%	Kontrakce
$\varphi$	1	Skutečná deformace
$\varphi_b$	1	Skutečná deformace šířky
$\varphi_t$	1	Skutečná deformace tloušťky

## 1 Úvod

Práce se zabývá analýzou tvářecího procesu při tvarové úpravě konců trubek, které se používají pro výrobu sloupů veřejného osvětlení. Vlastní sloup může být tvořen několika segmenty, viz Obr. 1, které jsou nejprve připraveny řezáním z polotovaru na požadovanou délku. Poté probíhá tváření konce trubky, kterým je dosaženo požadované zaoblení a redukovaný průměr. Tento redukovaný průměr musí být velmi přesný, jelikož dále se do této trubky vsune vnitřní trubka a proběhne svařování. Tento postup se opakuje dle požadavků na sloup, tzn. v závislosti na počtu částí, ze kterých je sloup vytvořen. Následuje vyříznutí otvoru pro revizní dvířka, povrchová úprava a montáž elektrických součástí. Práce má za cíl pochopení problematiky jednotlivých faktorů, aby se zvýšila přesnost a tím bylo možné použití automatizace svařovacího procesu. V případě velké nepřesnosti tvářecího procesu totiž automatické svařování není možné použít, a je nutné provádět svařování ruční. To však naráží na personální kapacity, delší výrobní časy a horší kvalitu konečného produktu.



Obr. 1: Příklad zúžení na sloupech veřejného osvětlení. [1]

Při výrobě jednotlivých částí se používá stroj se speciálním nástrojem, kterým je konec trubky upraven. Vlastní tvářecí proces je realizován tak, že se trubka položí na prizmatické

kostky, konec trubky je opřen o doraz (zadní, opěrnou stěnou nástroje). Na opačné straně působí na trubku funkční část tvářecího nástroje. Proces je ukončen při dosažení požadovaného tvaru.

Pro výrobu je používán polotovar o jakosti S235JRH. Jedná se o ocelovou trubku podélně svařovanou. Tento materiál je určený pro konstrukční účely. Trubky jsou vhodné k pozinkování, svařitelnost materiálu je zaručená.

Výrobní proces vykazuje řadu nedostatků, mezi které patří obtížné dosažení požadovaného tvaru především z hlediska dosahované přesnosti. To je způsobeno několika faktory. Rozptyl mechanických vlastností používaného materiálu může být značný a do procesu se mohou dostat trubky se zcela odlišnými vlastnostmi. Dále se může měnit geometrická přesnost vstupního materiálu, jako je tloušťka stěny, ovalita nebo průhyb (podélná deformace). Další problém může nastat při dělení materiálu, při kterém může vznikat podkos řezu při dělení na pásových pilách. Dalším problémem je polohování polotovaru na tvářecí dráze, která slouží pro ustavení polotovaru. Pro přidržení trubek se používají plynové pružiny, které mohou svojí působící silou způsobovat nežádoucí dodatečné deformace polotovaru. Tyto problémy ovlivňují velikost tvářecí síly, opakovatelnost celého procesu nebo deformaci trubky při tváření vlivem prohnutí.

Cílem práce je analyzovat tvářecí proces v rámci, kterého bude provedena analýza vlastností dodávaného materiálu, bude popsán přehled možných výrobních způsobů tváření, rozbořem možných problémů, které mohou proces tváření ovlivnit. Dále bude provedena numerická simulace procesu pro ověření citlivosti zjištěných parametrů na výrobní proces a ověření možností ukončení tvářecího procesu z hlediska tvářecí síly a minimalizace deformace průhybem.

Také bude proveden reálný experiment, kde bude snaha verifikovat tvářecí proces a reálné ověření možností ukončení procesu dosažením určité tvářecí síly namísto posuvu nástroje. Následně bude snaha replikovat výsledky experimentu pomocí numerické simulace, která bude moct být použita pro další optimalizace výrobního procesu.

Výsledky povedou k návrhům opatření, které zvýší opakovatelnost, konzistentnost a přesnost celého výrobního procesu.

## 2 Princip tváření

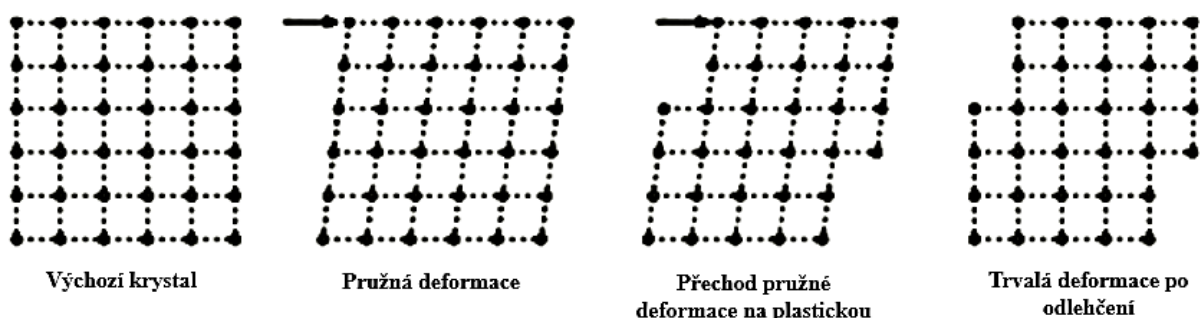
Výrobní technologie dělíme na slévání, tváření, svařování a obrábění. Každá z těchto technologií má svá specifika, kdy dochází buď k tvorbě odpadu, nebo je problém dosáhnout požadovaných mechanických vlastností. Technologie tváření je v pozici, kdy s minimálním objemem materiálu lze dosáhnout požadovaného tvaru i mechanických vlastností. Nástroje pro tvářecí proces bývají cenově nákladné, proto největší uplatnění této technologie je v sériové a hromadné výrobě. [2] [3]

### 2.1 Tvářecí proces

Tváření je technologický proces, při kterém je měněn tvar materiálu bez jeho porušení. Při tvářecím procesu může docházet ke změně vlastností tvářeného materiálu. Podstatou tohoto procesu je vznik plastické deformace. Ta vznikne působením napětím větším, než je mez kluzu daného materiálu. Tento děj provází změny fyzikálních, strukturních a mechanických vlastností tvářeného materiálu. [2]

#### 2.1.1 Plastická deformace

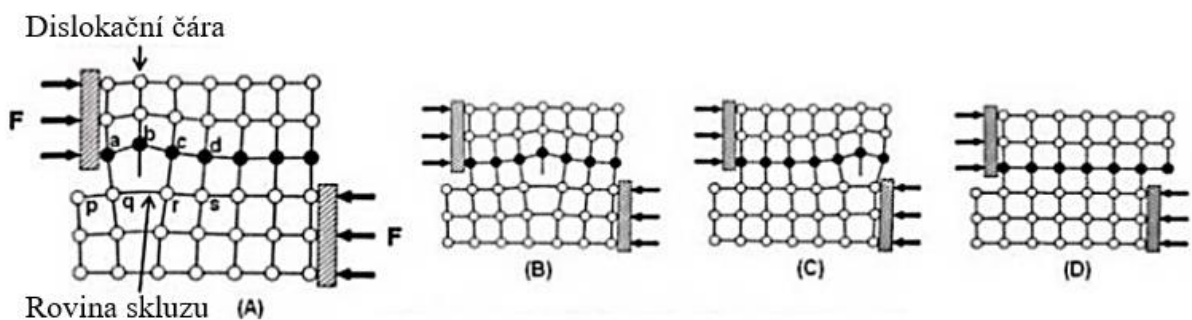
Tvářecí proces je realizován deformací. Deformace se dělí na elastickou a plastickou. Pouze při plastické deformaci dojde k trvalé změně rozměrů a tvaru tvářence, viz Obr. 2. Plastická deformace je vyvolaná účinkem vnějších sil od tvářecího nástroje a je realizována při dosažení určité mezní hodnoty napětí. Velikost tohoto napětí závisí na stavu napjatosti v procesu. Plastická deformace je v kovových materiálech způsobena pohybem dislokací. Dislokace se mohou pohybovat skluzem a dvojčatením. Při teplotách větších než  $0,3 T_m$  se uplatňují i další mechanismy. [4] [5]



Obr. 2: Schéma pružné a plastické deformace. [6]

## Skluz

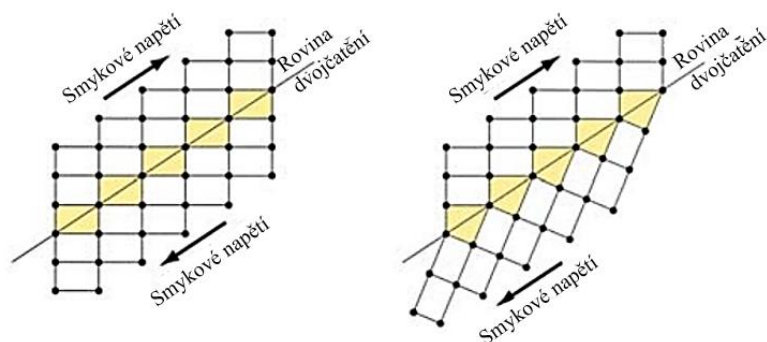
Jedná se o jeden z možných způsobů vyvození plastické deformace, který je uskutečněn pohybem mřížkových poruch (dislokací) ve struktuře kovů. Při překročení kritického smykového napětí se dislokace uvedou do pohybu po kluzných rovinách, viz Obr. 3. Mezi kluznými rovinami roste napětí, čímž se kovová struktura deformuje. Kluz nastane v rovinách, které jsou nejhustěji obsazeny atomy, a jeho směr je shodný se směrem nejhustěji obsazené roviny. Největší smykové napětí je dosahováno v rovinách skloněných po úhlem  $45^\circ$  ke směru normálového napětí. Hodnota kritického smykového napětí je funkcí teploty, rychlosti deformace, materiálu a deformační historie. [4] [5] [7]



Obr. 3: Mechanismus plastické deformace skluzem působením smykovým napětím. [8]

## Dvojčatění

Druhým mechanismem pohybu dislokací je dvojčatění, při kterém dochází k natočení jedné části mřížky oproti druhé kolem roviny symetrie (dojde k zrcadlovému odrazu dvou částí mřížky), viz Obr. 4. Vnější silou dojde ke sklopení vlivem účinku smykových napětí. Vlastním dvojčatěním nedojde k velké plastické deformaci. Jeho největší význam je, že sklopením se příznivěji orientují skluzové roviny. Současně se tedy uplatní skluz i dvojčatění což má za následek velkou plastickou deformaci. Ke dvojčatění nejčastěji dochází při nízkých teplotách a vysokých rychlostech deformace. [4] [5] [7]

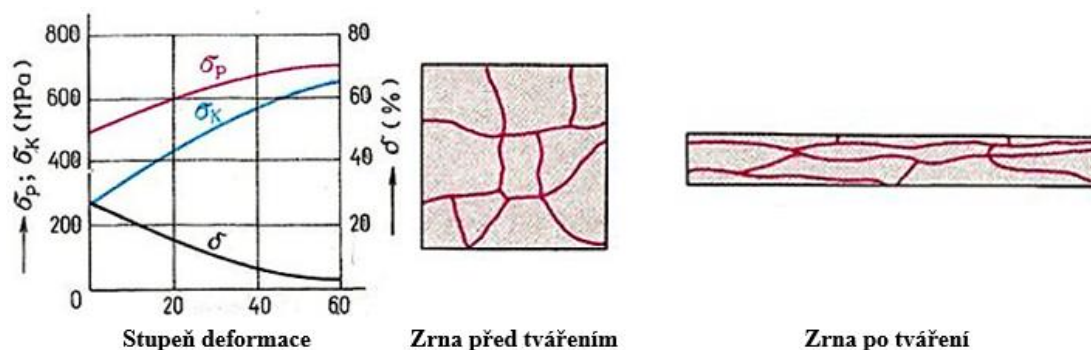


Obr. 4: Princip plastické deformace dvojčatěním. [8]

### 2.1.2 Dělení tváření dle teploty

Teplota má významný vliv na tvářecí proces a konečné mechanické vlastnosti materiálu. S rostoucí teplotou můžeme materiál snadněji deformovat (klesá přetvárný odpor a zlepšují se plastické vlastnosti). Dle teploty tváření a jejího průběhu dělíme procesy na tváření za studena, tepla a poloohřevu. Kritériem tohoto dělení jsou uzdravovací procesy. Do těchto procesů patří zotavení a rekrytalizace. [9]

Tváření za studena probíhá při teplotách menších nebo rovno  $0,3 T_m$ , což je hranice kdy se začínají uplatňovat uzdravovací procesy v materiálu. Pro tento způsob tváření je charakteristické deformační zpevnění materiálu. Zpevňováním materiálu se přibližuje hodnota meze kluzu a meze pevnosti, čímž se vyčerpává plasticita materiálu. Při zpevňování se vlivem plastické deformace deformují zrna materiálu, viz Obr. 5. Deformace zrn vede k tvorbě orientované struktury ve směru působení vnějších sil a dochází k anizotropii mechanických vlastností. Anizotropii je nutné uvažovat zejména u válcovaných plechů, kdy vzniká vláknitá struktura ve směru válcování. Z tohoto důvodu je při tváření za studena používat velké tvářecí síly. Z důvodu velkého přetvárného odporu jsou procesy tváření za studena náročné z hlediska tvářecích sil. Výhodou tváření za studena je kvalita povrchu a přesnost rozměrů. [2] [3] [10]



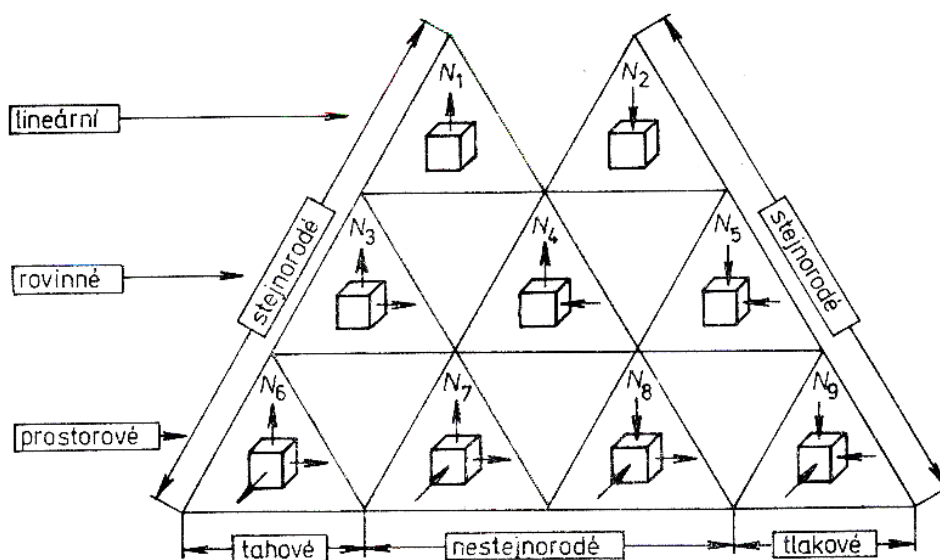
Obr. 5: Deformační zpevnění materiálu a orientace zrn při tváření za studena. [9]

Tváření za tepla se provádí při teplotách nad  $0,7 T_m$ . Dochází k zpevňování materiálu vlivem plastické deformace a zároveň k uzdravovacím procesům. Uzdravování (rekrytalizace) probíhá vlivem vysoké teploty při tváření i po něm. Tím se vyloučí vliv zpevnění. Oproti tváření za studena má materiál mnohem menší hodnoty přetvárného odporu a lze jej přetvořit výrazně menšími silami. Vhodnou konstrukcí nástrojů můžeme docílit vhodně orientované vláknité struktury výrobku vzhledem ke směru namáhání v provozu součásti. Nevýhodou je nekvalitní povrch (okuje), hrubnutí zrna a nákladnost na ohřev. [3] [9]

Při tváření za poloohřevu dochází ke snížení přetvárného odporu, zlepšení přesnosti, mechanických vlastností a kvality povrchu. Hraniční teplota ohřevu je teplota oxidace. [9]

### 2.1.3 Stav napjatosti a deformace

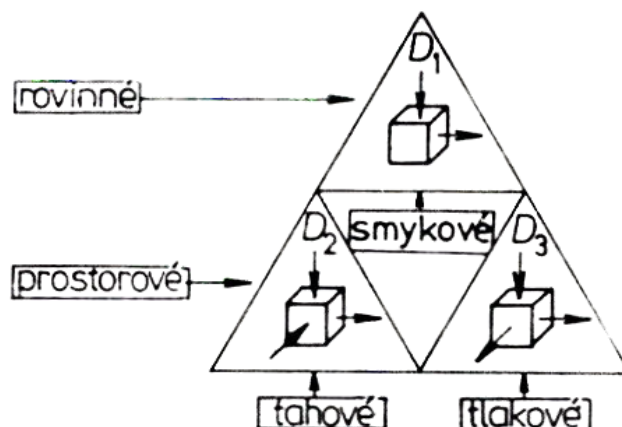
Každému tvářecímu procesu lze přiřadit konkrétní kombinaci stavu napjatosti a deformace. Znalost těchto stavů v procesu je klíčová pro jeho analýzu. Napětí nabývají buď kladné (tahové, šipka ven), záporné (tlakové, šipka dovnitř) nebo nulové hodnoty, viz Obr. 6. Jednoosý stav napjatosti dosahujeme pouze v laboratorních podmínkách např. při zkoušce tahem. Dvouosý stav napjatosti je charakteristický pro procesy plošného tváření, jako je ohýbání, hluboké tažení plechů a zakružování trubek. Při prostorovém stavu napjatosti působí napětí ve třech směrech. Tento stav je typický pro procesy objemového tváření jako válcování, kování nebo tažení. Vhodným výběrem tvářecího procesu, tedy i stavem napjatosti, lze významně ovlivnit tvářitelnost i velikost deformačního odporu. [2] [10]



Obr. 6: Devět schémat napjatosti, které mohou působit v tělese. [9]

Každému stavu napjatosti náleží určitý stav deformace. Pomocí stavu deformace zjistíme změnu rozměrů tvářeného tělesa (šipka ven značí prodlužování). Tvářecí proces je charakteristický tím, že platí zákon zachování objemu. Platí, že součet hlavních deformací musí být roven nule, viz (1). Existují tři stavy deformace, které mohou nastat v tělese, viz Obr. 7. Rovinná deformace je typická pro válcování plechů a pásů. Prostorová deformace nastává např. při kování nebo protlačování. [2] [3] [10]

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (1)$$



Obr. 7: Tři stavy deformace, které mohou v tělese nastat. [9]

#### 2.1.4 Systém tváření

Pro návrh tvářecího procesu je nutné si uvědomit, že se nejedná pouze o deformační chování tvářeného materiálu, ale i faktory, které tento proces ovlivňují. Jedná se např. o chování nástroje, chování mezi nástrojem a polotovarem (deformace nástroje, rychlost děje, průvodní jevy), či chování okolí na proces (chladnutí polotovaru). Tyto vlivy se označují jako tvářecí systém a jsou uvedeny v Tab. 1. [11]

Tab. 1: Proměnné v systému tváření. [11]

Proměnné systému		
1.	Polotovar	Geometrie, materiál
2.	Nástroj	Geometrie, povrch, materiál, TZ, teplota, tuhost, přesnost
3.	Podmínky kontaktu materiál – nástroj	Mazivo
4.	Stroj	Silová/energetická kapacita, tuhost, přesnost produktivita
5.	Výrobek	Geometrie, přesnost, tolerance, kvalita povrchu, struktura
6.	Prostředí	Znečištění, vybavení podniku
7.	Deformační zóna	Tok materiálu, napětí teplota



## 2.2 Tvářitelnost

Pojem tvářitelnost vyjadřuje schopnost materiálu se tvářet bez porušení. Tvářitelnost hodnotíme z metalurgického nebo technologického hlediska. Hodnotu tvářitelnosti nelze jednoznačně určit. Závisí např. na stavu napjatosti, tvaru deformační zóny, materiálu a technologických podmínkách procesu. Metalurgická tvářitelnost hodnotí vliv metalurgických faktorů v tvářecích operacích. Mezi tyto faktory řadíme chemické a strukturní složení a čistotu materiálu. Technologická tvářitelnost hodnotí technologické podmínky, při kterých se uskutečňuje tvářecí operace. [5] [7] [12]

### 2.2.1 Faktory ovlivňující tvářitelnost

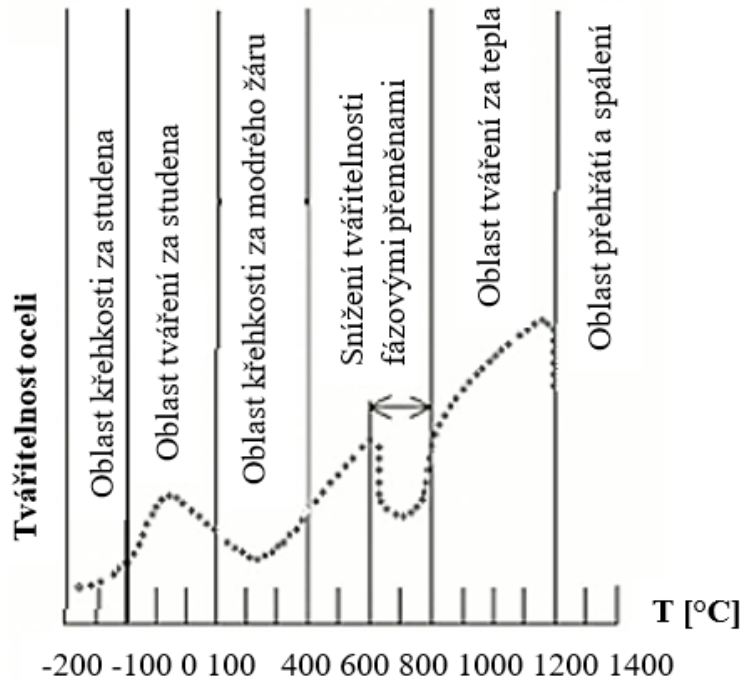
Pro optimalizaci tvářecího procesu je tvářitelnost klíčová. Existuje řada faktorů tvářitelnosti. Z tohoto důvodu byly vytipovány pouze některé, které jsou významné pro další pokračování práce, a je důležité se jim blíže věnovat. Jsou to:

#### **a) Fyzikálně-metalurgický charakter**

Tvářitelnost je z materiálového hlediska ovlivněna krystalickou strukturou, chemickým složením, velikostí zrna a počtem fází. To je dáno postupem výroby a chemickým složením, což určí počet, vlastnosti i rozložení strukturních složek. Zároveň lze ovlivnit i velikost, tvar a orientaci zrn. Chemické složení zároveň určí tepelně aktivované děje spojené se zpevňováním a odpevňováním materiálu. Z hlediska struktury tvářitelnost klesá s počtem kluzových rovin. Dobrou tvářitelnost za tepla i za studena mají kovy s kubickou plošně středěnou mřížkou. Kovy s kubickou prostorově středěnou mřížkou mají horší tvářitelnost za studena. Šesterečná mřížka se vyznačuje nejhorší tvářitelností. Nejvyšší tvářitelnost mají čisté kovy (rychlé uzdravovací procesy, čistota hranic zrn atd.). U vícefázových struktur mají přítomné strukturní složky odlišné vlastnosti, což snižuje tvářitelnost. Z hlediska tvářitelnosti je výhodnější již protvářená struktura oproti lité, protože obsahuje menší zrna, má více homogenní strukturu a nevyskytují se v ní již žádné póry, řediny nebo dutiny. [10] [13] [14]

#### **b) Teplota**

Teplota při tváření hraje velmi důležitou roli, jelikož s jejím růstem klesá deformační odpor. Ve výrobním procesu bychom se měli pohybovat v rozmezí optimálních teplot, protože při jejich překročení dojde k přehřátí (to lze ještě opravit) nebo ke spálení, což vede k nevratným změnám (oxidace na hranicích zrn). Tvářecí teplotu nelze volit libovolně. Existují rozmezí teplot, ve kterých není doporučeno tváření, viz Obr. 8. [12] [13]



Obr. 8: Vliv teploty na tvářitelnost oceli. [10]

### c) Deformační historie

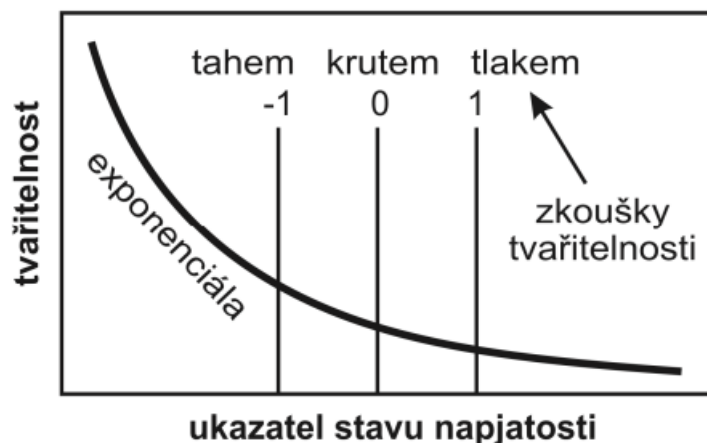
Deformační historie je charakterizována velikostí úběrů, jejich časovou posloupností a teplotou při které jsou prováděny. Pokud po úběru dojde k úplné rekrytalizaci, tak se zmenšuje zrno a je bráněné šíření mikrotrhlin po hranicích zrn. Tím se výrazně zvyšuje tvářitelnost materiálu. V praxi se proto provádějí menší a dílčí úběry. [5] [12]

### d) Deformační rychlost

Deformační rychlost není totožná s rychlostí pohybu nástroje. Jedná se o derivaci deformace podle času. S rostoucí deformační rychlostí tvářitelnost klesá. Vysoká rychlost deformace vede ke zvyšování deformačního tepla ve tvářenci což má negativní vliv na tvářitelnost. [14]

### e) Stav napjatosti

Pokud v tvářenci převažují tahová napětí, dochází k rozšiřování dutin a tvorbě zárodků trhlin, což vede k porušení, a tedy významnému snížení tvářitelnosti. Tlaková napětí uzavírají dutiny, čímž je materiál schopen snášet větší plastickou deformaci a tvářitelnost se zlepšuje. Pokud vhodně zvolíme tvářecí postup, jsme schopni výrazně zlepšit tvářitelnost materiálu, viz Obr. 9. [7] [14]



Obr. 9: Kolmogorovův diagram vlivu stavu napjatosti na tvářitelnosti. [14]

### 2.2.2 Zkoušky tvářitelnosti

Tvářitelnost lze hodnotit pomocí mechanických zkoušek (např. tahem) nebo pomocí technologických zkoušek, které napodobují podmínky nastávající během výrobního procesu. Postupy a podmínky těchto zkoušek jsou předepsány normou. [12]

#### a) Zkouška tahem

Zkouška tahem je základní mechanickou zkouškou, pro určení mechanických, plastických vlastností materiálu a ukazatelů tvářitelnosti. Zkouška tahem kovových materiálů se provádí dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Princip zkoušky spočívá v deformaci zkušební tělesa na zkušebním stroji. Zkušební vzorek je upnut do upínacích čelistí a je zatěžován zpravidla do lomu. V počáteční fázi zatěžování na zkušební těleso působí napětí způsobující elastickou deformaci, kdy se po odlehčení vzorek vrátí do původních rozměrů. Dalším zatěžováním začíná na těleso působit plastická deformace. Pokud dojde k dalšímu zatěžování, je překročena mez pevnosti a vzorek je přetržen. [15] [16]

Jako výstup zkoušky se v praxi nejčastěji využívá smluvní diagram, ve kterém lze stanovit všechny hodnoty napětí vztažené k původnímu průřezu zkušební tělesa. Napětí  $R$  [MPa] je vztaženo k jednotce plochy zkušební tyče a deformace  $\varepsilon$  [-] k přírůstku délky. [15]

Na zkušebním vzorku vyhodnocujeme čtyři základní normované mechanické vlastnosti. Jsou to [16]:

#### a) Mez kluzu v tahu $R_e$ , $R_p$

Jedná se o nejmenší napětí způsobující rozvoj výrazných plastických deformací. Určuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí zatěžující křivky. V tahovém diagramu

se projevuje výraznou formou ( $R_{eH}$ ) nebo nevýraznou (např.  $R_{p0,2}$ ). Pro výraznou mez kluzu (viz Obr. 10 vlevo) jsou typické nespojitosti na mezi kluzu, které odpovídají okamžiku, kdy k plastické deformaci dochází bez přírůstku zatížení. Pro materiály s nevýraznou mezí kluzu (viz Obr. 10 vpravo) se její hodnota určí na základě předepsaném procentu měřené délky průtahoměrem (nejčastěji 0,005 nebo 0,2 %).

b) Mez pevnosti v tahu  $R_m$

Jedná se o napětí odpovídající maximálnímu zatížení. Lze vypočítat pomocí vztahu (2).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

c) Tažnost  $A$

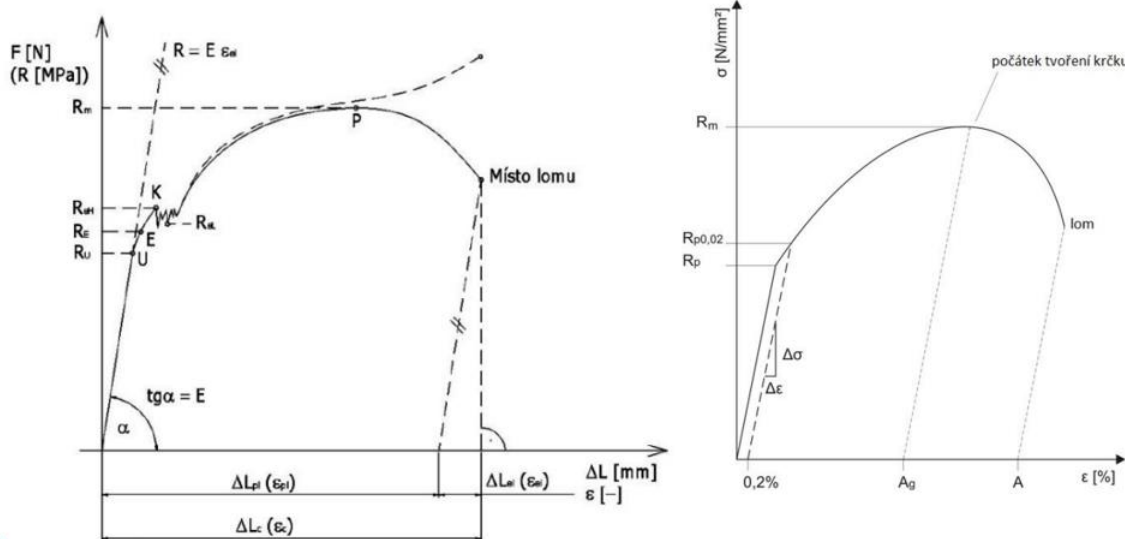
Tažnost je poměrná podélná trvalá deformace, která je vyjádřena v %. Ve smluvním diagramu je několik typů tažnosti, a to celkové prodloužení při maximálním zatížení  $A_{gt}$  (pružné i plastické), plastické prodloužení při maximálním zatížení  $A_g$  (pouze plastické), a celkové prodloužení v okamžiku lomu  $A_t$ . Lze určit pomocí rovnice (3).

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

d) Kontrakce  $Z$

Kontrakce je největší změna průřezové plochy, ke které došlo během zkoušky. Je vyjádřena v %. Vypočte se dle vztahu (4).

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4)$$



Obr. 10: Vlevo výrazná mez kluzu, vpravo nevýrazná mez kluzu. [17]

Získané výstupu ze zkoušky tahem lze použít k posouzení k vhodnosti materiálu být tvářen. Jako tyto ukazatele tvářitelnosti získaných zkouškou tahem lze použít:

### **Mez kluzu $R_e$ , $R_{p0,2}$**

Čím nižší je hodnota meze kluzu, tím nižší je napětí, při kterém dochází k plastické deformaci. Z hlediska tvářitelnosti jsou vhodnější materiály s nižší mezí kluzu. [14] [18]

### **Mez pevnosti $R_m$**

Samotná hodnota meze pevnosti se pro hodnocení tvářitelnosti nepoužívá, ale uplatní se při vyhodnocení poměru meze kluzu k mezi pevnosti, nebo k zásobě plasticity. [18]

### **Tažnost $A$**

Z hlediska tvářitelnosti celková tažnost není směrodatná. Pro hodnocení tvářitelnosti je mnohem významnější homogenní tažnost, která vyjadřuje plastické prodloužení v procentech pro homogenní plastické deformace, při dosažení meze pevnosti. [14] [15]

### **Poměr meze kluzu a meze pevnosti**

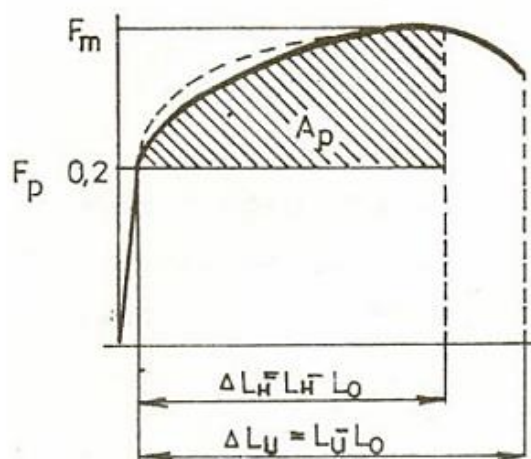
Poměrem mezi mezí kluzu a mezí pevnosti je vyjádřena zásoba plasticity materiálu. Se zmenšujícím poměrem se zvětšuje tvářitelnost materiálu (větší oblast, při které může dojít k plastické deformaci). Pro  $R_{p0,2}/R_m$  z hlediska tvářitelnosti platí tyto intervaly:

$R_{p0,2}/R_m < 0,55 \div 0,65 >$  - značí výborné plastické vlastnosti

$R_{p0,2}/R_m < 0,65 \div 0,75 >$  - značí horší plastické vlastnosti [19]

### **Zásoba plasticity**

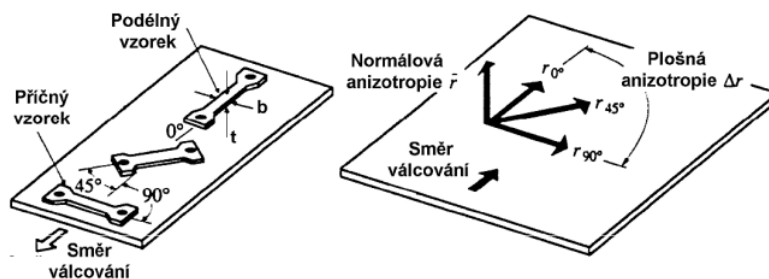
Jedná se o množství práce potřebné k plastické deformaci  $1 \text{ mm}^3$  vzorku v oblasti rovnoměrné deformace. Zásoba plasticity je určena velikostí práce potřebné pro plastické přetvoření zkušebního vzorku. Práce se počítá od dosažení meze kluzu až po maximální rovnoměrnou deformaci, viz Obr. 11. Jedná se o nejčastěji používaný ukazatel tvářitelnosti. Zásoba plasticity udává míru tvářitelnosti materiálu, kdy ještě nedochází ke vzniku trhliny. Materiály, které potřebují více práce pro rovnoměrnou plastickou deformaci při tahové zkoušce, mají i lepší tvářitelnost při jiných typech deformace. [20]



Obr. 11: Vyhodnocení zásoby plasticity z tahové zkoušky. [20]

### Součinitel plastické anizotropie

Součinitel plastické anizotropie vyjadřuje poměr skutečné deformace šířky  $\varphi_b$  ke skutečné deformaci tloušťky  $\varphi_t$  zkušebního tělesa při jednoosém zatěžování. Vyjadřuje různorodost mechanických vlastností v rovině směru jeho tloušťky. Hodnota anizotropie  $r$  závisí na směru působící síly ke směru válcování, viz Obr. 12. [20]



Obr. 12: Odebírání vzorků pro zkoušku tahem, s ohledem ke směru válcování. [17]

K hodnocení tvářítečnosti se využívá váženého průměru součinitele plastické anizotropie  $r_m$  a stupeň plošné anizotropie  $\Delta r$ . Čím vyšší je hodnota váženého průměru součinitele plastické anizotropie (určí se dle vztahu (5)), tím víc je materiál schopen odolávat ztenčení při tažení a je vhodnější pro hluboké tažení. Ověřování velikosti součinitele plastické anizotropie se provádí podle podmínek uvedených v normě ČSN EN ISO 10113. [20]

$$r_m = 0,25 \cdot (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad (5)$$

- $r_m > 1,6$  – vynikající,
- $r_m = 1,25 \div 1,6$  – dobrá,
- $r_m = 1 \div 1,25$  – uspokojivá,

- $r_m < 1$  – nízká,
- $r_m < 0,7$  – velmi špatná

Nebezpečí cípovitosti výtažku vyjadřuje stupeň plošné anizotropie, která je definována vztahem (6):

$$\Delta r = 0,5 \cdot (r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad (6)$$

- Pokud je  $\Delta r > 0$  dochází k tvorbě cípů ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  ke směru válcování plechu.
- Pokud je  $\Delta r < 0$  dochází k tvorbě cípů ve směrech  $45^\circ$  a  $-45^\circ$  ke směru válcování plechu.
- Pokud je  $\Delta r = 0$  nedochází k tvorbě cípů.

Pokud má materiál vysoké  $r_m$  a nízké  $\Delta r$ , tak méně dochází k ztenčení stěny výtažku a plech je vhodnější k hlubokému tažení. [20] [21]

### Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zatížení vztahuje skutečné napětí ke skutečné plastické deformaci při působení jednoosého zatížení. Exponent deformačního zpevnění ( $n$ ) vyjadřuje schopnost materiálu rovnoměrně se plasticky deformovat. Jeho hodnota se využívá jako ukazatel pro vypínání. Ověřování velikosti exponentu deformačního zpevnění se provádí podle podmínek uvedených v normě ČSN EN ISO 10275. Pokud má materiál vysoké  $n$ , tak brání lokalizaci deformace a dochází k rovnoměrnému rozdělení deformace při dvojosém tahu. Jako ukazatel tvářitelnosti se využívá střední hodnota  $n_m$ , která je dána vztahem (7):

$$n_m = 0,5 \cdot (n_0 + 2 \cdot n_{45} + n_{90}) \quad (7)$$

Pro hodnocení tvářitelnosti se používají následující hodnoty:

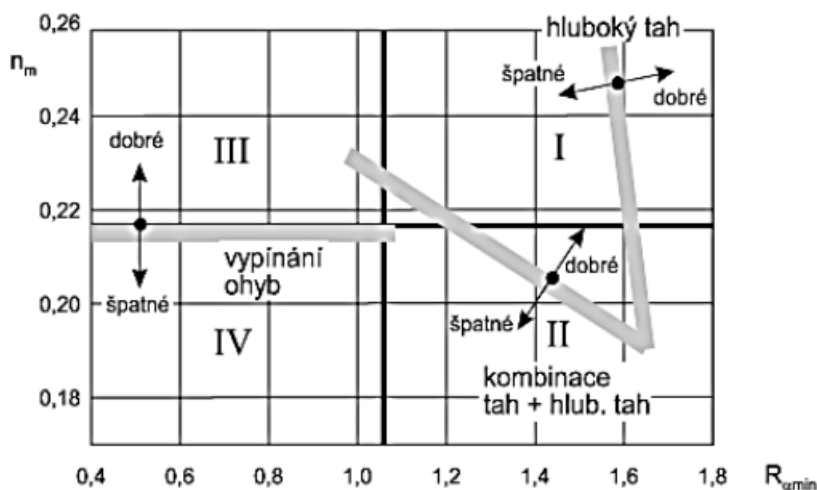
- $n_m < 0,215$  – nízká,
- $n_m = 0,215 \div 0,25$  – dobrá,
- $n_m > 0,25$  – vynikající. [20] [22]

### Index tvářitelnosti

Podle Lileta a Lankorda se pro hodnocení tvářitelnosti používá Index tvářitelnosti, který je dán vztahem (8):

$$IT = \bar{r} \cdot n_m \cdot 1000 \quad (8)$$

Pokud má materiál  $IT \geq 300$  je velmi dobře plastický. [23]



Obr. 13: Diagram tvářitelnosti podle Lileta. [17]

Diagram (viz Obr. 13) je rozdělen do čtyř oblastí:

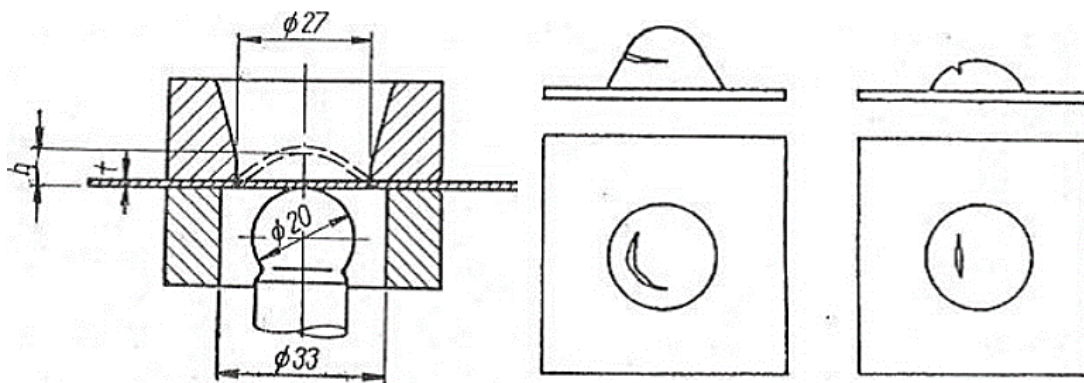
- I. oblast vhodná pro složité tažné operace,
- II. oblast s převládající tlakovou deformací,
- III. oblast s převládající tahovou deformací,
- IV. oblast nevhodná pro hluboké tažení. [17]

#### b) Zkoušky technologické

##### Zkouška hloubením dle Erichsena

Zkouška hloubením je technologická zkouška tvářitelnosti a provádí se dle ČSN EN ISO 20482. Cílem této zkoušky je určit vhodnost plechu k hlubokému tažení, která závisí na materiálu a tloušťce plechu. Zkouška probíhá tak, že se vzorek upne mezi přidržovač a tažnici. Tažník ve tvaru koule o průměru 20 mm se posouvá do středu vzorku a tvoří na plechu prohloubení. Zkouška je ukončena v momentě vzniku první trhliny v celé tloušťce vzorku. Tvářitelnost se vyhodnocuje na základě velikosti prohloubení plechu, viz Obr. 14. Vyhodnocuje se rovněž hrubost a směr povrchu důlku po skončení zkoušky. Zkouška je jednoduchá a rychlá, ale nedostaneme informaci o anizotropii mechanických vlastností. [12] [24]





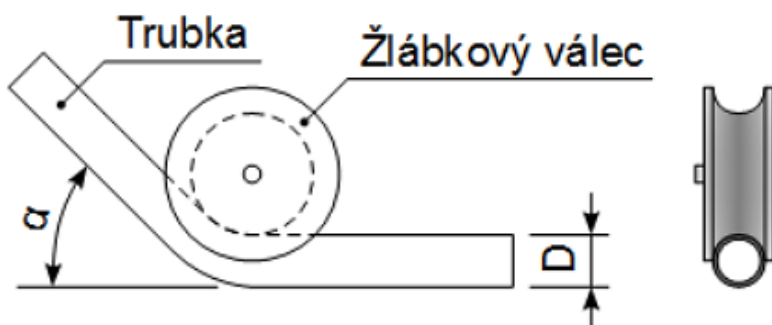
Obr. 14: Princip a vyhodnocení zkoušky hloubením. [24]

### Zkouška lámavosti

Zkouška lámavosti je technologická zkouška tvářitelnosti, která probíhá dle ČSN 42 0401. Je vhodná pro tyče obdélníkového a kruhového průřezu. Zkouška probíhá ohýbáním vzorku a je ukončena v momentě kdy dojde ke vzniku trhliny. Vyhodnocení se provádí odečtením úhlu, při kterém vznikne trhlina. [12]

### Zkouška trubek ohybem

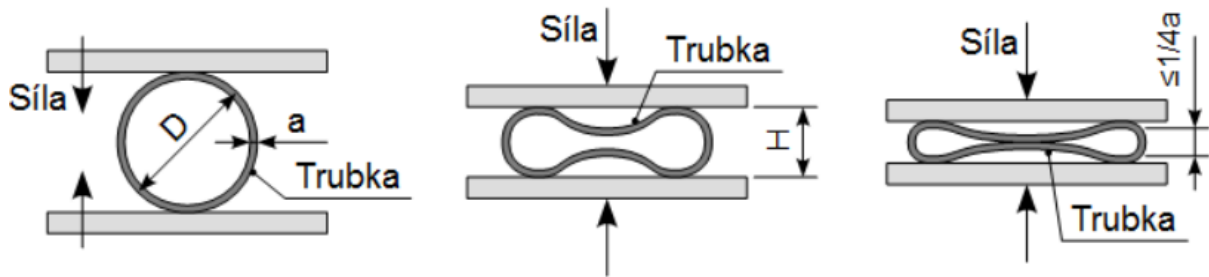
Zkouška trubek ohybem je technologická zkouška a provádí se dle ČSN EN ISO 8491. Vyhodnocuje se úhel, o který lze trubku ohnout bez vzniku trhliny, viz Obr. 15. Trubka se ohýbá na ohýbacím stroji kolem žlábkového kalibru o předem stanovený úhel (nejčastěji 90°). Maximální průměr trubky může být 65 mm. Zkouška probíhá při teplotách 10 °C–35 °C. [25]



Obr. 15: Princip zkoušky trubek ohybem. [25]

### Zkouška trubek smáčknutím

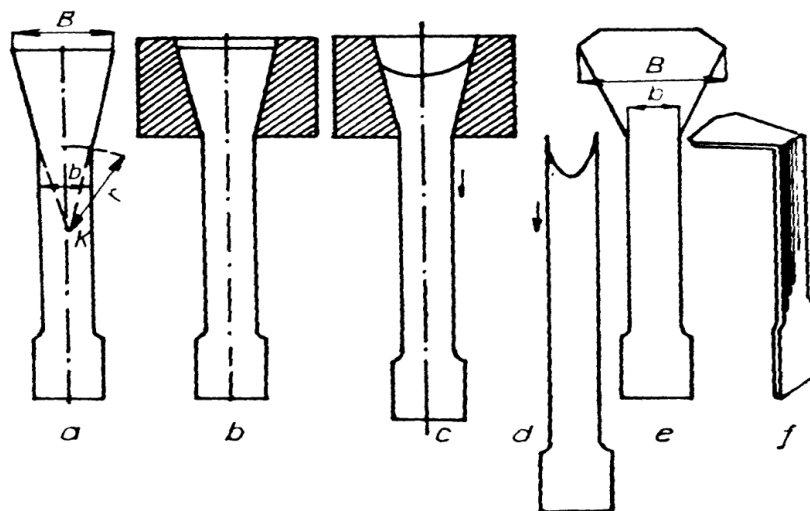
Zkouška trubek smáčknutím se provádí dle ČSN EN ISO 8492. Vyhodnocuje se schopnost trubky být smáčknuta mezi dvěma čelistmi do určité vzdálenosti bez vzniku porušení v místě ohybu, viz Obr. 16. Zkušebním vzorkem je trubka do průměru 600 mm s tloušťkou stěny do 15% vnějšího průměru. Zkouška probíhá při teplotách 10 °C–35 °C. [25]



Obr. 16: Způsoby hodnocení zkoušky smáčknutím trubek. [25]

### Tahová klínová zkouška

Cílem klínové zkoušky je simulovat deformaci příruby kalíšku při hlubokém tažení. Jako vzorek se používá plochá zkušební tyč z plechu. Vzorek je natahován do klínovitého průvlnaku, viz Obr. 17. Využívá se několik typů vzorku, které se liší tvarem. Dle SASCHE se jako vzorek používá plochá (viz Obr. 17 a)) a lichoběžníková plochá tyč. Podle KAYSLEA se používají širší vzorky, viz Obr. 17 e). Dle OEHLERA se vzorek po vložení do průvlnaku ohne, viz Obr. 17 f). Vyhodnocení této zkoušky spočívá v poměru největší k nejmenší šířce ( $B/b$ ). Tento poměr slouží jako ukazatel hlubokotažnosti plechu. Dále se vyhodnocuje napětí, při kterém na vzorku dochází ke ztrátě stability vlivem vzpěru. [12]

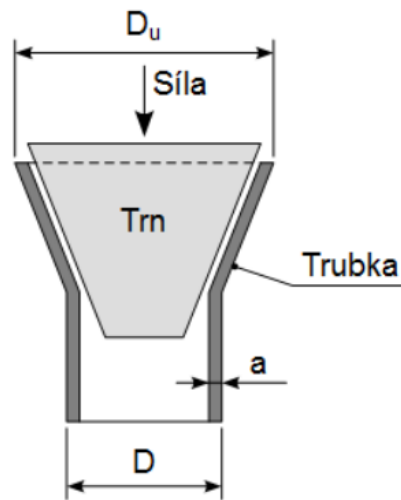


Obr. 17: Princip a používané tvary vzorku při klínové tahové zkoušce. [12]

### Zkouška trubek rozšiřováním

Zkouška trubek rozšiřováním je technologická zkouška, která se provádí dle ČSN EN ISO 8493 při teplotách 10 – 35 °C. Zkušebním vzorkem je trubka do průměru 150 mm s tloušťkou stěny do 10 mm. Délka trubky se odvíjí od požadovaného úhlu rozevření. Úhel rozevření je dán zkušebním trnem, který se vtlačuje do konce trubky až do požadovaného rozšíření konce

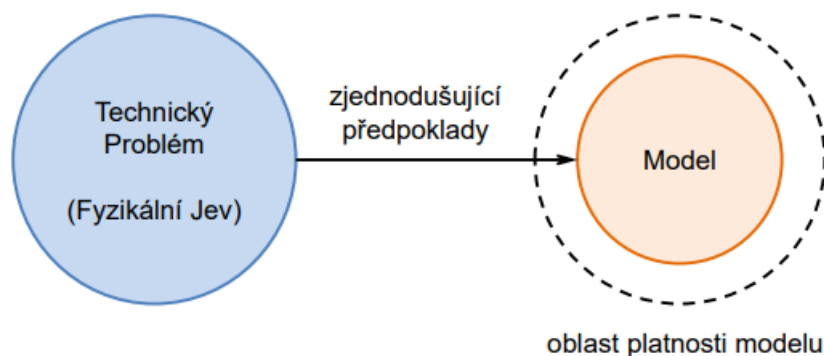
trubky, kde se vytváří hrdlo, viz Obr. 18. Vyhodnocuje se, zda po ukončení vtlačování na vzorku nevznikají praskliny nebo trhliny. [25]



Obr. 18: Princip zkoušky rozšiřováním trubek. [25]

### 2.3 Numerické simulace

Pod pojmem simulace se skrývá napodobení nějaké věci, procesu nebo stavu, kterým zobrazíme klíčové věci nebo vlastnosti zkoumaného systému pomocí počítačového programu. Simulacemi lze docílit ušetření času i nákladů, jelikož je lze využít místo reálných experimentů pro návrh nových nebo optimalizaci současných procesů a minimalizovat tak riziko chybných rozhodnutí. Simulace se využívají v téměř každém odvětví, a to od modelování přírodních jevů, lidských organismů, bezpečnosti práce, vzdělávání, zdravotnictví, herního a filmového průmyslu nebo výrobních systémů. Z hlediska simulace je klíčové správně analyzovat věc, která je předmětem zkoumání. Je nutné si uvědomit její klíčové vlastnosti, její chování, využít zjednodušujících předpokladů a následně ověřit platnost výsledků získaných simulací například experimentem, viz Obr. 19. Simulací se velmi využívá pro tvorbu technologických operací, které jsou obtížně řešitelné analytickými metodami. Další využití ve strojních aplikacích je ověření výsledků získaných experimentem nebo praxí. Z hlediska tváření nám numerická simulace umožňuje studovat chování tvářeného materiálu v reálném, nebo i zpomaleném čase. Výstupy ze simulace nám dále umožní analyzovat procesy na základě velkého množství kritérií. Lze tedy sledovat, jaký následek bude mít změna jednoho procesního parametru na chování materiálu, nebo průběh celé operace. [26]



Obr. 19: Průběh numerického modelování. [27]

Pro numerické simulace ve strojním průmyslu se používají CAE nástroje (computer aid engineering). Tyto nástroje dělíme do čtyř kategorií:

- FEA (finite element analysis) – deformace těles,
- CFD (computer fluid dynamics) – proudění tekutin,
- MBD (multi-body dynamics) – mechanismy,
- ostatní – výrobní procesy. [27]

Pro řešení těchto metod se z drtivé většiny používá metoda konečných prvků (MKP) a metoda konečných objemů (MKO). Rozdíl mezi těmito metodami je v popisu způsobu pohybu hmoty. Pro MKP se využívá Lagrangeova metoda. Sledovaný objekt je nejprve rozdělen pomocí elementů na konečně prvkovou síť, viz Obr. 20. Deformací dojde k výchylce nebo změně trajektorie elementů a sleduje se změna souřadnic částic. MKP se nejvíce využívá pro tuhá tělesa, kde určujeme deformaci, stav napjatosti nebo teplotní pole. [27]



Obr. 20: Koncept metody konečných prvků. [27]

Pro MKO se využívá Eulerova metoda. Těleso se sítí rozdělí na objemy. Deformací se opět mění poloha částic, ale sleduje se, jak se hmota pohybuje skrz prostor, viz Obr. 21. Nejčastěji se tento způsob používá pro tekutiny, kde nezávisí na počáteční poloze elementů.

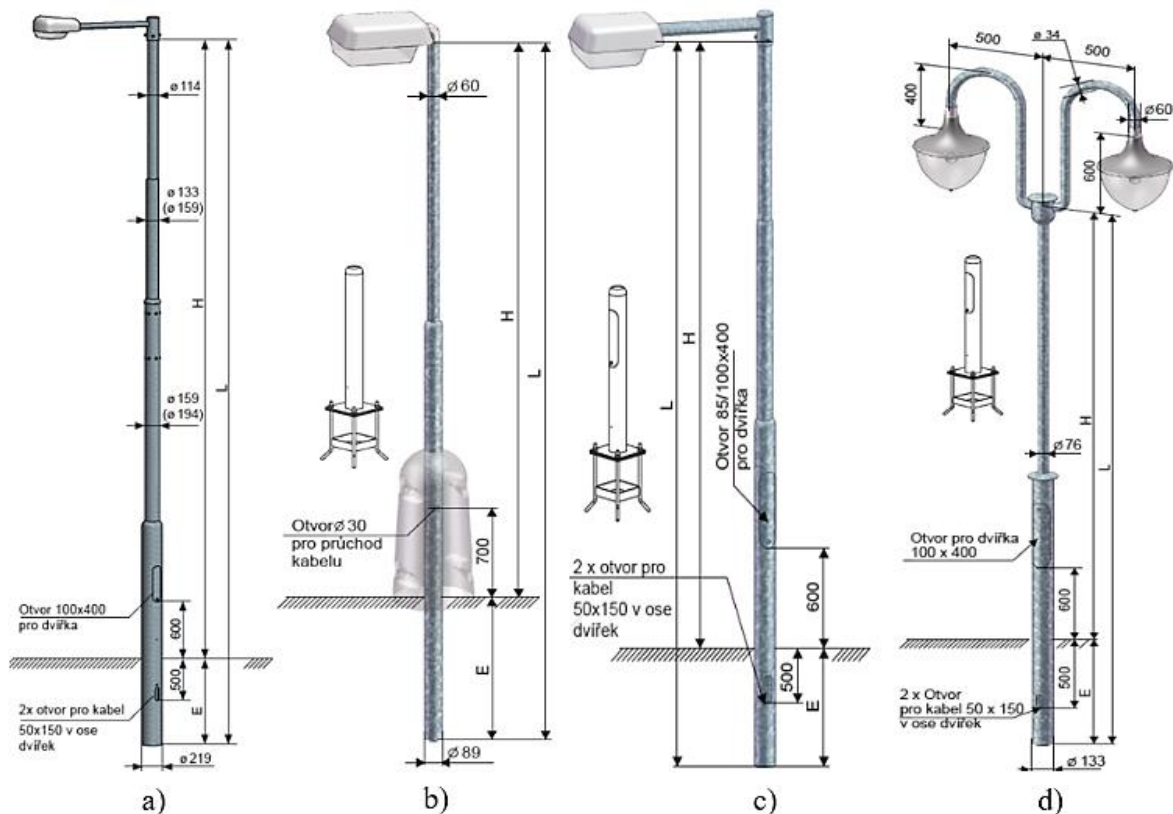


*Obr. 21: Rozdíl mezi MKP a MKO. [27]*

### 3 Popis problému

#### 3.1 Popisem problematiky - definování tvaru, forma vstupního materiálu, materiálové jakosti, rozměry, tolerance

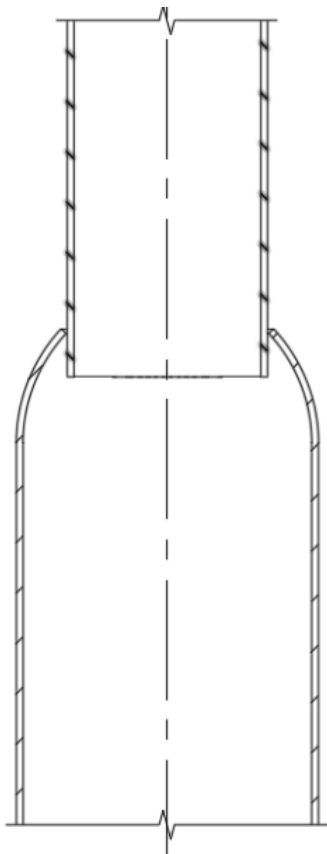
Tato práce se zabývá analýzou výrobních problémů ocelových sloupů. Firmy vyrábí velké množství typů stožárů od stupňovitých stožárů, stožárů k přechodům přes dekorativní a atypické stožáry, viz Obr. 22. [1]



Obr. 22: Typy stožárů: a) bezpaticové, b) paticový, c) k přechodům, d) dekorativní. [1]

Délka stožárů se různí dle jejich použití a větrných podmínek jejich umístění, kdy pro osvětlení např. parků se vyrábí v délce 3m a pro osvětlení dálnic délka může dosahovat téměř 22 m. Výrobní postup stožárů, začíná dělením polotovaru ve formě dlouhé trubky na požadovanou délku pomocí pásové pily. Pokud jsou stožáry stupňovité, následuje tváření konců trubek. Poté jsou do sebe trubky nasunuty a následně jsou svařeny. Je prováděno vyříznutí prostoru pro revizní dvířka. Vyříznutý plech je použit pro výrobu těchto dvířek. Následuje povrchová úprava stožáru žárovým zinkováním, případně se na žárový zinek nanese navíc krycí vrchní polyuretanová barva. Celý postup je zakončen montáží kabelů a elektroniky.

Tvářecí proces je zaměřen na úpravu konců trubek. Trubky jsou použity pro výrobu sloupů lamp veřejného osvětlení. Sloup se vždy skládá z dvou a více trubek, viz Obr. 23. Následující trubka má vždy menší průměr než trubka předchozí.



Obr. 23: Složení dvou trubek do sebe.

Kritické místo v procesu je tváření konce trubky. To je prováděno speciálním tvarovým nástrojem. Polotovarem pro tvářecí proces jsou švové trubky z materiálu S235JRH. Tyto trubky se využívají ve stavebnictví, či pro výrobu strojů. Trubky jsou vhodné k pozinkování a nedoporučují se ohýbat. Dodávají se v délkách 6 m nebo 12 m. Z údajů v Tab. 2 a Tab. 3, lze vyčíst chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu používaného v procesu (tloušťka stěny do 5 mm). Pro výrobu stožárů se používají trubky o vnějším průměru nejčastěji 150 mm, 133 mm a 89 mm. Tloušťka stěny bývá 3 – 5 mm. [28] [29]

Tab. 2: Chemické složení oceli S235JRH. [30]

Značka	Číselné označení	C	Mn	P	S	N
S235 JRH	1.0039	Max. 0,2	Max. 1,4	Max. 0,04	Max. 0,04	Max. 0,009

Tab. 3: Mechanické vlastnosti oceli S235JRH. [31]

Minimální hodnota $R_{eH}$ [MPa]		$R_m$ [MPa]		Minimální tažnost A [%]	Minimální nárazová práce [J]
Tloušťka stěny [mm]					Teplota [°C]
$\leq 16$	$> 16 \leq 40$	$< 3$	$\geq 3 \leq 40$	$\leq 40$	20
235	225	360 - 510	360 - 510	24	27

Norma udává toleranci vnějšího průměru s odchylkou od nominální hodnoty nejvíce  $\pm 1\%$ , viz Tab. 4. Nejméně to ale může být  $\pm 0,5$  mm. Nejvýše  $\pm 10$  mm. [31]

Tab. 4: Tolerance vnějšího průměru trubky. [31]

Nominální hodnota [mm]	89	133	150
Minimální hodnota [mm]	88,11	131,67	151,5
Maximální hodnota [mm]	89,89	134,33	148,5

Dále je uvedena tolerance tloušťky stěny trubky. Pro trubky využívané v procesu (tloušťka stěny  $t \leq 5$  mm) platí tolerance  $\pm 10\%$  od nominální hodnoty, viz Tab. 5. [31]

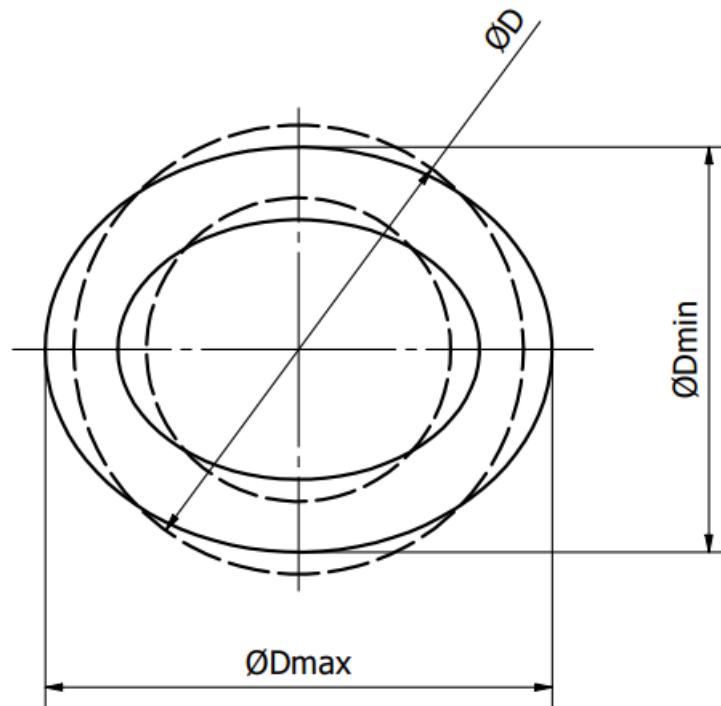
Tab. 5: Hodnoty tolerance tloušťky stěn využívaných v procesu. [31]

Nominální hodnota [mm]	3	5
Minimální hodnota [mm]	2,7	4,5
Maximální hodnota [mm]	3,3	5,5

Dále je v normě uvedena tolerance ovalita trubky. Ovalita značí odchylku příčného průřezu od původního kruhového tvaru, viz Obr. 24. Čím větší je poměr vnějšího průměru trubky k tloušťce stěny, tím více se zvyšuje náchylnost k ovalitě. Ovalita se udává v procentech a určí se dle vzorce (9). Norma uvádí odchylku  $\pm 2\%$  pro hodnotu ovality. [32] [31]

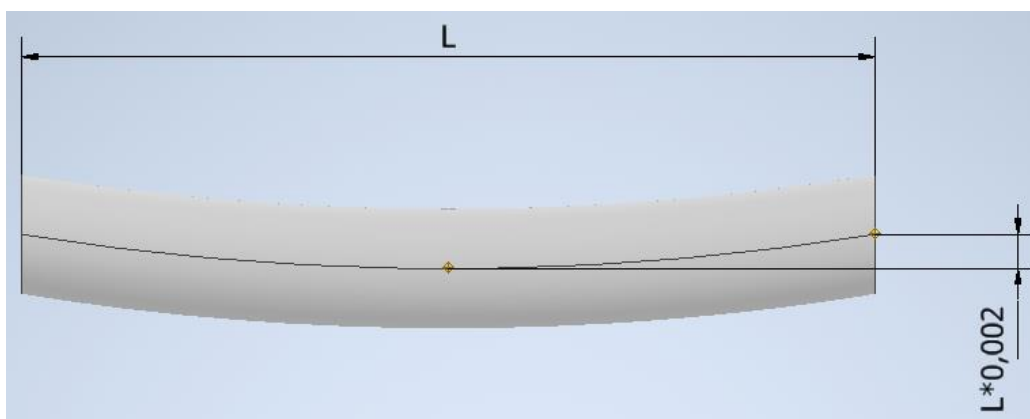
$$ovalita = 2 \cdot \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \cdot 100 [\%] \quad (9)$$





Obr. 24: Ovalita trubky.

Dalším tolerovaným údajem je přímota trubky. Přímota trubky značí největší dovolený průhyb trubky v její délce, viz Obr. 25. Průhyb trubky vzniká již při samotném svařování při jejich výrobě. Norma udává dovolenou hodnotu průhybu jako 0,2 % z celkové délky trubky a 3 mm na jakýkoliv 1 m délky. Přípustné hodnoty průhybu pro vyráběné trubky o délce 6 m a 12 m jsou uvedeny v Tab. 6. [31]



Obr. 25: Průhyb trubky v délce.

Tab. 6: Dovolené hodnoty průhybu pro dodávané délky trubek. [31]

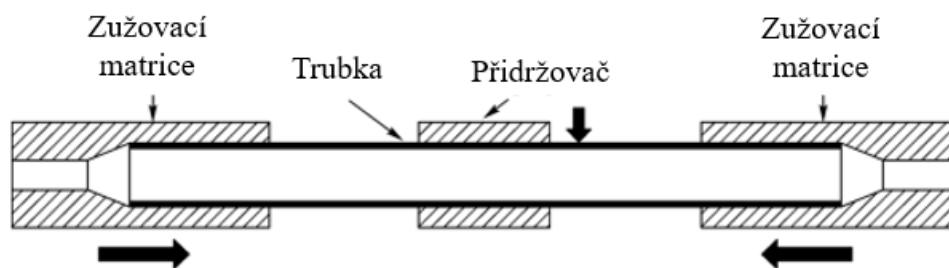
Nominální hodnota [mm]	12 000	6 000
Průhyb [mm]	24	12

## 3.2 Rozbor možných způsobů úpravy konců trubky

Před úpravou konce trubky je nutné připravit trubku pro získání finálního výrobku. To je realizováno řezáním na pásové pile. Cílem následné tvářecí operace je získání požadovaného tvaru konce trubky. Toho je možné dosáhnout pomocí některé z následujících technologií:

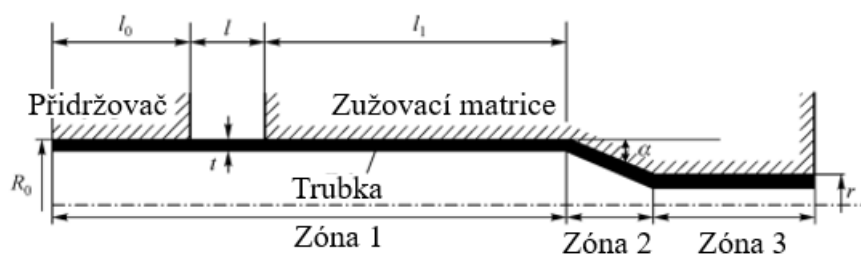
### 3.2.1 Zužování trubek

Jedna z možných variant výroby je pomocí technologie zužování trubek. Tato technologie se již využívá v leteckém, nebo kosmickém průmyslu pro výrobu táhel. Polotovarem pro tento proces je trubka, která se umístí do přídržovače. Následně se dají do pohybu tvářecí nástroje upnuté v hydraulickém lisu, viz Obr. 26. Pohybem těchto nástrojů dochází ke zmenšení průměru tvářeného dílu. [33] [34]



Obr. 26: Princip technologie zužování. [33]

Systém deformace lze rozdělit do tří částí, viz Obr. 27. Podpěrnou část, plastickou zónu a vytvářenou oblast. Proces je ovlivňován zejména úhlem zúžení, teplotou, rychlostí deformace mazáním a tloušťkou stěny. Nevýhodou této technologie je zejména nutnost tvarových nástrojů a velké tvářecí síly nutné k přetvoření materiálu. [35]



Obr. 27: Zóny při procesu zužování. [33]

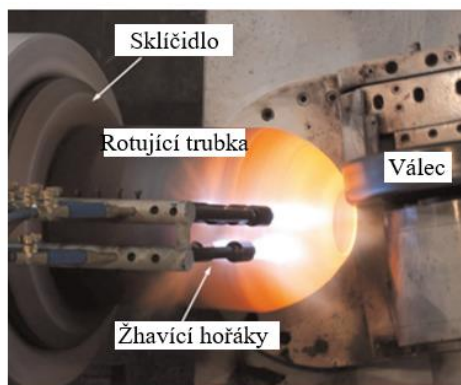
V posledních letech jsou snahy před procesem tváření konce trubek ohřát. Ohřevem dojde ke snížení deformačního odporu materiálu a tím i poklesu tvářecích sil. Nevýhodou jsou vyšší nároky na mazání z důvodu zvýšené teploty. Tyto nároky se s rostoucí teplotou zvyšují. [34]

- + přesnost vyráběných rozměrů,
- + zpevnění materiálu,

- + nedochází ke ztenčení,
- + dlouhé polotovary,
- velké tvářecí síly,
- cena stroje,
- nutnost mazání procesu. [36]

### 3.2.2 Kovotlačitelství

Další možnou variantou je technologie kovotlačitelství. To se využívá pro výrobu osově symetrických i nesymetrických dílů. Trubka, jejíž konec je studený nebo ohřátý, je uchycena do sklíčidla a otáčí se kolem své osy. Samotné tváření probíhá pomocí tlačení kladky ve tvaru válečku do otáčející se trubky až do dosažení požadovaného tvaru, viz Obr. 28. [37] [38]



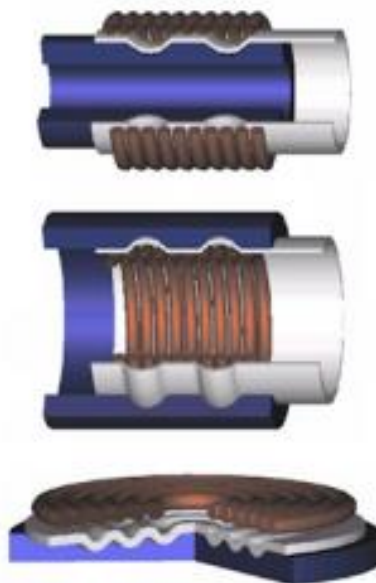
Obr. 28: Princip zúžení trubek pomocí kovotlačitelství. [37]

Celý proces je řízen pomocí NC nebo CNC strojů. Výhodou kovotlačitelství je nižší nárok na tvářecí síly oproti procesům hlubokého tažení nebo protlačování. Další výhodou je použití tvarově jednoduchých nástrojů. Kovotlačitelství se nejvíce využívá pro výrobu tlakových nádob. [38] [39]

- + nízká cena nástrojů,
- + snadná změna procesních parametrů,
- + rychlost provedení,
- + menší tvářecí síly,
- špatná kvalita povrchu,
- větší odchylka ovality,
- proces omezen délkou tvářence. [39]

### 3.2.3 Elektromagnetické tváření

Elektromagnetické tváření spadá do způsobů tváření pomocí nepevných nástrojů. Pro tváření se využívají pulzní Lorentzovy síly. Elektromagnetické tváření nachází největší uplatnění v oblasti tváření plechů a trubek od 0,2 do 4 mm. Nevětší využití je u materiálu s vysokou elektrickou vodivostí, jako je měď a její slitiny, hliník nebo nízkouhlíková ocel. Metoda využívá odpudivé síly dvou magnetických polí. Polotovarek je umístěn do tvarové cívkky, která je napojena na kondenzátorovou baterii. Vybitím baterii se vytvoří silné magnetické pole a v polotovaru jsou vyvolány vířivé proudy. Tím vznikne potřebný tvářecí tlak a polotovarek je natvarován dle tvaru cívkky. Pro zužování trubek musí být polotovarek umístěn uvnitř tvarové cívkky, viz Obr. 29. [23] [40]



Obr. 29: Varianty polohy cívkky vůči tvářenému polotovaru. [41]

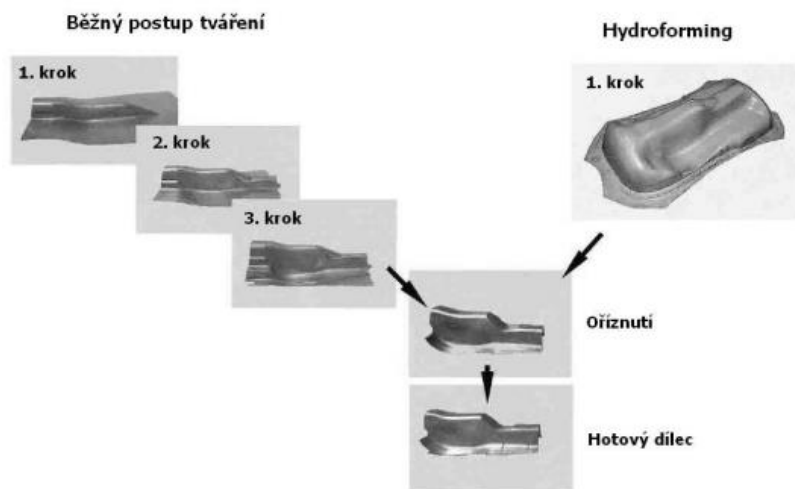
- + technická nenáročnost,
- + jednoduchost nástrojů,
- + rovnoměrně rozložený tlak,
- složité a nákladné výrobní zařízení,
- malé rozměry dílce,
- energetická spotřeba. [40]

### 3.2.4 Hydroforming

Hydroforming je výrobní technologie, která využívá tlaku kapalného média k přetvoření polotovaru z trubek nebo plechů do požadovaného tvaru. Kapalina tlačí na polotovarek proti tvarové matici. Největší výhodou této metody je rovnoměrné rozložení tlaku kapaliny po celé

ploše výlisku. Tím se snižuje riziko defektů a zmenšují se napěťové špičky. Je tedy možné tvářet složité tvary v jedné operaci, viz Obr. 30. [42] [43]

- + rovnoměrný tlak,
- + nízká cena nástrojů (odpadá např. seřizování),
- + možno vyrábět složité tvary na jednu operaci,
- nutno vyvinout vysoký tlak kapaliny,
- dlouhé výrobní časy,
- energetická spotřeba. [43]

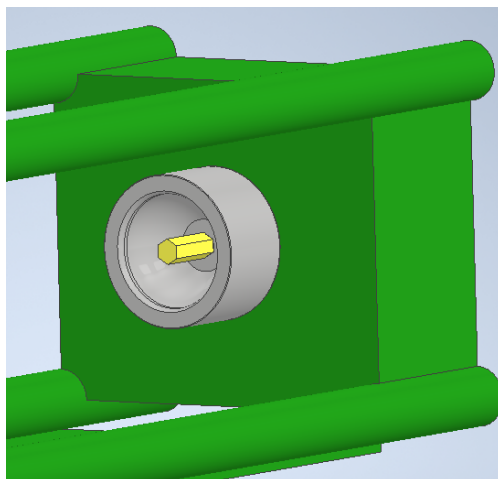


Obr. 30: Porovnání klasického postupu lisování s postupem hydroformingu. [44]

Z hlediska nároků výrobního procesu na co nejvyšší produktivitu tvářecí metody a zároveň možnost výroby dlouhých stožárů se jako nejvhodnější z výše popsanych jeví zužování trubek tvarovým nástrojem.

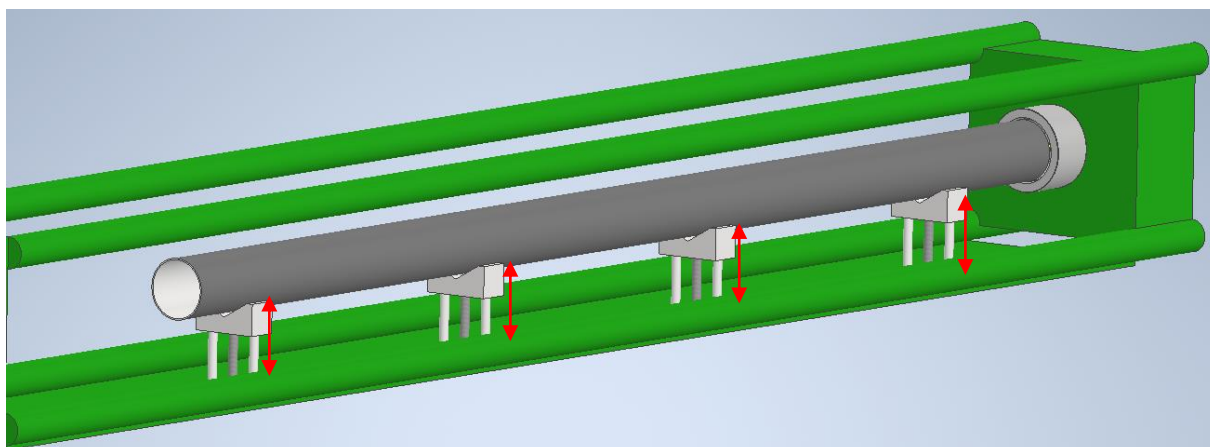
### 3.2.5 Popis současného tvářecího procesu

Proces začíná upnutím tvářecího nástroje dle průměru tvářeného polotovaru do smýkadla pomocí šroubu se šestihrannou hlavou, viz Obr. 31.



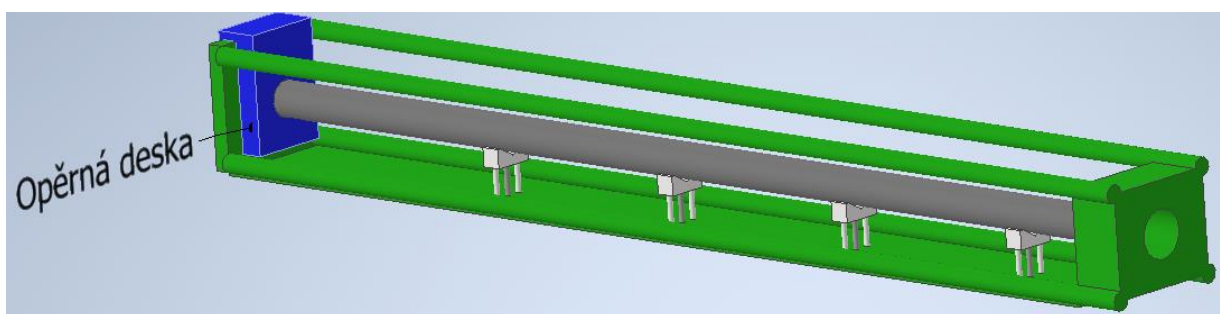
Obr. 31: Tvarový nástroj ve stroji.

Následně je polotovar položen na prizmatické kostky, kterými lze polohovat umístění polotovaru v nástroji pomocí pohybových šroubů směrem nahoru a dolů. Tímto způsobem dojde k vyrovnání polotovaru vzhledem k ose nástroje, viz Obr. 32.



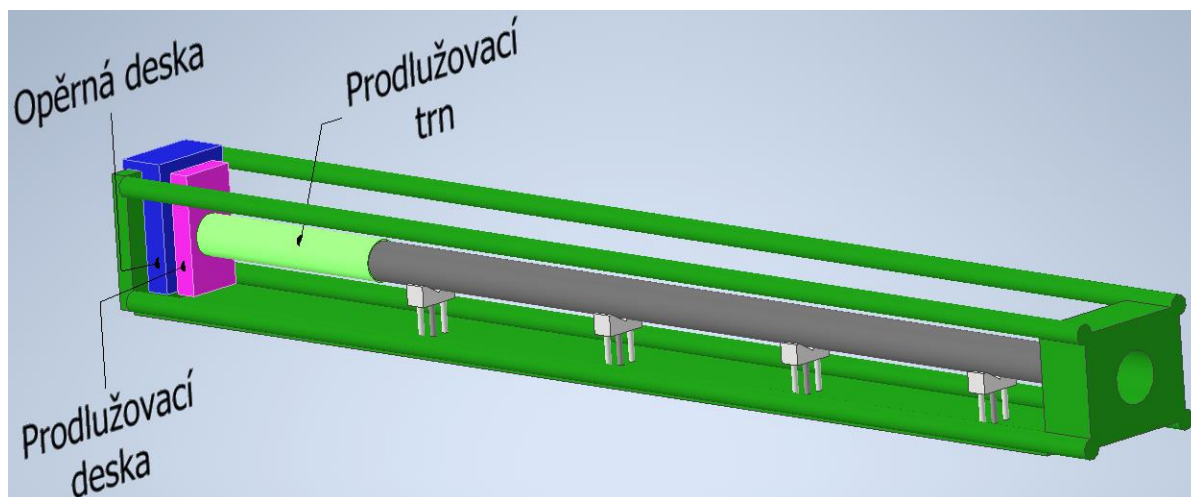
Obr. 32: Polohování polotovaru pomocí prizmat.

Dále se pověsí opěrný segment (opěrná deska), který slouží k opření polotovaru, viz Obr. 33. Poloha umístění segmentu je závislá na délce tvářeného polotovaru.



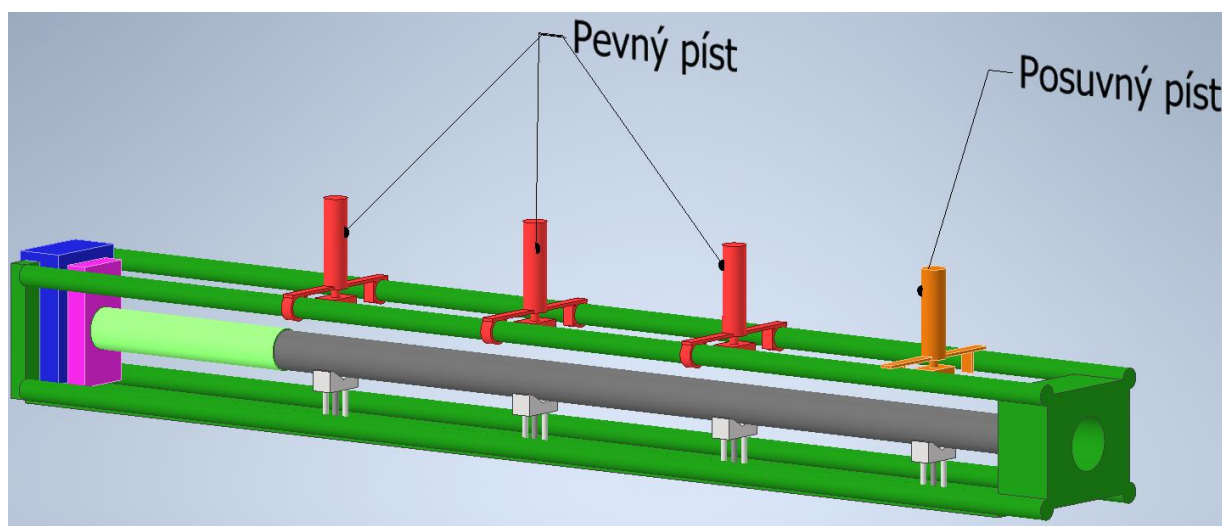
Obr. 33: Konec polotovaru podepřený opěrnou deskou.

Pokud je polotovár kratší a nedosáhne k opěrnému segmentu, je nutné použít prodlužovací segmenty, kterými se kompenzuje délka, aby byl polotovár podepřen proti funkční části nástroje, viz Obr. 34.



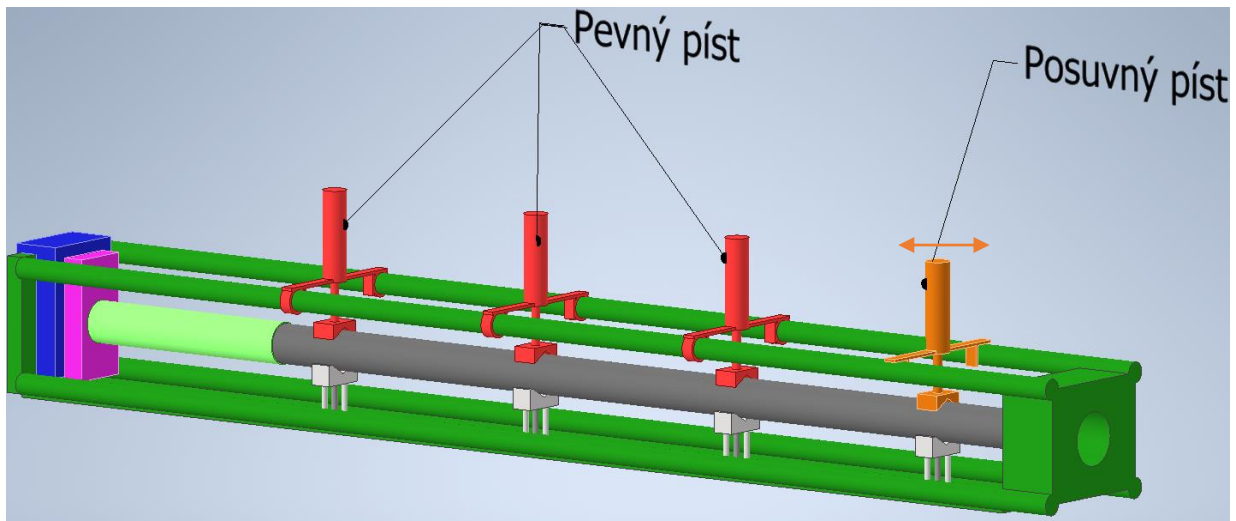
Obr. 34: Využití prodlužovacích přípravků pro kompenzaci délky.

Následně je polotovár přidržen pomocí pneumatických válců, viz Obr. 36. První válec nejbližší nástroji je polohově stavitelný, lze tedy jeho polohu měnit. Ostatní přidržovací písty mají pevně danou polohu, viz Obr. 35.



Obr. 35: Rozmístění pístů při přípravě procesu.





Obr. 36: Přítlačení polotovaru pomocí pístů.

Tvarový nástroj se začne pohybovat a tvářet konec polotovaru. Při dosažení definovaného posuvu nástroje dojde k přerušení procesu a obsluha pomocí posuvného měřítka zkontroluje hodnotu vnitřního průměru. Pokud je jeho hodnota vyhovující, proces je ukončen a polotovar postupuje dál ve výrobním procesu. Pokud průměr nevyhovuje, tváření pokračuje změnou polohy dorazu ukončující výrobní proces a celý postup kontroly se opakuje, dokud není průměr dosažen. Pokud je dosažen průměr menší, než je požadovaný, tak obsluha manuálně srazí vnitřní stranu tvářence, čímž dojde k zvětšení průměru. Po dotváření polotovaru se do prizmat vloží další polotovar, který už není vyrovnáván a poloha prizmat se nemění.

### 3.3 Rozbor možných problémů

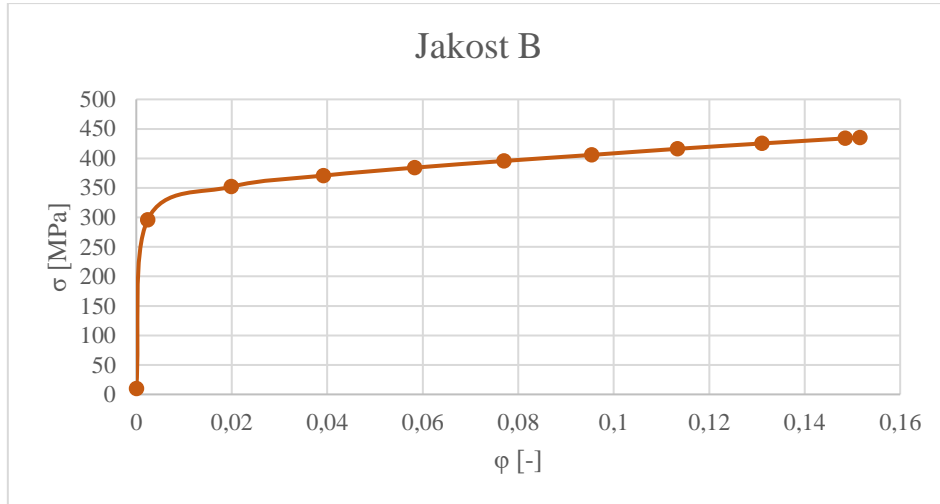
Z předešlých podkapitol lze pozorovat, že na samotný proces má vliv mnoho parametrů od dělení materiálu, vstupní vlastností zpracovávaného materiálu, rozměrech a tolerancí geometrie vstupního materiálu přes samotné nastavení tvářecího procesu. V procesu se mohou vyskytnout následující problémy:

#### 3.3.1 Mechanické vlastnosti zpracovávaného materiálu

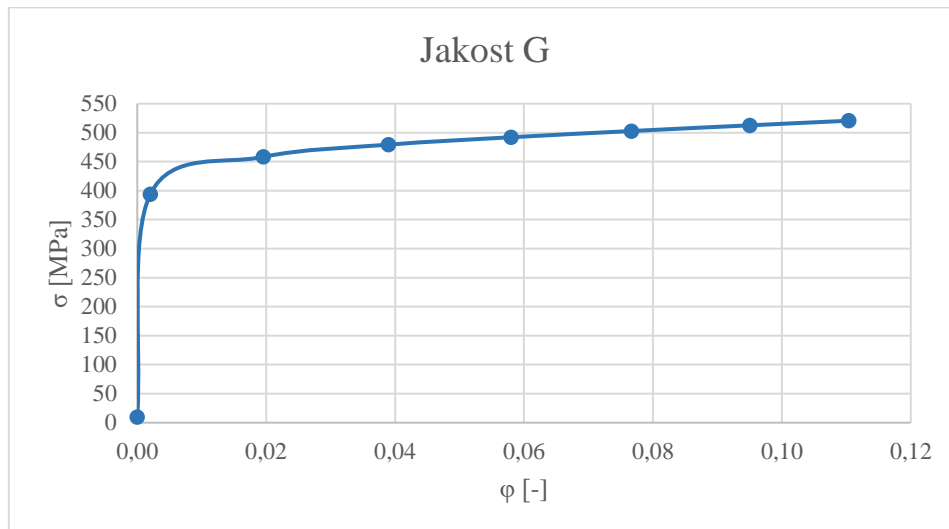
V již provedených experimentech [45] byl analyzován rozptyl mechanických vlastností tvářeného materiálu pomocí zkoušky tahem na zkušebním stroji. Odběr vzorků byl proveden podélně z rozvinuté trubky. Vzorky byly připraveny z dodaných trubek do tvaru zkušebního tělesa dle požadavku norem na tvar zkušebních těles. Rozptyl mechanických vlastností daný normou je uveden v Tab. 3. Z výsledků [45] bylo zjištěno, že ne všechny dodávané materiálové šarže splňují rozptyl vlastností daný normou. Rozptyl vlastností vstupního materiálu znamená zásadní problémy pro samotnou výrobu. Z tohoto důvodu byly pro analýzu vlivu vlastností



vstupního materiálu vytipovány dvě materiálové šarže, mezi kterými jsou výrazné rozdíly mechanických vlastností, z hlediska meze kluzu se nachází na opačných stranách rozptylu hodnot. Pro ně byly vytvořeny křivky zpevnění, viz Obr. 37 a Obr. 38, kterými byl modifikován materiálový model materiálu S235JRH v simulačním programu.



Obr. 37: Křivka zpevnění materiálové jakosti B.



Obr. 38: Křivka zpevnění materiálové jakosti G.

Materiálová jakost G měla nejvyšší naměřenou hodnotu meze pevnosti i meze kluzu. Tato materiálová jakost má nejmenší zásobu plasticity a je tedy možné ji klasifikovat jako nejhorší z pohledu tváření. Z Tab. 7 lze pozorovat výrazný rozdíl mechanických vlastností dvou materiálových šarží, které se mohou dostat do výrobního procesu.

Tab. 7: Porovnání mechanických vlastností analyzovaných jakostí. [45]

Jakost	R <sub>e</sub>	R <sub>m</sub>	R <sub>e</sub> /R <sub>m</sub>
B	298	423	0,70
G	399,5	525	0,76

### 3.3.2 Ovalita

Odchylka ovality v rámci normy by na tvářecí proces neměla mít žádný zásadní vliv, jak z hlediska tvářecích sil, tak i z hlediska výsledného průhybu.

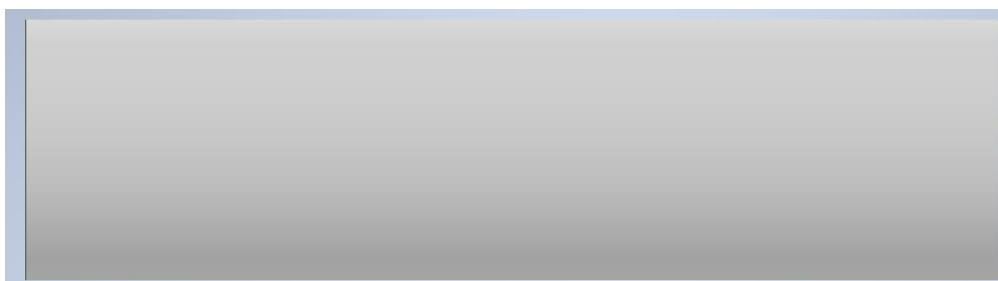
### 3.3.3 Tloušťka stěny

Hodnoty tolerance tloušťky stěny dané normou jsou uvedeny v Tab. 5. Tloušťka bude mít vliv na tvářecí sílu. Simulace budou provedeny pro tloušťky stěn 2,7 mm, 3 mm a 3,3 mm.

### 3.3.4 Dělení materiálu

Polotovar se připravuje dělením z výchozího polotovaru na pásových pilách podle požadované délky. Při procesu dělení je pro zvýšení efektivity upnuto několik polotovarů najednou. Pomocí dorazu se nastaví požadovaná délka a je proveden řez, při kterém může dojít vlivem procesu řezání ke vzniku podkosu na řezu. Dále vlivem prohnutí polotovaru mohou nastat různé situace, které budou následně uvažovány při numerických simulacích. Jedná se o:

- a) Oba konce kolmé k povrchu, rovnoběžné řezy, viz Obr. 39.



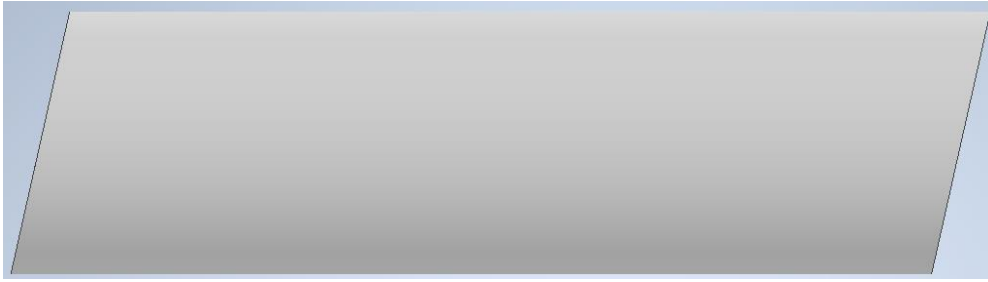
Obr. 39: Varianta bez podkosu.

- b) Jeden konec kolmý, druhý s podkosem řezu, viz Obr. 40.



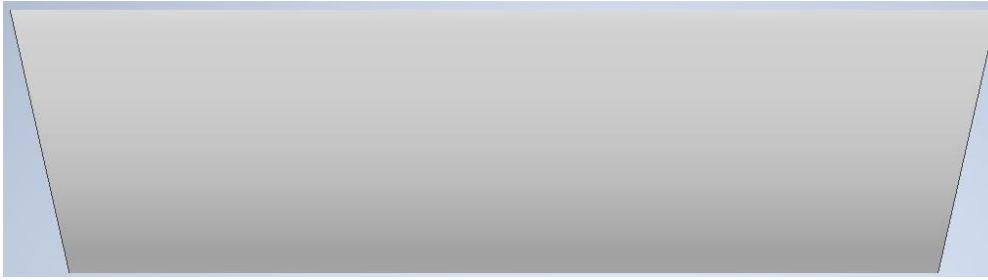
Obr. 40: Varianta se spodním podkosem.

- c) Oba konce s podkosem řezu, řezy rovnoběžné, viz Obr. 41.



Obr. 41: Rovnoběžný podkos.

- d) Oba konce s podkosem řezu, řezy mimoběžné, viz Obr. 42.



Obr. 42: Mimoběžný podkos.

Simulacemi bude ověřen vliv podkosu řezu jak na tvářecí síly, tak i na konečný průhyb tvářence. Simulace bude provedena pro podkos řezu 1 mm a 2 mm.

### 3.3.5 Průhyb

Další problémem může být průhyb polotovaru. Velikost průhybu bude růst s rostoucí délkou polotovaru. Simulacemi bude ověřen vliv počátečního průhybu na průhyb po tváření. Průhyb bude úzce souviset s upnutím polotovaru při řezání na pásové pile. Pokud bude polotovar při řezání vyrovnán vzhledem k prohnuté ose polotovaru, dojde k prořezu s geometrií na Obr. 43. Druhou možností je, že polotovar bude vyrovnán vzhledem k rovině stolu s výslednou geometrií, viz Obr. 44. Simulace bude provedena pro obě zmíněné varianty kombinace průhybu a nastavení při řezání pro délku polotovaru 3 000 mm. Na hodnotu průhybu použitou v simulaci budou mít vliv další parametry procesu a bude určena níže.



Obr. 43: Vyrovnání polotovaru při řezu vzhledem k prohnuté ose polotovaru.



Obr. 44: Vyrovnání polotovaru vzhledem k rovině stolu.

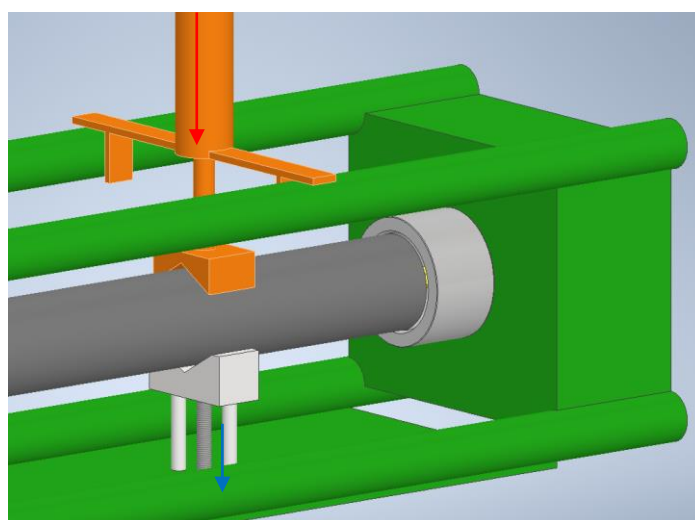
### 3.3.6 Délka polotovaru

Ve tvářecím procesu jsou vyráběny polotovary v délkách od 1 m až do 6 m. Délka tvářeného materiálu by neměla mít vliv na velikost tvářecích sil, ale bude mít značný vliv na výsledný průhyb, viz (10). Pomocí numerické simulace bude zjištěna citlivost výsledného průhybu polotovaru na její délce. Simulace bude provedena pro délky 1000 mm, 2000 mm a 3000 mm.

$$w = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_y} \quad (10)$$

### 3.3.7 Polohování a nastavení tvářecího procesu

První problém nastává při napolohování prvního polotovaru, který se vyrovná pomocí prizmatických kostek se šrouby. Toto napolohování se provede pouze pro první polotovar z dané tvářené skupiny, bez ohledu na jeho tvar a umístění do stroje. Další zpracováváný polotovar nemusí vykazovat stejnou deformaci (průhyb, tloušťku stěny, podkos řezu), případně bude otočen jiným způsobem. Další problém nastává při přidržení polotovaru pneumatickými válci, které na polotovar působí velkým přidržovacím tlakem, z důvodu eliminace vybočení polotovaru během tvářecího procesu. Jelikož je proces vyrovnán vzhledem k prvnímu použitému polotovaru, dojde k deformaci následujících polotovarů (mají jinou deformaci) vlivem velkého tlaku od válců vzhledem k nastavené dráze, viz Obr. 45.



Obr. 45: Deformace polotovaru vlivem jejího stlačení pomocí pístů.

Vliv napolohování je velmi obtížné nastavit v simulačním softwaru. Z tohoto důvodu bude přistoupeno ke zjednodušení úlohy. Rovněž dojde k zjednodušení vlivu deformace od zatlačení pneumatického válce na polotvar. Pro simulační úlohu bude uvažováno zvětšení průhybu polotovaru až na 4,5 mm.

### 3.3.8 Ukončení procesu

Nynější proces je ukončen na základě dosažení určitého posuvu nástroje a měření vnitřního průměru tvářeného konce polotovaru. Tento postup není vhodný, jelikož do procesu vstupuje materiál s tolerancí tloušťky stěny, průměru i délky. Tyto parametry se v rámci procesu mění a dráha, při které je dosažen požadovaný průměr, je u každého polotovaru jiná. Z tohoto důvodu je nutné provést kontrolu dosaženého průměru u každého dílu, což výrazně snižuje produktivitu práce. Pomocí simulací bude snaha navrhnout způsob ukončení procesu na základě parametru síly pro analyzované materiálové jakosti.

## 4 Numerická simulace

### 4.1 Nastavení úlohy

Simulace byly uskutečněny v programu Simufact Forming. Jako základní materiálový model byl použit materiál S235 z knihovny programu, ke kterému byly přidány modifikované křivky zpevnění uvedené v předchozí kapitole. Dále byl aplikován model nástroje vytvořený pomocí výkresové dokumentace a doplněný o kroužek s vnějším průměrem 89 mm. Polotovarem pro všechny simulace byla trubka o vnějším průměru 133 mm. Ostatní parametry geometrie polotovaru jsou uvedeny zvlášť. Tření bylo zvoleno pro všechny provedené simulace konstantní se součinitelem třením 0,16. Jako stroj byl zvolen hydraulický lis. Zdvih byl volen pro každou variantu individuálně na základě dosažení požadovaného konečného průměru. Nástroje byly nastaveny jako dokonale tuhá tělesa a přiřazený materiál neměl vliv na výsledky. Teploty nástrojů a polotovaru byly nastaveny na 20 °C. Polotovar byl nasíťován pomocí tzv. Sheetmesh, která je vhodná pro tento typ polotovarů. Příklad nastavení úlohy a prostředí simulačního softwaru je zobrazen na Obr. 46.



Obr. 46: Nastavení úlohy v simulačním softwaru.

## 4.2 Sledované parametry a jejich vliv na proces (citlivost parametrů)

### Podkos řezu

Jako první byl analyzován vliv podkosu řezu na výrobní proces. Jako počáteční geometrie byla zvolena trubka o délce 1 000 mm a tloušťce stěny 3 mm. Parametrem simulací byl velikost podkosu a jeho umístění. Simulace byly provedeny pro hodnoty podkosu 1 mm a 2 mm. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 8, Tab. 9.

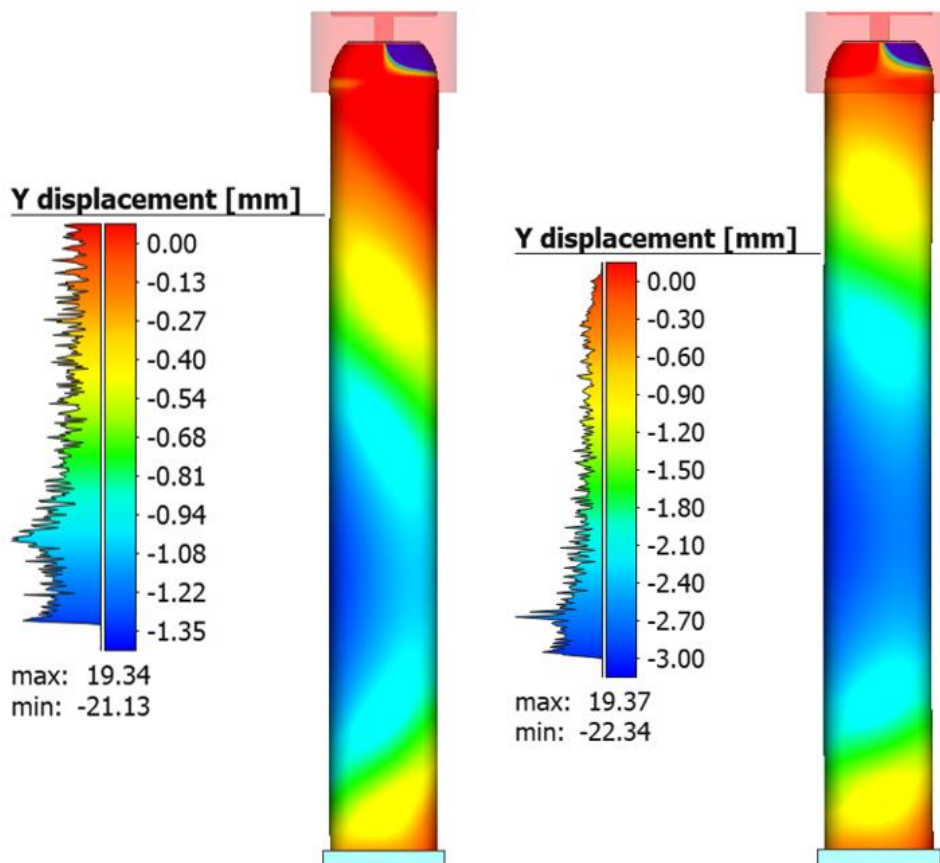
Tab. 8: Tvářecí síla [kN] při dosažení průměru 89 mm.

	Tloušťka stěny 3 mm			
	B		G	
	Podkos [mm]		Podkos [mm]	
	1	2	1	2
Bez	389	389	483	483
Spodní	406	411	488	560
Rovnoběžné	538	592	723	733
Mimoběžné	405	507	560	639

Tab. 9: Průhyb trubky [mm] při dosažení průměru 89 mm.

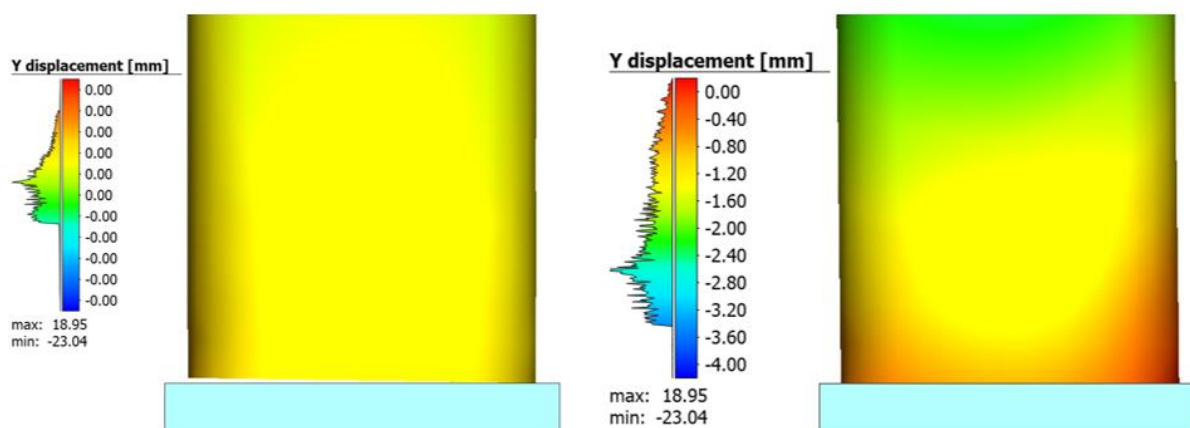
	Tloušťka stěny 3 mm			
	B		G	
	Podkos [mm]		Podkos [mm]	
	1	2	1	2
Bez	0	0	0	0
Spodní	1,35	2,9	1,35	3
Rovnoběžné	1,35	3	1,4	3
Mimoběžné	2	3,6	1,95	3,65

Z výsledků vyplývá, že výrobní proces je velmi citlivý z hlediska velikosti i umístění podkosu řezu. Čím vyšší bude podkos řezu, tím vyšší bude hodnota výsledného průhybu tvářence, viz Obr. 47, i síly potřebné pro dosažení požadovaného průměru 89 mm.



Obr. 47: Vlevo průhyb tvářence s podkosem 1 mm, vpravo průhyb tvářence s podkosem 2 mm.

Při analýze výsledků simulací vyšlo najevo, že průhyb na trubce je způsoben zejména podkosem řezu trubky v kontaktu s opěrným segmentem, kde dochází k tváření konce trubky do momentu kdy je celá plocha konce trubky v plném kontaktu s opěrným segmentem, viz Obr. 48.

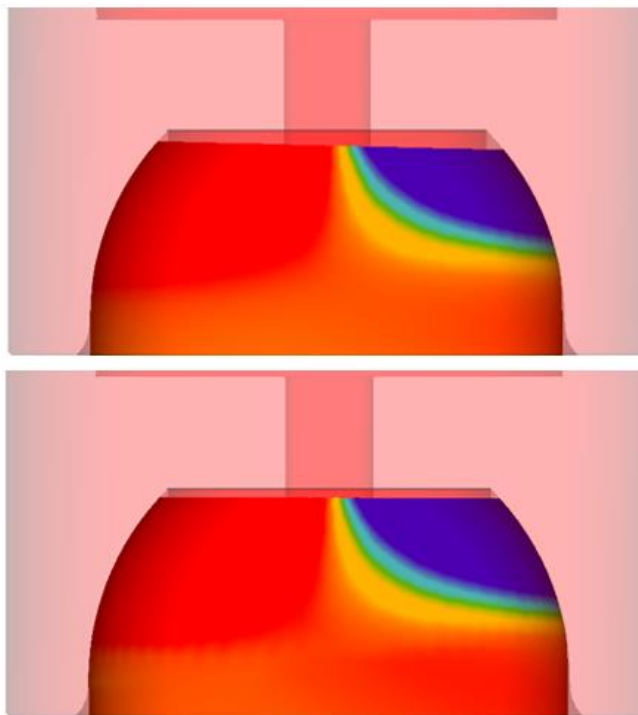


Obr. 48: Vliv podkosu na průhyb tvářence.

Na velikost potřebné síly má velký vliv umístění podkosu. Z výsledků vyplývá, že pokud dojde k rovnoběžnému podkosu řezu (viz Obr. 41), síla se zvýší o více než 200 kN, než

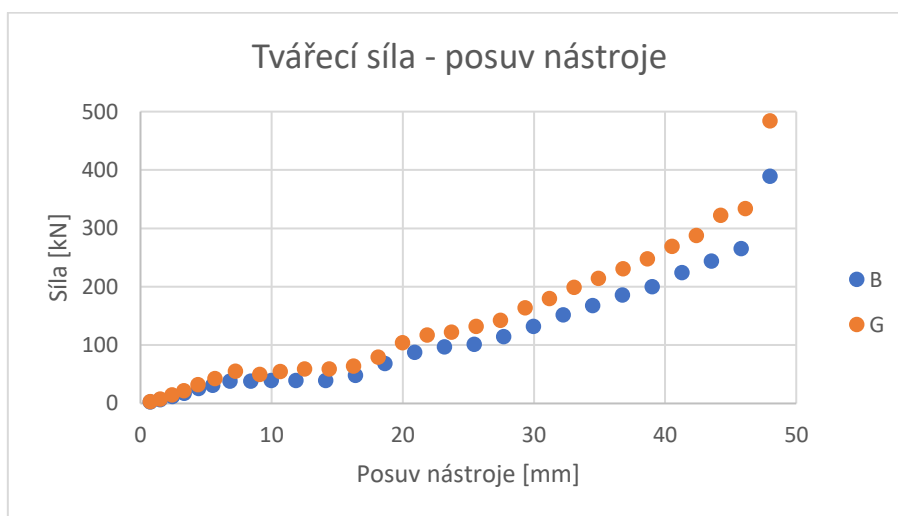


kdyby k podkosu řezu nedošlo. Toto je způsobeno tím, že vlivem podkosu dojde ke styku trubky s kroužkem nástroje na jedné straně podstatně dřív, než na druhé, viz Obr. 49 nahoře. Je tedy nutné vyvodit větší posuv nástroje, aby byl dosažen průměr 89 mm v celém průřezu, viz Obr. 49 dole, čímž dochází k nárůstu síly.



Obr. 49: Nahoře styk jedné strany trubky s nástrojem, dole proces při dosažení průměru 89 mm.

Dále byly pomocí simulací porovnány analyzované materiálové šarže. Pro porovnání byla vybrána varianta trubky bez podkosu řezu, která je zobrazena na Obr. 50. Ze závislosti síly na posuvu nástroje vyplývá, že ukončení výrobního procesu je velmi citlivé na rozptyl vlastností materiálu polotvaru. Pozitivní je podobný trend u obou materiálových šarží.



Obr. 50: Porovnání materiálové šarže B a G pro délku 1 000 mm.

## Tloušťka stěny

Dále byl analyzován vliv tloušťky stěny trubky na výrobní proces. Jako počáteční geometrie byla zvolena trubka o délce 2 000 mm. Parametrem simulací byla velikost tloušťky stěny, jejíž rozmezí je dáno normou. Simulace byly provedeny pro tloušťky stěny 2,7 mm, 3 mm a 3,3 mm. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12 a Tab. 13.

Tab. 10: Tvářecí síla [kN] při dosažení průměru 89 mm jakost B.

	Tloušťka stěny [mm]		
	2,7	3	3,3
Bez	337	359	419
Spodní	307	372	385
Rovnoběžné	421	463	522
Mimoběžné	307	337	376

Tab. 11: Tvářecí síla [kN] při dosažení průměru 89 mm jakost G.

	Tloušťka stěny [mm]		
	2,7	3	3,3
Bez	436	537	620
Spodní	425	458	513
Rovnoběžné	544	622	676
Mimoběžné	409	433	517

Tab. 12: Průhyb trubky [mm] při dosažení průměru 89 mm jakost B.

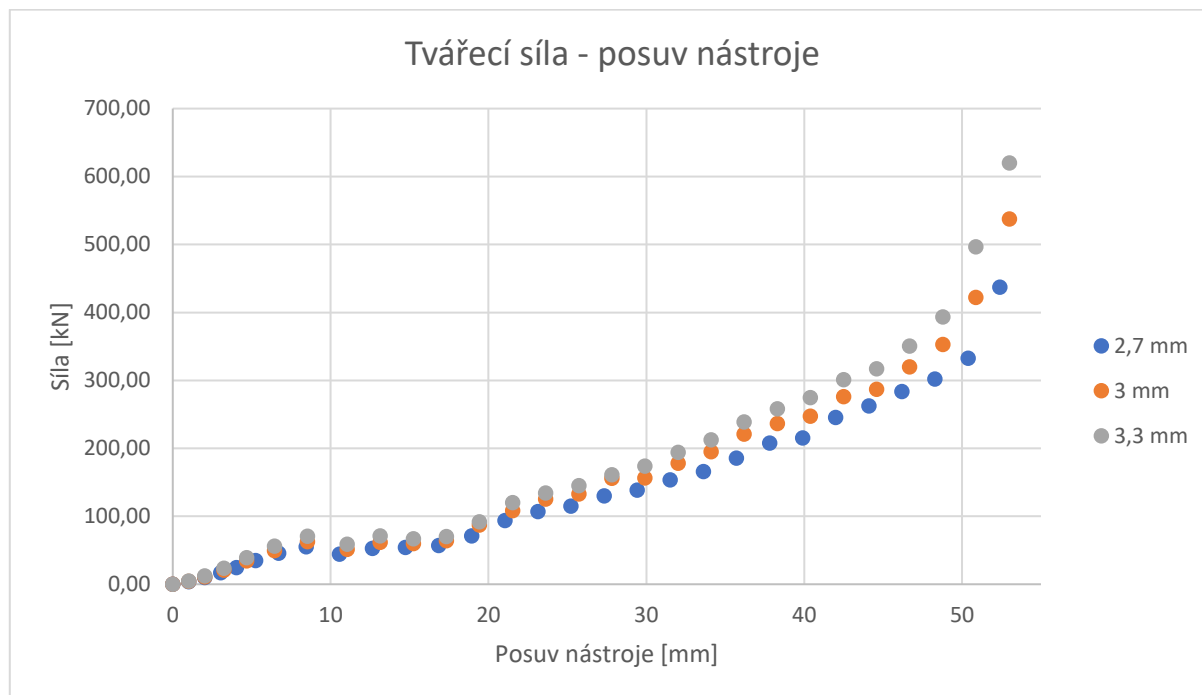
	Tloušťka stěny [mm]		
	2,7	3	3,3
Bez	0	0	0
Spodní	6,1	5,95	6,2
Rovnoběžné	4,4	4,1	4,2
Mimoběžné	8,4	8,4	8,55

Tab. 13: Průhyb trubky [mm] při dosažení průměru 89 mm jakost G.

	Tloušťka stěny [mm]		
	2,7	3	3,3
Bez	0	0	0
Spodní	5,65	5,75	5,95
Rovnoběžné	4,5	4,2	4,2
Mimoběžné	8,3	8,45	8,65

Při analýze výsledků bylo zjištěno, že tloušťka stěny nemá vliv na výrobní proces z hlediska deformace průhybem. Citlivost na tloušťce stěny se projevila u velikosti síly při dosažení konečného průměru 89 mm. Čím více je trubka na horní hranici tolerance tloušťky stěny, tím větší sílu je nutné vyvinout pro dosažení průměru 89 mm a naopak. Z tohoto důvodu

došlo k bližšímu analýze závislosti síly na posuvu nástroje pro simulované tloušťky stěny. Do grafu byly vyneseny závislosti pro variantu bez podkosu řezu materiálové šarže G, viz Obr. 51.



Obr. 51: Porovnání analyzovaných tlouštěk stěn.

Z grafu je patrný velmi podobný trend křivek pro všechny tloušťky stěny. Rozmezí síly při dosažení průměru 89 mm se pohybuje v rozptylu 183 kN. Je tedy patrné, že pro ukončování procesu pomocí síly je před tvářecím procesem vstupní geometrii trubek vhodné rozřadit do podobných rozměrových skupin.

### Kombinace průhybu s podkosem řezu

Jako poslední byl analyzován vliv kombinace průhybu trubky a následného dělení materiálu na výrobní proces. Simulace proběhly na trubce o délce 3 000 mm. Parametrem v těchto simulacích byla vstupní geometrie trubky. Ta byla rozdělena do tří geometrií A, B a C. Jako geometrie A byla zvolena rovná trubka. Geometrie B byla zvolena trubka s počátečním průhybem 4,5 mm a řezem provedeným rovnoběžně s rovinou stolu pily, viz Obr. 52. Jako geometrie C byla zvolena trubka s počátečním průhybem 4,5 mm a řezem kolmým na osu trubky, viz Obr. 53. Dále všechny simulace proběhly pro tloušťky stěny v rámci tolerance dané normou. Rovněž byl simulován vliv podkosu řezu, který byl zvolen 2 mm.



Obr. 52: Vstupní geometrie B.



Obr. 53: Vstupní geometrie C.

Výsledky získané pomocí simulací jsou uvedeny v Tab. 14, Tab. 15, Tab. 16 a Tab. 17.

Tab. 14: Tvářecí síla [kN] při dosažení průměru 89 mm pro materiálovou šarží B.

	Tloušťka stěny [mm]								
	2,7			3			3,3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Bez	322,5	295	316	356	341	336	427	428	410
Spodní	371	380	335	430	440	405	485	497	458
Rovnoběžné	423	410	416	500	477	428	560	539	481
Mimoběžné	305	280	279	322	338	319	355	382	373

Tab. 15: Tvářecí síla [kN] při dosažení průměru 89 mm pro materiálovou šarží G.

	Tloušťka stěny [mm]								
	2,7			3			3,3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Bez	380	372	398	442	440	431	534	534	490
Spodní	462	493	457	501	548	535	604	633	607
Rovnoběžné	597	561	554	676	645	627	707	717	696
Mimoběžné	354	355	380	417	442	428	476	503	482

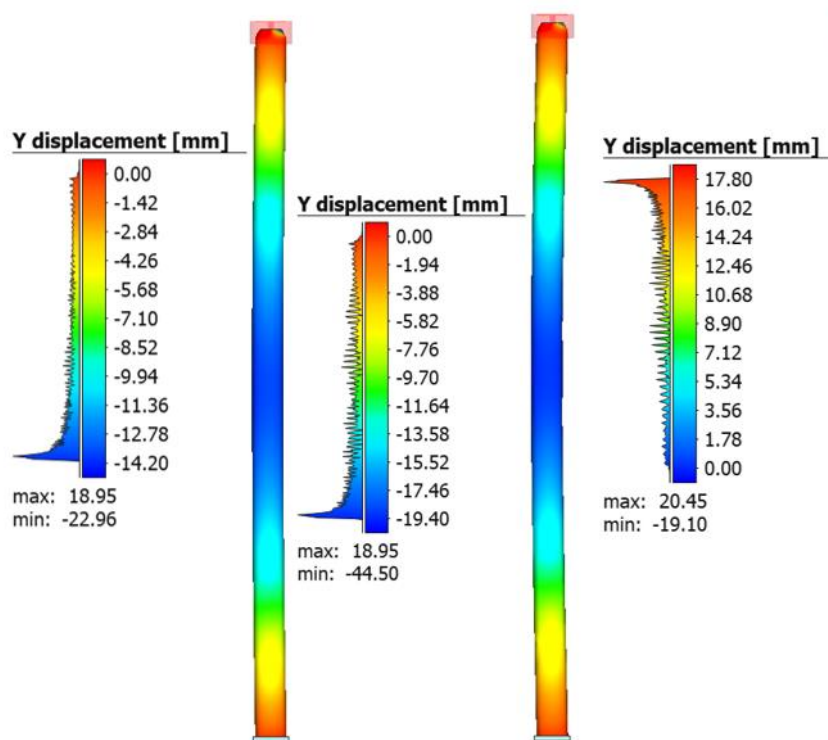
Tab. 16: Průhyb trubky [mm] při dosažení průměru 89 mm pro materiálovou šarží B.

	Tloušťka stěny [mm]								
	2,7			3			3,3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Bez	0	2,9	2,2	0	3	2,55	0	3,15	2,5
Spodní	13,2	17,3	16,75	13,5	19	16,65	14,4	19,4	16,3
Rovnoběžné	9	6	11,14	12	6	7,3	8,1	6,8	5,5
Mimoběžné	13,9	20,9	19,6	14	19,1	15,8	14,75	23	17,9

Tab. 17: Průhyb trubky [mm] při dosažení průměru 89 mm pro materiálou šarží G.

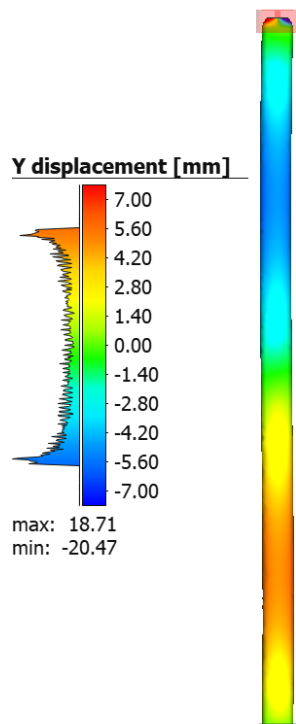
	Tloušťka stěny [mm]								
	2,7			3			3,3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Bez	0	2,9	2,25	0	2,95	2,65	0	2,85	2,65
Spodní	12,9	16,95	16,15	13	17,6	15,9	13,7	18,4	16,5
Rovnoběžné	8,2	7,3	10	8	5,6	7	7,4	7	5,7
Mimoběžné	13,65	19,7	19,6	14,2	19,4	17,8	16,35	22,75	18,4

Z výsledků pro průhyb je jasně patrná silná citlivost tvářecího procesu na kombinaci průhybu trubky a následného dělení materiálu, viz Obr. 54. K hodnotám získaných ze simulací pro geometrie B a C je nutné navíc přičíst původní průhyb trubky 4,5 mm. Rozdíl v konečném průhybu mezi rovnou geometrií A a prohnutými B, C může dosahovat více než 10 mm. Z hlediska průhybu je u všech geometrií nejschůdnější varianta, kdy nastane rovnoběžný podkos řezu.



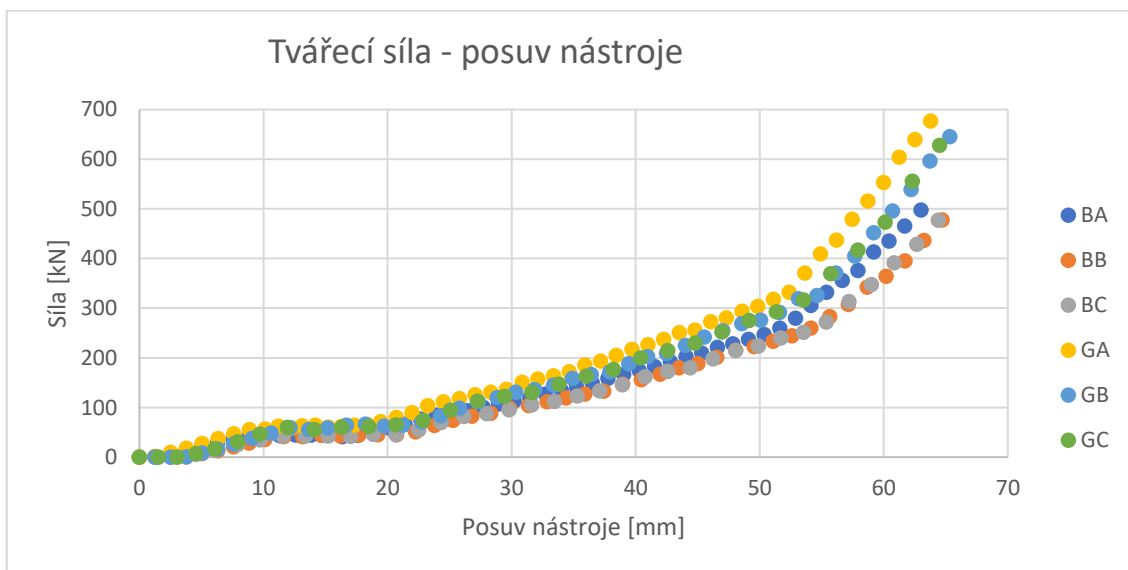
Obr. 54: Výsledný průhyb pro tloušťku stěny 3 mm, šarže G, mimoběžný podkos řezu. Zleva geometrie: A, B, C.

Pokud dojde k rovnoběžnému podkosu řezu, výsledný průhyb je rozložen do obou směrů rovnoměrně na rozdíl od ostatních variant, viz Obr. 55. Válcovitost konečného tvářence je tedy přesnější.



Obr. 55: Příklad průhybu při rovnoběžném podkosu řezu.

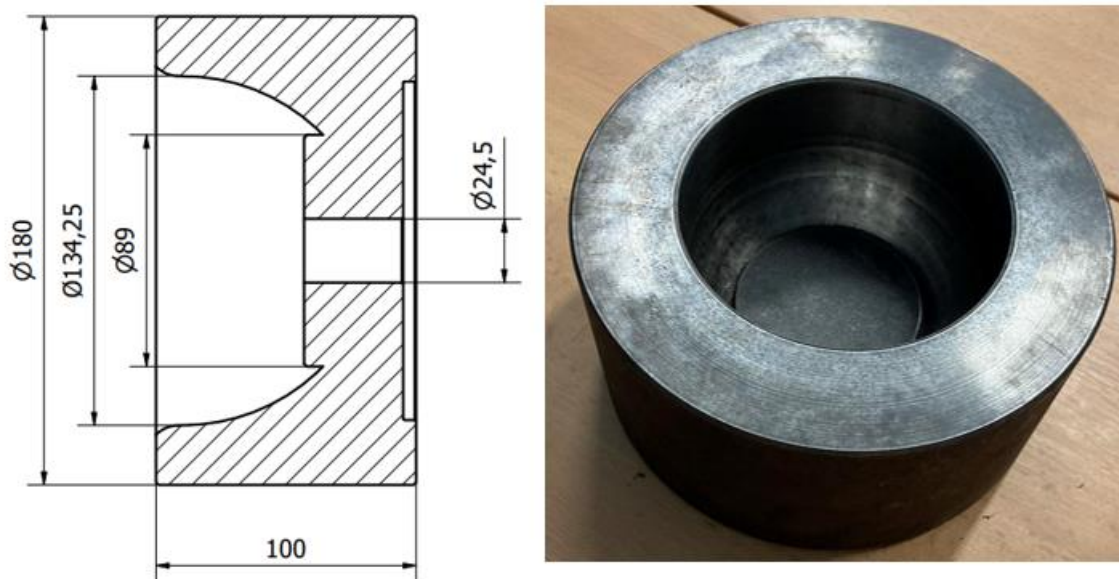
Pro ověření citlivosti síly na geometrii polotovaru byly ze simulačního softwaru získány závislosti síly na posuvu nástroje. Tyto závislosti byly vytvořeny pro tloušťku stěny 3 mm a rovnoběžný podkos řezu. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 56. Je patrné, že trendy pro jednotlivé materiálové šarže jsou shodné a síla při dosažení průměru 89 mm se pohybuje ve velmi úzkém intervalu. Z toho plyne, že výrobní proces z hlediska síly není citlivý na geometrii polotovaru. Výsledky simulací se pouze potvrdila výrazná citlivost na podkosu řezu získanými již provedenými simulacemi.



Obr. 56: Porovnání vstupních geometrií pro shodnou tloušťku stěny.

## 5 Verifikace procesu

Změna geometrie nástroje vložením kroužku pro usnadnění ukončení procesu tváření bude ověřena pomocí experimentu a následného srovnání se simulací. Experiment byl prováděn na firmou vyřazeném nástroji a polotovary firmou dodaných různých šarží trubek. Nejprve byl nástroj vyčištěn a byly zkontrolovány rozměry s výkresovou dokumentací. Dodaný nástroj se využívá pro tváření trubek o průměru 133 mm, která se zužovala na konečný vnitřní průměr 89 mm. Poté byl vytvořen kroužek o vnějším průměru 89 mm, který byl vložen do tvářecího nástroje, viz Obr. 57.



Obr. 57: Nástroj s vloženým kroužkem použitý pro experiment.

Pro experiment byl použitý hydraulický zkušební stroj ZD100 (Obr. 58 vlevo). Do pracovního prostoru byl umístěn tvářecí nástroj. Do nástroje byla vložena tvářená trubka, viz Obr. 58 vpravo, na ni byla umístěna tlačná deska. Před tváření byl nástroj i polotovar namazán olejem. Při tváření bylo použito záznamového zařízení k měření závislosti síly na poloze tlačné desky. Proces byl ukončen v momentě, kdy se tvářecí síla začala zvyšovat velkou rychlostí.





*Obr. 58: Vlevo hydraulický stroj ZD100, vpravo tvářenec v nástroji.*

Po tváření zkušebních vzorků, byla provedena vizuální kontrola. Z kontroly vyšlo najevo, že i přes jejich krátkou délku dochází k okem pozorovatelné deformaci trubky vzpěrem, viz Obr. 59. Po provedení experimentů byly naměřené hodnoty přepsány do programu MS Excel.

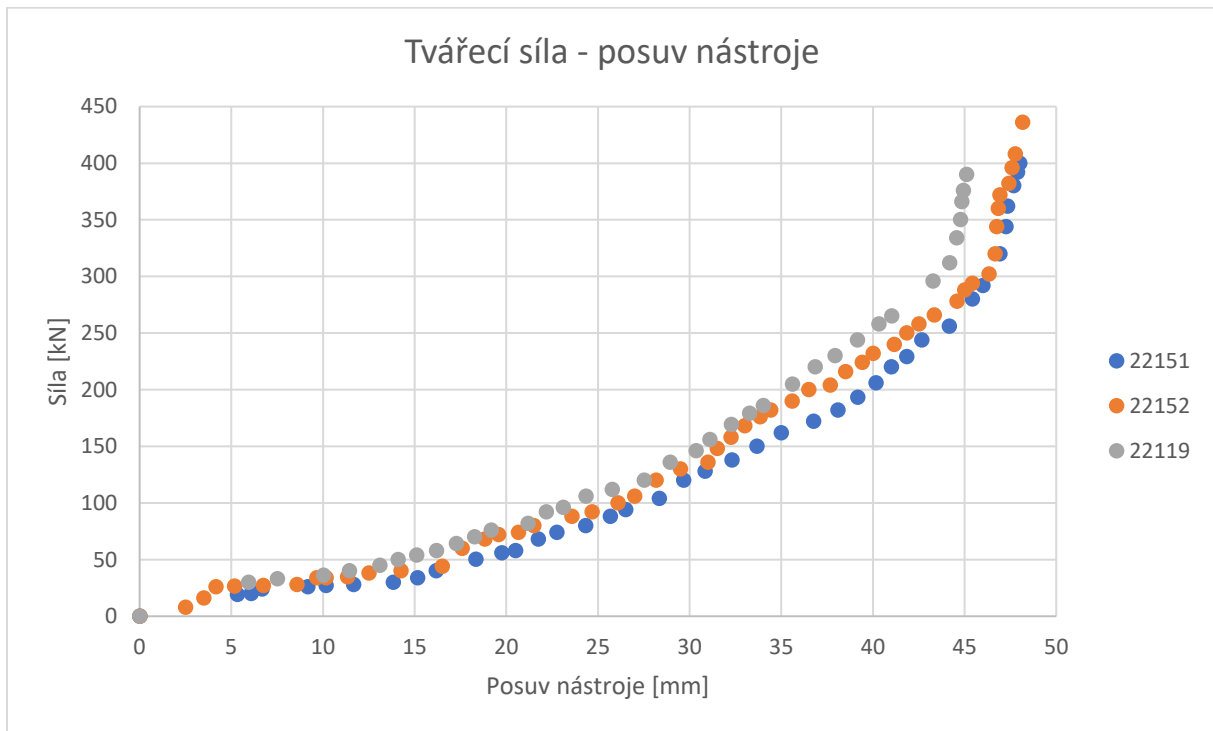


*Obr. 59: Zkoušené vzorky po experimentu.*

Z grafu naměřených hodnot je patrný podobný trend u všech měřených vzorků, viz Obr. 60. Lze tedy naměřené hodnoty považovat za vyhovující a lze je podrobit další analýze a porovnání pomocí simulací. Naměřené hodnoty rovněž podporují myšlenku na změnu ukončení tvářecího procesu pomocí parametru síly. Při této geometrii nástroje v momentě, kdy trubka narazí na kroužek, dojde k výraznému zvýšení rychlosti růstu síly. Toto zvýšení nastává u všech materiálových šarží ve velmi podobné hodnotě (296, 302, 294 kN). Zároveň lze konstatovat, že tato změna síly nastane v širokém rozmezí posuvů (43,3; 46,3; 45,4 mm). Je tedy mnohem

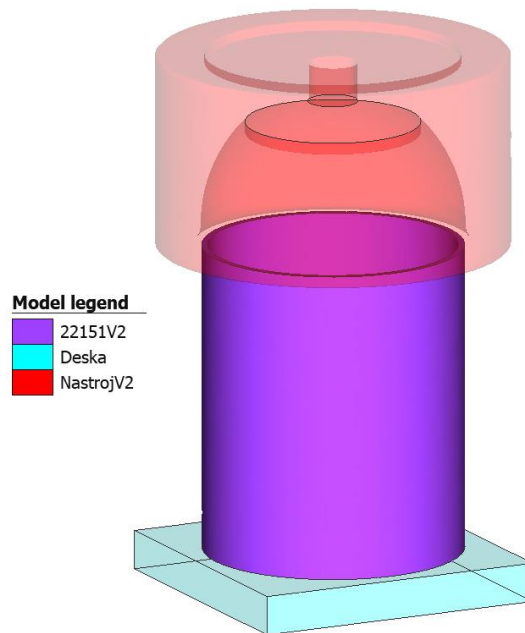


náročnější řídit ukončení tvářecího procesu pomocí posuvu, jehož hodnota je velmi závislá na vstupním materiálu polotovaru a jeho geometrii.



Obr. 60: Porovnání naměřených dat pro analyzované materiálové šarže.

Následně byla provedena simulace v programu Simufact Forming. Jako základní materiálový model byl použit materiál S235, ke kterému byly modifikovány křivky zpevnění vytvořené na základě již provedených tahových zkoušek. Do simulace byl nahrán model nástroje vytvořený dle zaslaných výkresů s přidáním vnitřním kroužkem, viz Obr. 61. Jako stroj byl zvolen hydraulický lis, se zdvihem, který odpovídal naměřeným hodnotám z experimentu. Jako materiál nástrojů byla přiřazena nástrojová ocel DB.20MnCr5. Volba materiálu nástroje nemá na výsledky simulace žádný vliv, jelikož nástroje byly nastavené jako dokonale tuhá tělesa. Teploty nástrojů a polotovarů byly nastaveny na 20 °C, při které tvářecí proces probíhal. Pro nasítování polotovarů byla zvolena Sheetmesh, která je vhodná pro tenkostěnné polotovary.

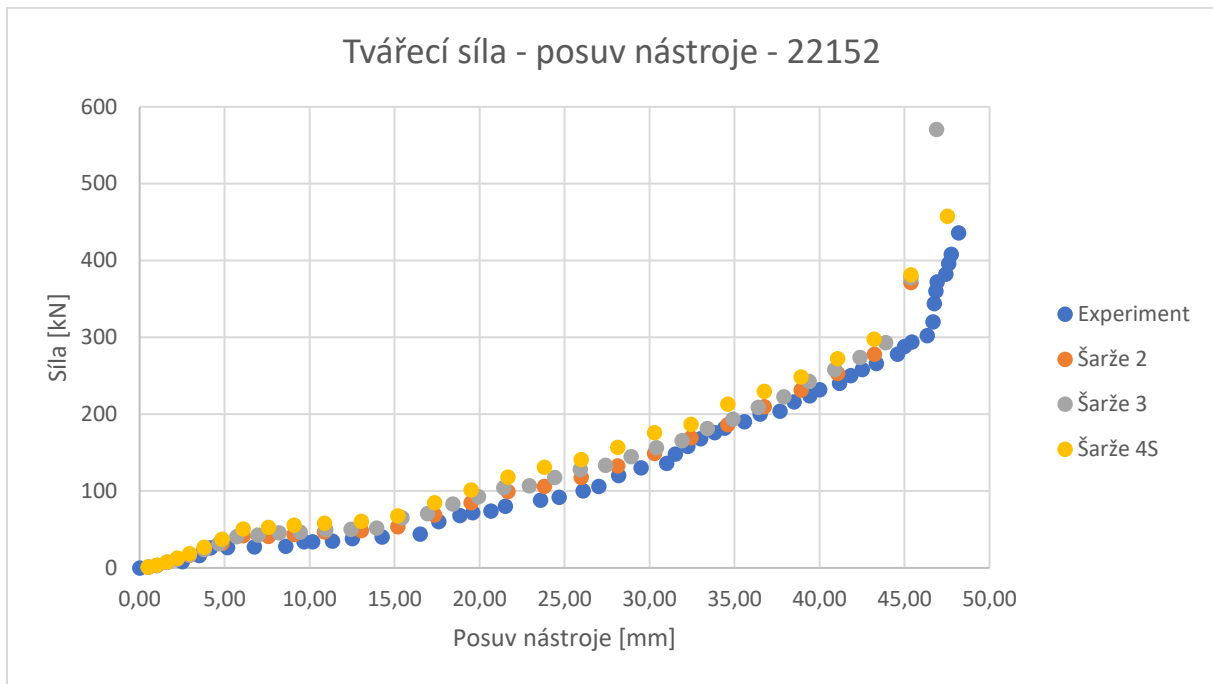


Obr. 61: Ukázka nastavení simulace experimentu.

Hlavním parametrem pro všechny simulace byl materiálový model. Ten se skládal ze tří křivek zpevnění, které byly vytvořeny z různých tahových zkoušek pro danou šarži. Z těchto modelů byl vybrán ten, který měl nejvíce podobný trend naměřenému experimentu. Následně docházelo k změnám tření, které bylo voleno manuálně. Ze simulace byla vyhodnocována závislost síly na posuvu nástroje a deformace polotovaru vzpěrem.

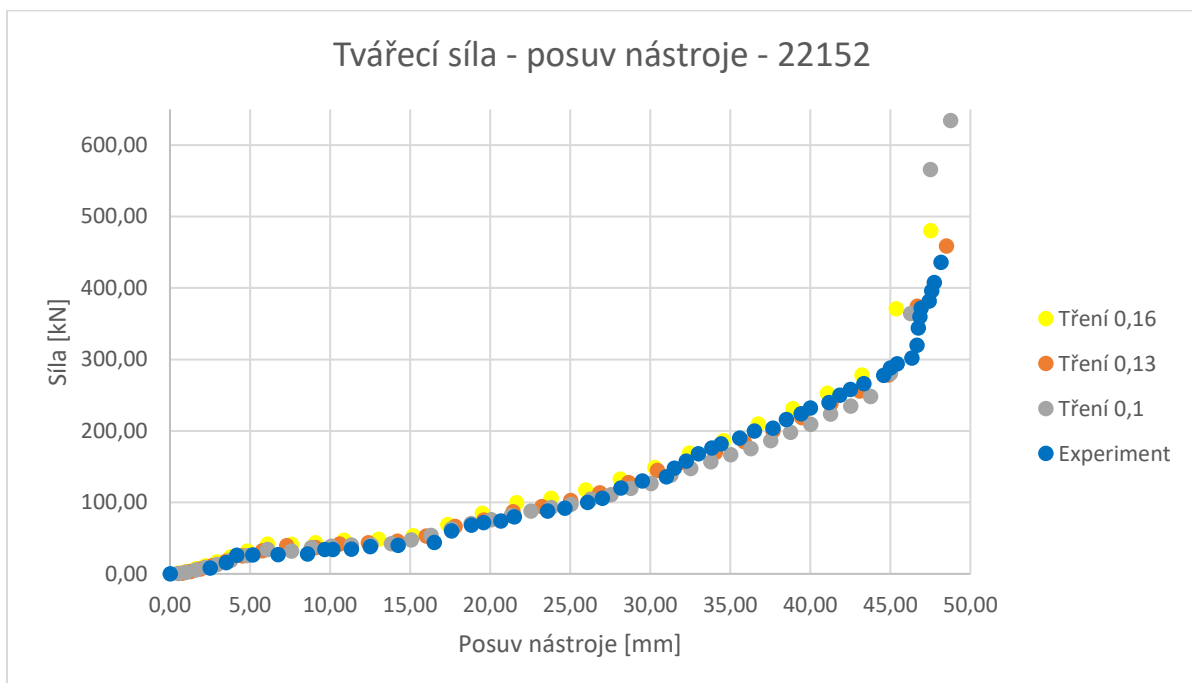
### 5.1 Polotovar šarže 22152

Pro tento materiál byly k dispozici tři naměřené tahové vzorky. Dva vzorky byly z libovolné části trubky. Jeden z oblastí svaru. Nejprve tedy došlo k modifikaci křivek zpevnění v simulačním softwaru a k provedení simulace s totožným třením o hodnotě 0,16. Po provedení simulací byly data ze simulačního softwaru vyexportovány a bylo provedeno porovnání s provedeným experimentem, viz Obr. 62. Z výsledků byl vybrán pro další simulace materiálový model 2, který měl velmi podobný trend jako naměřený experiment.



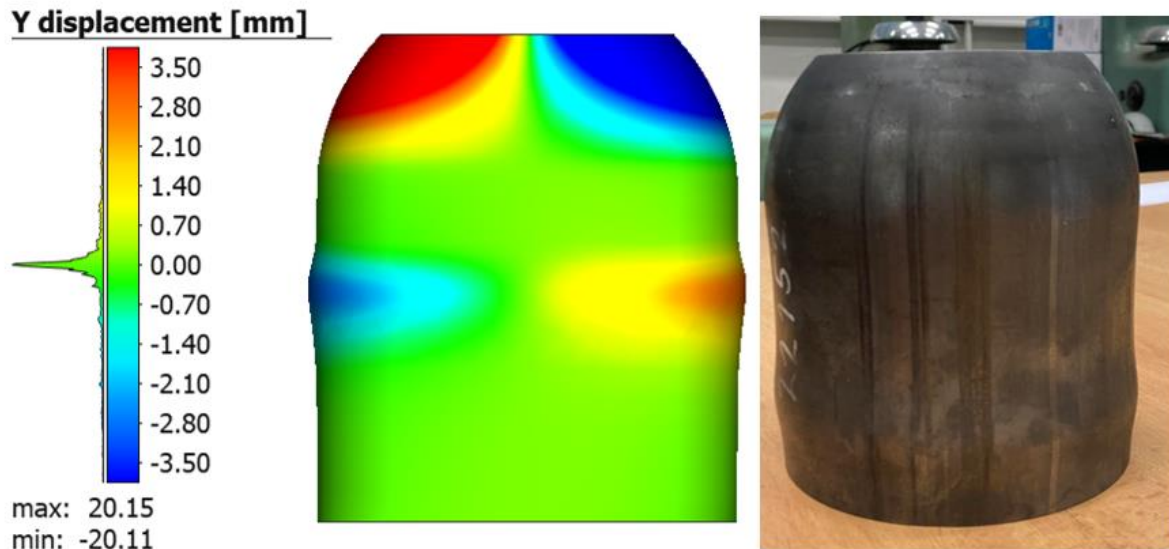
Obr. 62: Volba materiálového modelu pro další analýzu.

Dalším krokem bylo co nejvíce přiblížit simulaci experimentu pomocí změny tření. Byly zvoleny tři hodnoty tření od špatného (0,16), středního (0,13) až po dobré (0,1). Výsledky simulací v porovnání s experimentem jsou na Obr. 63. Z grafu je patrné, že použitím středního tření (0,13) byl naměřený experiment velmi přesně napodoben.



Obr. 63: Porovnání změny tření s naměřeným experimentem.

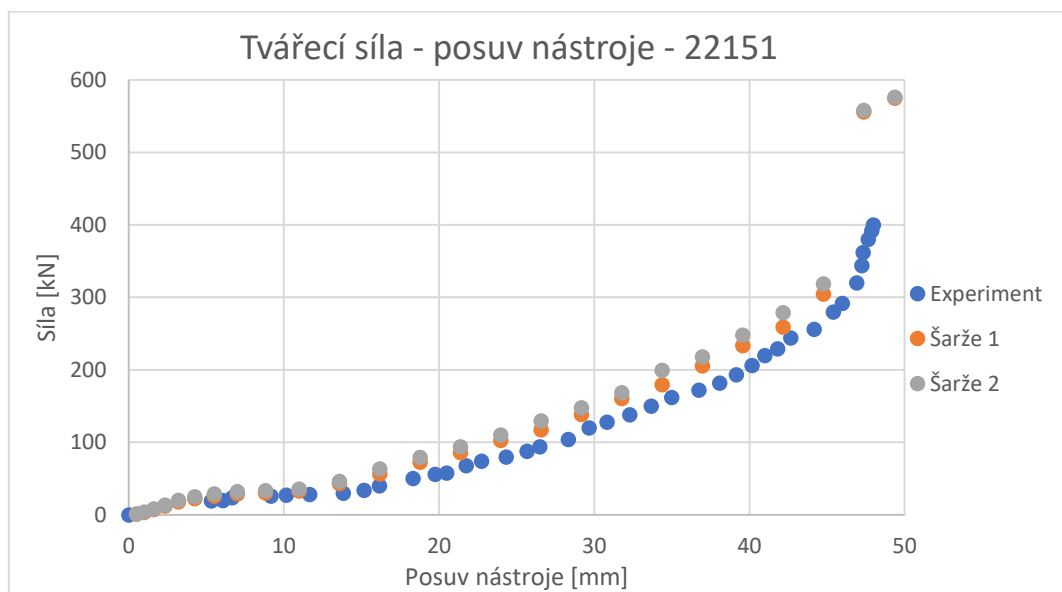
Při vizuální kontrole tvářence z experimentu, byla již okem pozorovatelná deformace materiálu vzpěrem. Při následné kontrole pomocí pravítka, bylo naměřeno vyboulení vzorku o 3,5 mm. Tato deformace je patrná i z numerické simulace, viz Obr. 64. Lze tedy konstatovat, že vytvořenou simulaci lze použít pro další analýzu výrobního procesu.



Obr. 64: Vlevo vyboulení v simulačním softwaru, vpravo reálný experiment.

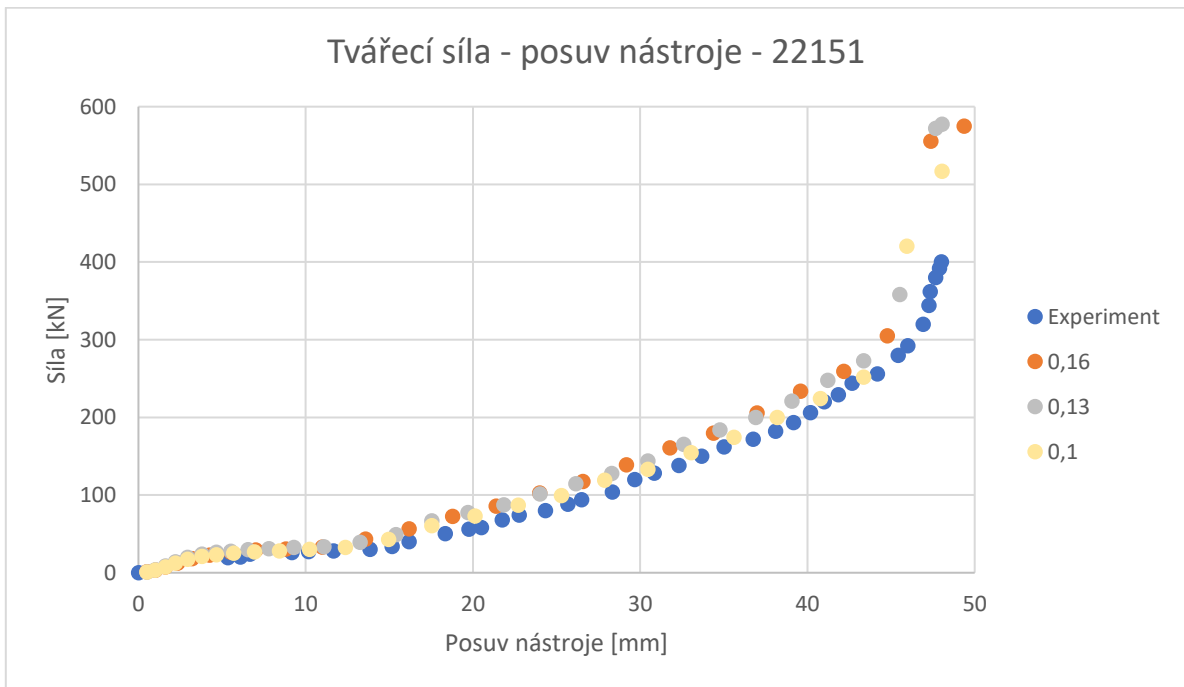
## 5.2 Polotovar šarže 22151

Tento materiál měl k dispozici celkem dva vzorky vytvořené mimo oblast svaru. Simulace pro křivky zpevnění těchto vzorků byla provedena pro tření 0,16. Z Obr. 65 je patrné, že křivka zpevnění vzorku 1 má trend více shodný s experimentem oproti vzorku 2. Z tohoto důvodu další simulace byly provedeny s tímto materiálem.



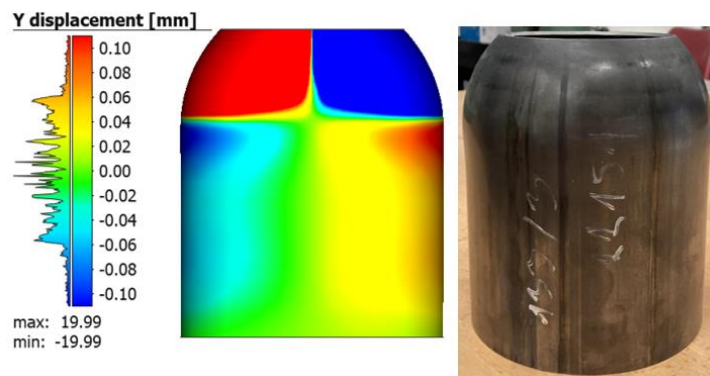
Obr. 65: Porovnání simulací materiálových modelů s experimentem.

Dále byly provedeny simulace změny tření. Hodnoty součinitele byly opět rozděleny do třech kategorií a to špatné (0,16), střední (0,13) a dobré (0,1). Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 66. Z výsledků se nejvíce reálnému experimentu přiblížilo použití koeficientu součinitele tření o hodnotě 0,1. I přes malé odchylky od experimentu u konce tváření lze toto nastavení simulace považovat za uspokojivé a vhodné k dalšímu použití. Výsledná odchylka mohla být způsobena nepřesnou geometrií modelu, nebo by bylo nutné dále doplnit materiálovou kartu o další parametry v simulačním softwaru.



Obr. 66: Volba koeficientu tření pomocí simulací.

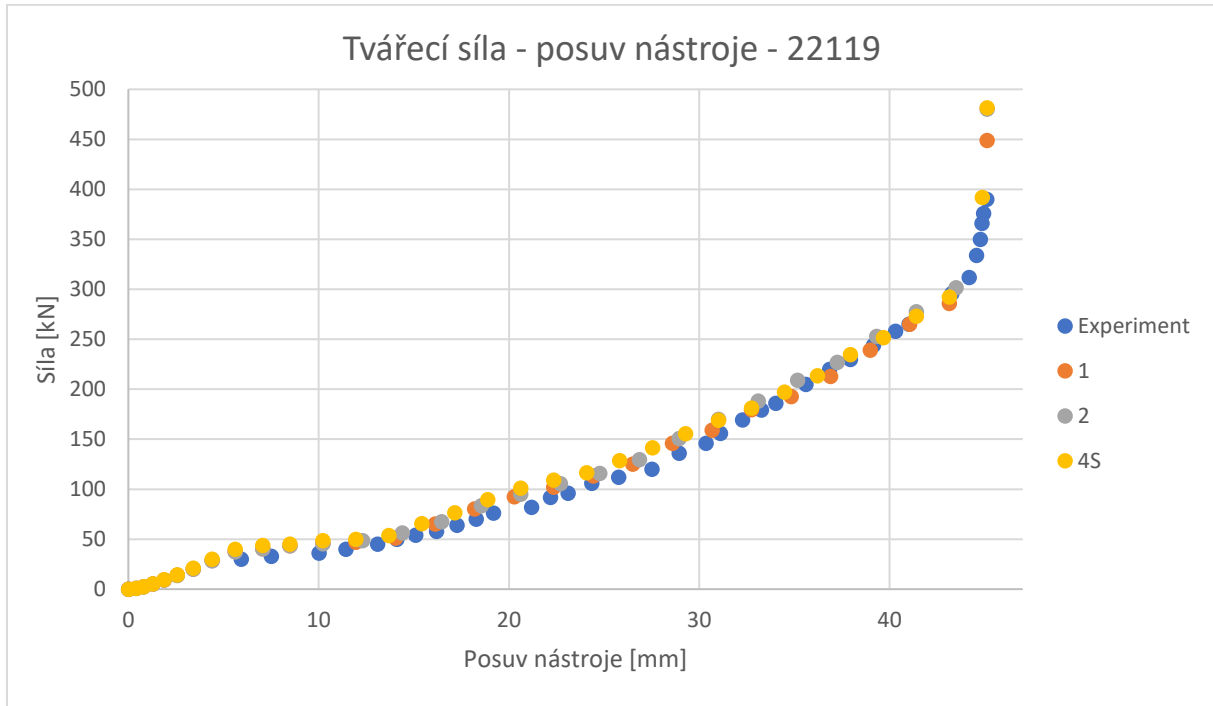
Při vizuální kontrole tvářené trubky nebyla žádná okem pozorovatelná deformace vzpěrem. Deformace polotovaru vzpěrem byla i v simulaci minimální (0,1 mm). Tento výsledek opět potvrzuje shodu s experimentem, viz Obr. 67, a vhodnost tohoto nastavení pro další použití.



Obr. 67: Vlevo vyboulení vzorku v simulaci, vpravo tvářenec po experimentu.

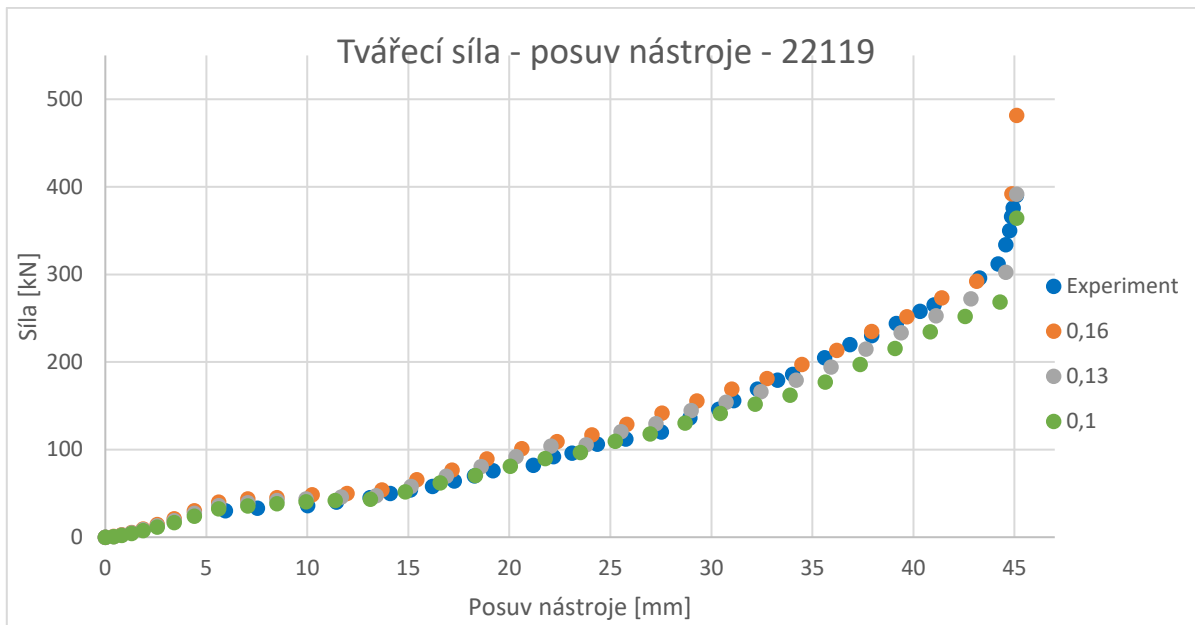
### 5.3 Polotovar šarže 22119

Pro tento materiál byly k dispozici dva naměřené vzorky z libovolné oblasti trubky a jeden z oblasti svaru. Po modifikaci křivek zpevnění těchto vzorků do simulačního softwaru byly provedeny simulace procesu s nastaveným koeficientem tření 0,16. Výsledky jsou uvedeny na Obr. 68. Mezi jednotlivými materiálovými vzorky není velký rozdíl a lze pokračovat s jakýmkoliv. Pro další simulace tření byla zvolena křivka zpevnění vzorku z oblasti svaru (4S).



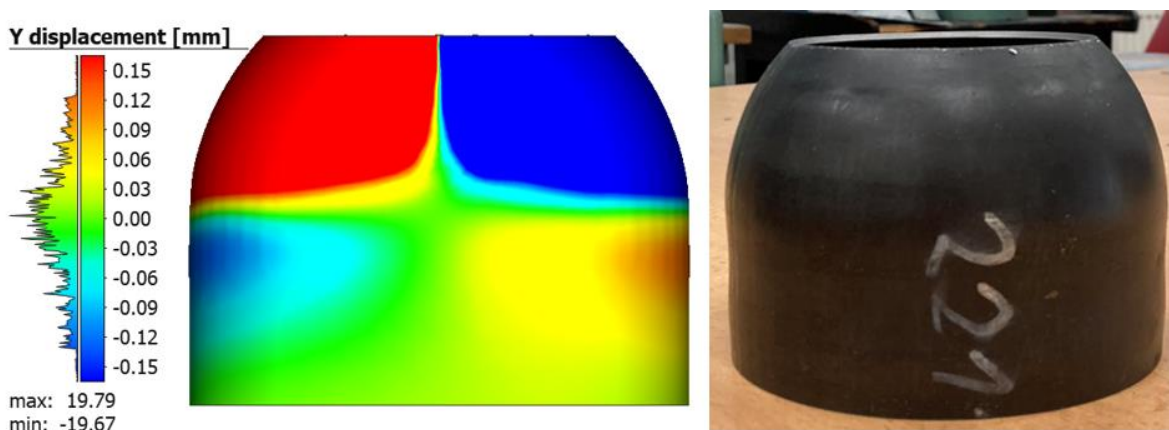
Obr. 68: Výběr křivky zpevnění pro další simulace.

Poté došlo k simulaci procesu při změnách tření. Opět byly zvoleny tři varianty, a to špatné mazání (0,16), střední (0,13) a dobré mazání. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 69. Z výsledků je patrné, že simulace s koeficientem tření 0,16 a 0,13 velmi dobře kopírovali provedený experiment. Jako nejlepší varianta byla zvolena simulace s koeficientem tření 0,13, který na rozdíl od špatného mazání měl konečnou sílu při posuvu nástroje téměř totožnou s experimentem. Tato simulace je taktéž vhodná pro další analýzu tvářecího procesu.



Obr. 69: Porovnání simulovaných variant tření s experimentem.

Při vizuální kontrole tvářence byla zjištěna okem pozorovatelná deformace tvářence vzpěrem. Deformace vzpěrem se objevila i v simulaci, viz Obr. 70.



Obr. 70: Vlevo deformace vzpěrem v simulaci, vpravo deformace vzpěrem v experimentu.

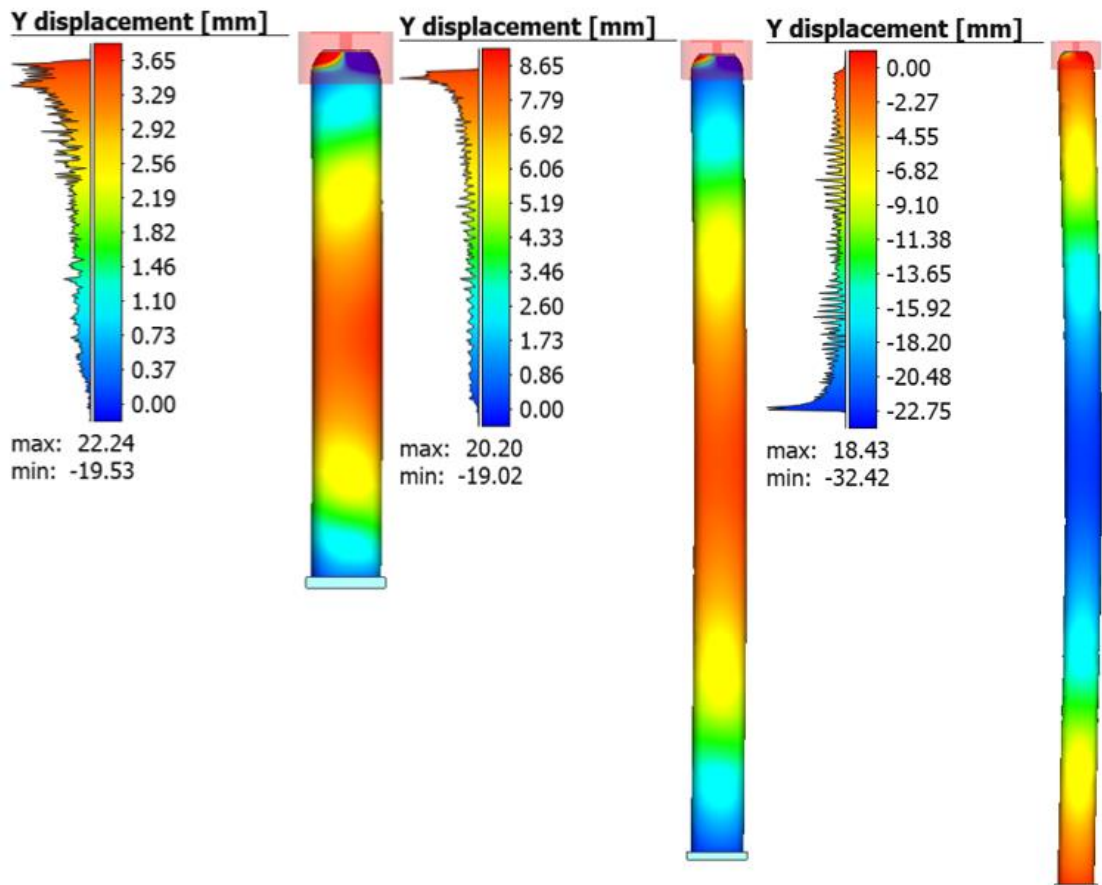
## 6 Návrh opatření

Na základě provedených analýz bylo prokázáno, že rozptyl vlastností vstupního materiálu má značný vliv na tvářecí proces. Z hlediska vstupního materiálu je nutné sledovat jeho vlastnosti. Z výsledků v Tab. 8 plyne, že dvě šarže materiálu se mohou mít rozptyl tvářecí síly při dosažení požadovaného průměru více než 150 kN. Je tedy vhodné provádět kontrolu dodaného materiálu a porovnat získané hodnoty s definicí danou normou. Dále je žádoucí materiál seřadit do skupin s podobnými mechanickými vlastnostmi, aby rozptyl vlastností polotovarů během vyrábění sady nebyl tak značný.

Dále byl analyzován vliv vstupní geometrie trubky v rámci hodnot daných normou. Simulace byly provedeny pro tolerance tloušťky stěny a dovoleného průhybu trubky. Tloušťka stěny má výrazný vliv na velikost tvářecí síly. Z Obr. 51 plyne, že rozptyl tvářecí síly mezi tím, pokud se polotovar pohybuje na dolní hranici tolerance nebo na horní může dosáhnout téměř 200 kN. Je tedy vhodné provést před výrobou kontrolu tloušťky stěny a roztrždit polotovary do podobných rozměrových skupin. Z hlediska deformace polotovaru průhybem nebyl zjištěn výrazný vliv tloušťky stěny trubky. Tab. 14 a Tab. 15 ukazuje, že průhyb vstupní geometrie nemá zásadní vliv na velikost tvářecí síly. Naopak se prokázal významný vliv průhybu na výslednou deformaci trubky průhybem, viz Tab. 16 a Tab. 17, kde lze pozorovat, že vlivem samotného průhybu polotovaru 4,5 mm dojde po tváření k dalšímu průhybu o více než 3 mm.

Simulacemi byl dále ověřen vliv podkosu řezu při dělení materiálu. Nejprve byl analyzován vliv podkosu na rovné trubce, kde byl zjištěn výrazný vliv jeho velikosti a polohy, jak na velikost tvářecí síly, tak i na deformaci trubky průhybem, viz Tab. 8 a Tab. 9. Pro další výzkum byla zvolena horší varianta s větším podkosem řezu. Bylo zjištěno, že s rostoucí délkou trubky, roste i vliv podkosu řezu na výslednou deformaci trubky průhybem, viz Obr. 71. Poté byl analyzován vliv kombinace dělení materiálu, vstupního průhybu polotovaru a podkosu řezu. Jako nejhorší varianta, jak z hlediska síly, tak i z hlediska deformace polotovaru průhybem byla stanovena varianta kdy je vstupní geometrie prohnutá s podkosem řezu v jakékoliv poloze. Touto kombinací byly zjištěny jak největší tvářecí síly pro oba analyzované materiály (viz Tab. 14 a Tab. 15), tak i největší deformace průhybem, viz Obr. 71, která po započítání vstupního průhybu 4,5 mm dosahovala deformace více než 20 mm (viz Tab. 16 a Tab. 17).





Obr. 71: Porovnání nejhorších variant deformace průhybem pro materiál G pro délky: zleva 1 000 mm, 2 000 mm a 3 000 mm.

Z výše zmíněného plyne, nutnost kontroly hodnoty podkosu před zahájením tvářecí operace. Dále je nutné eliminovat vliv průhybu vstupní geometrie, vyrovnáváním tvářecí dráhy u každého polotovaru před zahájením procesu. Pro eliminaci průhybu vlivem deformace šroubů na prizmatických kostkách navrhuji nahradit plynové pružiny hydraulickými, které nevyvolají nežádoucí dodatečné prohnutí.

Dále byla snaha zjistit, zda je možné řídit ukončení tvářecího procesu silou, namísto nynějšího ukončení pomocí posuvu nástroje. Z tohoto důvodu, byla vytvořena nová geometrie nástroje s vloženým vnitřním kroužkem, jehož průměr odpovídá požadovanému průměru po tváření, viz Obr. 57. Výsledky ukázaly, že průběh sil pro simulované varianty je velmi podobný, viz Obr. 56, a výsledné hodnoty síly mají menší rozptyl než u hodnot posuvu nástroje. Pokud dojde k výše zmíněnému roztržení materiálu dle mechanických vlastností, vstupní geometrie a vyrovnání tvářecí dráhy každého polotovaru lze velmi přesně řídit celý proces pomocí průběhu síly.

Pro ověření změny geometrie nástroje, byly provedeny experimenty na hydraulickém lisu. Poté došlo k vytvoření simulací, zda jsme schopni experimenty napodobit. Při porovnání experimentů se simulacemi byly získány velmi uspokojivé výsledky, kdy se ve všech případech úspěšně povedlo experimenty věrně napodobit simulacemi, viz Obr. 63, Obr. 66 a Obr. 69. Provedené simulace lze použít pro další popis a analýzu výrobního procesu.

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo provést analýzu procesu tváření konců trubek, které se využívají pro výrobu sloupů veřejného osvětlení. Hlavním úkolem bylo provést analýzu tvářecího procesu, provést rozbor možných problémů, které tvářecí proces mohou ovlivňovat a zjistit jejich vliv na proces.

Nejprve byla provedena rešeršní část, kde je provedeno seznámení s principy tváření, pojmem tvářitelnosti, jaké faktory ji ovlivňují a ukazateli, pomocí kterých ji lze hodnotit. Dále jsem se seznámil s principy fungování numerické simulace, což bylo klíčové pro další pokračování práce.

Poté jsem se věnoval popisu problematiky vstupního materiálu a výrobního procesu. Toto zmapování bylo provedeno zhodnocením norem používaného materiálu, byl zjištěn dovolený rozptyl mechanických vlastností, tolerance tloušťky stěny, ovality a průhybu vstupního materiálu. Byla provedena rešerše možných způsobů úpravy konců trubky, ze které vyšlo najevo, že z hlediska nároků na požadovaný objem výroby a produktivitu práce se jako nejlepší ukázala firmou používaná technologie zužování trubek. Dále byl proveden popis a rozbor současného výrobního systému, ze kterého byly vytipovány možné problémy, které mohou nastat. Jedná se o rozptyl mechanických vlastností vstupního materiálu, forma vstupního materiálu z hlediska geometrie, dělení materiálu, polohování polotovaru v tvářecím procesu a jeho ukončení. Tyto údaje byly použity pro následné nastavení základních podmínek numerické simulace.

Numerické simulace byly provedeny pro ověření citlivosti procesu na výše zmíněné parametry. Nejprve byl nasimulován vliv velikosti podkosu řezu a jeho umístění na trubce o délce 1 000 mm. Poté byl simulován vliv tloušťky stěny, jejíž mezní hodnoty jsou dány normou, v kombinaci s podkosem řezu na trubce o délce 2 000 mm. Nakonec byla provedena simulace kombinace průhybu trubky s dělením materiálu, tloušťky stěny a umístění podkosu řezu na trubce o délce 3 000 mm. Z provedených simulací byly získány hodnoty tvářecí síly a hodnoty průhybu trubky při dosažení požadovaného průměru. Dále došlo k porovnání jednotlivých variant a analyzovaných materiálových jakostí. Byl zjištěn výrazný vliv těchto parametrů na velikost tvářecí síly i na deformaci trubky průhybem.

V další fázi byl proveden experiment na dodaných trubkách na hydraulickém stroji ZD 100. Experiment byl prováděn za cílem změny řízení tvářecího procesu pomocí síly změnou

geometrie tvářecího nástroje. Bylo provedeno zužování trubky, při kterém byl zaznamenáván průběh tvářecí síly na posuvu nástroje. Experimentem byl potvrzen shodný trend síly i její hodnoty při dosažení požadovaného průměru. Následně došlo k porovnání experimentu se simulací. Byly vytvořeny simulace, kde nejprve došlo k hledání vhodné křivky zpevnění. Poté byl jako parametr simulací zvolen součinitel tření. Porovnání simulací s reálnými experimenty bylo velmi uspokojivé, podařilo se určit hodnotu tření mezi nástrojem a polotovarem, hodnoty posuvu nástroje a tvářecí síly byly velmi podobné. Deformace vzpěrem vzniklá při experimentu se potvrdila i v následných simulacích.

V závěrečné části práce jsem ze získaných výsledků navrhl několik doporučení. Je vhodné materiál rozdělit dle mechanických i geometrických vlastností do podobných skupin. Pro eliminace průhybu je důležité provádět vyrovnání tvářecí dráhy dle vstupní geometrie každého polotovaru. Dále je vhodné změnit způsob přidržení z aktuálních plynových pružin na hydraulické pružiny, čímž dojde k eliminaci dodatečného prohnutí. Těmito doporučeními lze získat vhodnější tvářecí proces jak z hlediska tvářecí síly, tak i z hlediska co největší eliminace deformace trubky průhybem. Z provedených experimentů lze tvrdit, že po změně geometrie nástroje lze tvářecí proces velmi přesně řídit pomocí tvářecí síly. Tyto experimenty se následně podařilo přenést do virtuálního prostředí pomocí simulací a lze pomocí nich provést další výzkum.

## Bibliografie

- [1] Ocelové stožáry a zárubně. In: *Kooperativa VOD* [online]. Uhlířské Janovice [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <http://www.kooperativa-vod.cz/>
- [2] HRUBÝ, Jiří, Stanislav RUSZ a Radek ČADA. *Strojírenské tváření*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1218-5.
- [3] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6.
- [4] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Fyzikální metalurgie*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-02935-0.
- [5] NIELSEN, Chris V. a Paulo A.F. MARTINS. *Metal forming: Formability, simulation, and tool design*. 1.vyd. London: Elsevier, 2021. ISBN 978-0-323-85255-5.
- [6] Plastic Deformation and Fracture. In: *The Hand Book on Mechanical Maintenance* [online]. Bombaj, 2009 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://practicalmaintenance.net/?p=1135>
- [7] *Metal forming handbook*. 1.vyd. Göppingen: Springer, 1998. ISBN 3-540-61185-1.
- [8] Movement Dislocations. In: *Université Concordia* [online]. Montreal, 2019 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [http://users.encs.concordia.ca/~mmedraj/mech321/lecture\\_4\\_dislocations.pdf](http://users.encs.concordia.ca/~mmedraj/mech321/lecture_4_dislocations.pdf)
- [9] LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. In: *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm#015](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#015)
- [10] Technologie tváření. In: *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Plzeň [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>
- [11] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-877-1.

- [12] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvařitelnost kovových materiálů: verze III* [online]. In: . [cit. 2023-02-13].
- [13] BANABIC, D. *Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits* [online]. 1.vyd. Berlin: Springer, 2000 [cit. 2023-02-13]. ISBN 978-3-662-04013-3.
- [14] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Metalurgická tvařitelnost* [online]. In: . [cit. 2023-02-13].
- [15] SOBOTOVÁ, Jana, Zdeňka JENÍKOVÁ, Jakub HORNÍK a Elena ČIŽMÁROVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2022. ISBN 978-80-01-06975-2.
- [16] ČSN EN ISO 6892-1 (420310): *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2021.
- [17] TATÍČEK, František. *Přednášky - Teorie a metodika tváření* [online]. In: . Praha: ČVUT, 2022 [cit. 2023-07-18].
- [18] *Mechanické zkoušky* [online]. In: . sssebrno [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: [https://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova\\_zkouska.pdf](https://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf)
- [19] TATÍČEK, František. *Vliv materiálu na kvalitu výlisku* [online]. In: . [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku>
- [20] KOTOUČ, Jiří. *Teorie a metodika tváření: návody ke cvičení*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00842-8.
- [21] ČSN EN ISO 10113. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie*. 11/2020.
- [22] ČSN EN ISO 10275 (420436). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem*. 06/2021.
- [23] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-635-3.

- [24] Zkouška hlubokotažnosti. In: *Elektronická učebnice ELUC* [online]. Olomouc [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1568>
- [25] Zkoušky trubek. In: *Výukové materiály SOU stavební Plzeň* [online]. Plzeň [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <http://iucebna.kakov.cz/MTR1/MTR-I1-64h.pdf>
- [26] KEDROŇ, Jan. *Matematická simulace objemového tváření v programu Simufact.forming 9.0: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. ISBN 978-80-248-2720-9.
- [27] Modelování a simulace: Prezentace a přednášky. In: *Technická univerzita Liberec* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec, 2021 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/folder/view.php?id=309778>
- [28] Podélně svařovaná trubka S235JRH: podélně svařované ocelové trubky EN 10219-1 / EN 10219-2, 1.0039. In: *THESTEEL.COM* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.thesteel.com/cz/Podelne-svarovana-trubka-S235JRH-T211120001>
- [29] S235JRH / 1.0039: Chemical composition, equivalent, properties. In: *SteelNumber* [online]. 2011 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=645](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=645)
- [30] *ČSN EN 10219-1: Svařované duté profily z konstrukčních nelegovaných a jemnozrnných ocelí, tvářené za studena - Část 1: Technické dodací podmínky*. 2006.
- [31] *ČSN EN 10219-2: Svařované duté profily tvářené za studena z konstrukčních ocelí - Část 2: Rozměry, mezní úchylky a geometrické charakteristiky průřezu*. 2020.
- [32] EN 10219 S235JRH Carbon Steel Welded Pipe. In: *AESTEIRON STEELS LLP* [online]. Mumbai [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.aesteiron.com/en-10219-s235jrh-pipe.html>
- [33] GUO, Yongqiang. New technique of precision necking for long tubes with variable wall thickness. *Front. Mech. Eng.* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/s11465-019-0565-7](https://doi.org/10.1007/s11465-019-0565-7)

- [34] LI, Xiaodong. Effect of temperature and friction on necking and thickening for 5A02 aluminum alloy thin-walled tube in differential temperature extrusion. *Int J Adv Manuf Technol* [online]. (108), 683–694 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-020-05465-w>
- [35] LIU, Gui Hua. *Influence of Heating Models on Necking Deformation during Tube Extrusion Process* [online]. 189-193, 1778-1781 [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.1778>
- [36] Extrusion Process : Working, Types, Application, Advantages and Disadvantages. In: *Mech4study: Mechanical Engineering Blog* [online]. [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/production-engineering/extrusion-process-working-types-application-advantages-and-disadvantages.html/>
- [37] Finite element study of stress and strain state during hot tube necking process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2013, 551-564 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: doi:[10.1177/0954405413476495](https://doi.org/10.1177/0954405413476495)
- [38] An experimental and analytical study on dome forming of seamless Al tube by spinning process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2006, **173**(2), 145-150 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.011>
- [39] Metal Spinning Advantages And Disadvantages. In: *EXCELL: Metal Spinning LTD* [online]. Portsmouth, 2018 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <https://www.excellmetalspinning.com/metal-spinning-advantages-and-disadvantages/>
- [40] SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010-2011. ISBN 978-80-214-4220-7.
- [41] MetalMorphosis : Electromagnetic pulse technology for novel hybrid metal-composite components in the automotive industry. In: *Belgian Welding Institute npo* [online]. Gent: Belgian Welding Institute npo, 2017 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <https://bil->



ibs.be/en/project/metalmorphosis-electromagnetic-pulse-technology-novel-hybrid-metal-composite-components

- [42] MARCINIAK, Z., J.L DUNCAN a S.J HU. *Mechanics of sheet metal forming*. Oxford: Butterwort-Heinemann, 2002. ISBN isbn978-0-7506-5300-8.
- [43] ANDREW, William. *Micromanufacturing Engineering and Technology* [online]. 2.vyd. Elsevier, 2015 [cit. 2023-07-18]. ISBN 978-0-323-31149-6. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323311496/micromanufacturing-engineering-and-technology>
- [44] Tube and sheet hydroformed steel components for autobody application. *Rev. Met. Paris* [online]. 2002, **98**(10), 927-935 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1051/metal:2001139](https://doi.org/10.1051/metal:2001139)
- [45] LANDA, Lukáš. *Ověření tváritelnosti materiálu pro výrobu sloupů veřejného osvětlení* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-07-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103893>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie.

## 8 Seznam obrázků

OBR. 1: PŘÍKLAD ZÚŽENÍ NA SLOUPECH VEŘEJNÉHO OSVĚTLENÍ. [1] .....	10
OBR. 2: SCHÉMA PRUŽNÉ A PLASTICKÉ DEFORMACE. [6] .....	12
OBR. 3: MECHANISMUS PLASTICKÉ DEFORMACE SKLUZEM PŮSOBENÍM SMYKOVÝM NAPĚTÍM. [8] .....	13
OBR. 4: PRINCIP PLASTICKÉ DEFORMACE DVOJČATĚNÍM. [8] .....	13
OBR. 5: DEFORMAČNÍ ZPEVNĚNÍ MATERIÁLU A ORIENTACE ZRN PŘI TVÁŘENÍ ZA STUDENA. [9] .....	14
OBR. 6: DEVĚT SCHÉMÁT NAPJATOSTI, KTERÉ MOHOU PŮSOBIT V TĚLESE. [9] .....	15
OBR. 7: TŘI STAVY DEFORMACE, KTERÉ MOHOU V TĚLESE NASTAT. [9] .....	16
OBR. 8: VLIV TEPLoty NA TVÁŘITELNOST OCELI. [10] .....	18
OBR. 9: KOLMOGOROVŮV DIAGRAM VLIVU STAVU NAPJATOSTI NA TVÁŘITELNOSTI. [14] .....	19
OBR. 10: VLEVO VÝRAZNÁ MEZ KLUZU, VPRAVO NEVÝRAZNÁ MEZ KLUZU. [17] .....	20
OBR. 11: VYHODNOCENÍ ZÁSOBY PLASTICITY Z TAHOVÉ ZKOUŠKY. [20] .....	22
OBR. 12: ODEBÍRÁNÍ VZORKŮ PRO ZKOUŠKU TAHEM, S OHLEDEM KE SMĚRU VÁLCOVÁNÍ. [17] .....	22
OBR. 13: DIAGRAM TVÁŘITELNOSTI PODLE LILETA. [17] .....	24
OBR. 14: PRINCIP A VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY HLOUBENÍM. [24] .....	25
OBR. 15: PRINCIP ZKOUŠKY TRUBEK OHYBEM. [25] .....	25
OBR. 16: ZPŮSOBY HODNOCENÍ ZKOUŠKY SMÁČKNUTÍM TRUBEK. [25] .....	26
OBR. 17: PRINCIP A POUŽÍVANÉ TVARY VZORKU PŘI KLÍNOVÉ TAHOVÉ ZKOUŠCE. [12] .....	26
OBR. 18: PRINCIP ZKOUŠKY ROZŠIŘOVÁNÍM TRUBEK. [25] .....	27
OBR. 19: PRŮBĚH NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ. [27] .....	28
OBR. 20: KONCEPT METODY KONEČNÝCH PRVKŮ. [27] .....	28
OBR. 21: ROZDÍL MEZI MKP A MKO. [27] .....	29
OBR. 22: TYPY STOŽÁRŮ: A) BEZPATICOVÉ, B) PATICOVÝ, C) K PŘECHODŮM, D) DEKORATIVNÍ. [1] .....	30
OBR. 23: SLOŽENÍ DVOU TRUBEK DO SEBE. ....	31
OBR. 24: OVALITA TRUBKY. ....	33
OBR. 25: PRŮHYB TRUBKY V DÉLCE. ....	33
OBR. 26: PRINCIP TECHNOLOGIE ZUŽOVÁNÍ. [33] .....	34
OBR. 27: ZÓNY PŘI PROCESU ZUŽOVÁNÍ. [33] .....	34
OBR. 28: PRINCIP ZÚŽENÍ TRUBEK POMOCÍ KOVOTLAČITELSTVÍ. [37] .....	35
OBR. 29: VARIANTY POLOHY CÍVKY VŮČI TVÁŘENÉMU POLOTOVARU. [41] .....	36
OBR. 30: POROVNÁNÍ KLASICKÉHO POSTUPU LISOVÁNÍ S POSTUPEM HYDROFORMINGU. [44] .....	37
OBR. 31: TVAROVÝ NÁSTROJ VE STROJI. ....	38
OBR. 32: POLOHOVÁNÍ POLOTOVARU POMOCÍ PRIZMAT. ....	38
OBR. 33: KONEC POLOTOVARU PODEPŘENÝ OPĚRNOU DESKOU .....	38
OBR. 34: VYUŽITÍ PRODLUŽOVACÍCH PŘÍPRAVKŮ PRO KOMPENZACI DÉLKY .....	39
OBR. 35: ROZMÍSTĚNÍ PÍSTŮ PŘI PŘÍPRAVĚ PROCESU .....	39

OBR. 36: PŘITLAČENÍ POLOTOVARU POMOCÍ PÍSTŮ.....	40
OBR. 37: KŘIVKA ZPEVNĚNÍ MATERIÁLOVÉ JAKOSTI B.....	41
OBR. 38: KŘIVKA ZPEVNĚNÍ MATERIÁLOVÉ JAKOSTI G.....	41
OBR. 39: VARIANTA BEZ PODKOSU.....	42
OBR. 40: VARIANTA SE SPODNÍM PODKOSEM.....	42
OBR. 41: ROVNOBĚŽNÝ PODKOS.....	43
OBR. 42: MIMOBĚŽNÝ PODKOS.....	43
OBR. 43: VYROVNÁNÍ POLOTOVARU PŘI ŘEZU VZHLEDEM K PROHNUTÉ OSE POLOTOVARU.....	43
OBR. 44: VYROVNÁNÍ POLOTOVARU VZHLEDEM K ROVINĚ STOLU.....	44
OBR. 45: DEFORMACE POLOTOVARU VLIVEM JEJÍHO STLAČENÍ POMOCÍ PÍSTŮ.....	44
OBR. 46: NASTAVENÍ ÚLOHY V SIMULAČNÍM SOFTWARE.....	46
OBR. 47: VLEVO PRŮHYB TVÁŘENCE S PODKOSEM 1 MM, VPRAVO PRŮHYB TVÁŘENCE S PODKOSEM 2 MM.....	48
OBR. 48: VLIV PODKOSU NA PRŮHYB TVÁŘENCE.....	48
OBR. 49: NAHOŘE STYK JEDNÉ STRANY TRUBKY S NÁSTROJEM, DOLE PROCES PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM.....	49
OBR. 50: POROVNÁNÍ MATERIÁLOVÉ ŠARŽE B A G PRO DÉLKU 1 000 MM.....	49
OBR. 51: POROVNÁNÍ ANALYZOVANÝCH TLOUŠŤEK STĚN.....	51
OBR. 52: VSTUPNÍ GEOMETRIE B.....	52
OBR. 53: VSTUPNÍ GEOMETRIE C.....	52
OBR. 54: VÝSLEDNÝ PRŮHYB PRO TLOUŠŤKU STĚNY 3 MM, ŠARŽE G, MIMOBĚŽNÝ PODKOS ŘEZU. ZLEVA GEOMETRIE: A, B, C.....	53
OBR. 55: PŘÍKLAD PRŮHYBU PŘI ROVNOBĚŽNÉM PODKOSE ŘEZU.....	54
OBR. 56: POROVNÁNÍ VSTUPNÍCH GEOMETRIÍ PRO SHODNOU TLOUŠŤKU STĚNY.....	54
OBR. 57: NÁSTROJ S VLOŽENÝM KROUŽKEM POUŽITÝ PRO EXPERIMENT.....	55
OBR. 58: VLEVO HYDRAULICKÝ STROJ ZD100, VPRAVO TVÁŘENEC V NÁSTROJI.....	56
OBR. 59: ZKOUŠENÉ VZORKY PO EXPERIMENTU.....	56
OBR. 60: POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT PRO ANALYZOVANÉ MATERIÁLOVÉ ŠARŽE.....	57
OBR. 61: UKÁZKA NASTAVENÍ SIMULACE EXPERIMENTU.....	58
OBR. 62: VOLBA MATERIÁLOVÉHO MODELU PRO DALŠÍ ANALÝZU.....	59
OBR. 63: POROVNÁNÍ ZMĚNY TŘENÍ S NAMĚŘENÝM EXPERIMENTEM.....	59
OBR. 64: VLEVO VYBOULENÍ V SIMULAČNÍM SOFTWARE, VPRAVO REÁLNÝ EXPERIMENT.....	60
OBR. 65: POROVNÁNÍ SIMULACÍ MATERIÁLOVÝCH MODELŮ S EXPERIMENTEM.....	60
OBR. 66: VOLBA KOEFICIENTU TŘENÍ POMOCÍ SIMULACÍ.....	61
OBR. 67: VLEVO VYBOULENÍ VZORKU V SIMULACI, VPRAVO TVÁŘENEC PO EXPERIMENTU.....	61
OBR. 68: VÝBĚR KŘIVKY ZPEVNĚNÍ PRO DALŠÍ SIMULACE.....	62
OBR. 69: POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH VARIANT TŘENÍ S EXPERIMENTEM.....	63
OBR. 70: VLEVO DEFORMACE VZPĚREM V SIMULACI, VPRAVO DEFORMACE VZPĚREM V EXPERIMENTU.....	63
OBR. 71: POROVNÁNÍ NEJHORŠÍCH VARIANT DEFORMACE PRŮHYBEM PRO MATERIÁL G PRO DÉLKY: ZLEVA 1 000 MM, 2 000 MM A 3 000 MM.....	65

## 9 Seznam tabulek

TAB. 1: PROMĚNNÉ V SYSTÉMU TVÁŘENÍ. [11] .....	16
TAB. 2: CHEMICKÉ SLOŽENÍ OCELI S235JRH. [30] .....	31
TAB. 3: MECHANICKÉ VLASTNOSTI OCELI S235JRH. [31] .....	32
TAB. 4: TOLERANCE VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU TRUBKY. [31] .....	32
TAB. 5: HODNOTY TOLERANCE TLOUŠŤKY STĚN VYUŽÍVANÝCH V PROCESU. [31] .....	32
TAB. 6: DOVOLENÉ HODNOTY PRŮHYBU PRO DODÁVANÉ DÉLKY TRUBEK. [31] .....	33
TAB. 7: POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ANALYZOVANÝCH JAKOSTÍ. [45] .....	42
TAB. 8: TVÁŘECÍ SÍLA [kN] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM.....	47
TAB. 9: PRŮHYB TRUBKY [MM] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM. ....	47
TAB. 10: TVÁŘECÍ SÍLA [kN] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM JAKOST B. ....	50
TAB. 11: TVÁŘECÍ SÍLA [kN] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM JAKOST G. ....	50
TAB. 12: PRŮHYB TRUBKY [MM] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM JAKOST B. ....	50
TAB. 13: PRŮHYB TRUBKY [MM] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM JAKOST G. ....	50
TAB. 14: TVÁŘECÍ SÍLA [kN] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM PRO MATERIÁLOVOU ŠARŽI B.....	52
TAB. 15: TVÁŘECÍ SÍLA [kN] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM PRO MATERIÁLOVOU ŠARŽI G. ....	52
TAB. 16: PRŮHYB TRUBKY [MM] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM PRO MATERIÁLOVOU ŠARŽI B.....	52
TAB. 17: PRŮHYB TRUBKY [MM] PŘI DOSAŽENÍ PRŮMĚRU 89 MM PRO MATERIÁLOVOU ŠARŽI G. ....	53