

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Landa
Lukáš**

2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Landa** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **476108**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ověření tvářitelnosti materiálu pro výrobu sloupů veřejného osvětlení

Název diplomové práce anglicky:

Verification of material formability for the production of public lighting poles

Pokyny pro vypracování:

1. Seznámení s problematikou ověřování vlastností materiálu
2. Návrh metody zkoušek pro ověření tvářitelnosti
3. Porovnání průběhu reálného experimentu a numerické simulace při tvarové úpravě konce trubky
4. Vyhodnocení výsledků zkoušek
5. Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 6892-1
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Chrástanský, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. Lukáš Chrástanský, 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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma *Ověření tvářitelnosti materiálu pro výrobu 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

.....

Jméno, Příjmení

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Lukáši Chrášťanskému, Ph.D. a panu Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě této diplomové práce.

Anotace

Škola:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Název práce:	Ověření tvářitelnosti materiálu pro výrobu sloupů veřejného osvětlení
Akademický rok:	2021/2022
Autor:	Bc. Lukáš Landa
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Chrástanský, Ph.D.
Konzultant:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 73 Počet obrázků 41 Počet tabulek 10 Počet příloh 3
Klíčová slova:	Tvářitelnost, tváření trubek, matematické modelování, zkoušení mechanických vlastností
Abstrakt:	Diplomová práce se zabývá ověřováním tváření konců trubek. Teoretická část se zabývá tvářením, zkouškou tahem, technologickými zkouškami a technologickými zkouškami trubek. V praktické části je provedeno ověření vstupního materiálu, experiment s reálným nástrojem a matematické simulace procesu

Annotation

University:	Czech technical university in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of the department:	Doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Title:	Verification of material formability for the production of public lighting poles
Academic year:	2021/2022
Author:	Bc. Lukáš Landa
Supervisor:	Ing. Lukáš Chrástanský, Ph.D.
Consultant:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Bibliographic data:	Number of pages 73 Number of pictures 41 Number of tables 10 Number of appendices 3
Keywords:	Formability, tube forming, mathematical modelling, mechanical properties testing
Abstract:	The thesis deals with the verification of the forming of pipe ends. The theoretical part deals with forming, tensile test, technological tests and technological tests of pipes. In the practical part, the verification of the input material, the experiment with a real tool and the mathematical simulation of the process are carried out.

Obsah

1. Úvod	10
2. Proces tváření.....	12
2.1 Princip tváření	12
Zákony plastické deformace.....	13
Deformace skluzem.....	14
Deformace dvojčatěním	14
Deformační zpevnění.....	15
Deformační odpevnění.....	16
Stav napjatosti	17
2.2 Tvařitelnost	17
2.2.1 Zkoušky se dělí dle:.....	17
2.2.2 Faktory ovlivňující tvařitelnost.....	17
2.2.3 Ukazatele tvařitelnosti za studena	18
2.2.4 Mechanické zkoušky	20
2.2.5 Technologické zkoušky.....	22
2.2.6 Vybrané zkoušky trubek.....	26
3. Modelování tvářecích procesů	29
3.3 Využívané programy	30
3.3.1 Simufact forming.....	30
3.3.2 QForm.....	31
3.3.3 Deform – 3D	31
3.3.4 Form FEM.....	31
3.3.5 Forge.....	32
4. Definování problému	33
5. Charakteristika procesu oblasti zaměření	35

6.	Charakteristika tvářeného materiálu	36
6.4	Ověření mechanických vlastností	37
6.4.1	Způsob přípravy vzorků	38
6.4.2	Popis principu zkoušky	39
6.4.3	Naměřené hodnoty	39
6.4.4	Prodloužení posuvným měřítkem.....	41
6.4.5	Popis materiálového modelu	42
6.5	Ověření geometrie trubek.....	42
6.5.1	Naměřené hodnoty tloušťky stěny	43
6.5.1	Naměřené hodnoty průměru trubky	44
7.	Ověření průběhu tvářecího procesu pomocí reálného nástroje.....	46
6.10.2	Naměřené hodnoty	48
6.10.3	Závislost síly na vnitřním průměru.....	49
6.10.4	Závislost posuvu na vnitřním průměru.....	50
6.10.5	Závislost posuvu na síle.....	50
6.10.6	Celkové zhodnocení.....	51
6.10.7	Vizuální kontrola tvářené trubky	51
8.	Numerická simulace procesu	53
6.11	Princip a nastavení.....	53
6.12	Vyhodnocování	54
6.12.1	Dráha nástroje (posuv) – síla nástroje	54
6.12.2	Dráha nástroje – vnitřní průměr trubky.....	55
6.12.3	Ideální síla pro vytvoření průměru 88,9 mm	55
6.12.4	Závěrečné zhodnocení simulací	56
9.	Porovnání numerické simulace s reálným experimentem.....	58
6.13	Změna tření	59

6.14	Simulace se špatným třením a modifikovaným materiálem	59
6.15	Zhodnocení porovnání závislosti posuvu na síle	59
6.16	Ověření deformace vzpěrem	61
6.16.1	Zhodnocení deformace vzpěrem	62
10.	Závěr.....	63
11.	Reference.....	66
12.	Seznam obrázků.....	72
13.	Seznam tabulek.....	74

Příloha 1 - Měření tloušťky stěn

Příloha 2 - Měření prodloužení posuvným měřítkem

Příloha 3 - Hodnoty ze zkoušky tahem

1. Úvod

Tato práce se zabývá analýzou procesu zakončení trubek sloupů veřejného osvětlení, které je nutné pro další procesy výroby. Konkrétně se jedná o přípravu plochy pro vkládání dalších trubek, které mají rozdílný průměr a pro následné svařování. Samotný proces tváření zakončení trubkového profilu probíhá tak, že tlačná deska působí silou na jednu stranu trubky a tím je druhá strana trubky vtlačována do tvarového nástroje. Tímto procesem vznikne na jejím konci požadované zaoblení, s požadovaným průměrem. Zaoblení na konci trubky musí mít přesný průměr, protože v dalším kroku výroby se do této trubky vsune vnitřní trubka a provede se automatické svařování na otočných stolech. U vůle mezi vnitřním průměrem tvářené trubky a vnějším průměrem trubky vložené je požadavek na úzkou toleranci pro kvalitní provedení svaru.

Je zde několik faktorů, které celý proces tváření ovlivňují. V první řadě se jedná o vstupní materiál, který výrazně ovlivňuje chování polotovaru při tvářecím procesu. Vstupní materiál bude ovlivňovat tvářecí síly. Pokud budou tvářecí síly příliš velké a nosník nebude dostatečně podepřen, může dojít ke ztrátě stability. Z tohoto plynou dvě otázky. První otázkou je, jaký je rozptyl vlastností vstupního materiálu a jaká je tvářitelnost materiálu. Druhou otázkou je, jak se materiál chová při výrobním procesu, jak velké síly jsou pro tváření potřebné, a co mohou tyto síly způsobit.

Po provedení rešerše a seznámení s problematikou se v rámci práce bude provádět analýza mechanických vlastností vstupního materiálu, která bude provedena na reprezentativním vzorku dodaných taveb. S tím bude provedena i kontrola geometrických rozměrů vstupního materiálu a dodržení geometrických tolerancí.

Dále bude proveden pomocí zkušebního nástroje popis tvářecího procesu, znázorněny průběhy dráhy a síly na získaném průměru. Tyto vstupní hodnoty budou použity pro matematické simulování a ověření, zda je bude možné použít. Cílem bude provedení nastavení numerické simulace tak, aby odpovídala reálnému procesu. Pak bude možné proces prověřit z mnoha

hledisek, například modifikování materiálové karty, tolerance délky, průměrů, tloušťky stěny nebo ovality trubky nebo provedení analýzy pro ověření možnosti ztráty stability a vlivu vzpěru na proces.

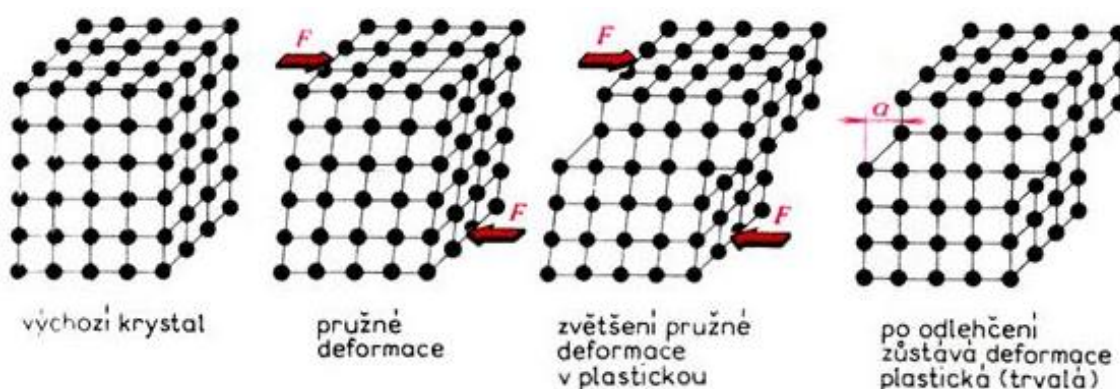
Tyto kroky povedou k návrhům opatření, kterými bude možné zvýšit stabilitu celého procesu. Bude možné vyhodnotit, jestli bude nutné každou várku materiálu komplexně testovat, nebo bude nutné vymyslet nějakou technologickou zkoušku, na základě které se bude upravovat následný proces tváření. Další opatření by mohlo být na ukončení tvářecího procesu, jelikož jak již bylo popsáno, ukončování na základě dráhy nástroje není příliš vhodné.

2. Proces tváření

2.1 Princip tváření

Tváření kovů je technologický, nedestruktivní proces, při kterém dochází ke změně tvaru nebo vlastností polotovaru, nebo již konečného výrobku. K této změně dochází v důsledku působení vnějších sil tak, aniž by se porušila soudržnost materiálu. Výjimkou může být pouze stříhání a prostřihování, kde je materiál namáhán stříhem až přes mez pevnosti ve stříhu a dojde tak k jeho oddělení. Takto zpracovaný polotovar, nebo již hotový výrobek, má požadovaný tvar, rozměry, tolerance a materiálové vlastnosti. Obecně se tváření používá v hromadné a sériové výrobě, protože je velmi produktivní, ale nástroje pro tento proces bývají velmi drahé, a proto se ve většině případech nevyplatí pro kusovou výrobu. [1] [2] [3]

Podstatou tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dochází při překročení meze kluzu materiálu. Tato deformace je vyvolána vnějšími účinky, ke kterým patří zejména vnější síla a teplota. Vnější síly se z hlediska účinku dělí na aktivní a pasivní. Mezi pasivní se zařazuje například tření, které má však také aktivní účinek na plastickou deformaci. Vnější síly vyvolávají v materiálu reakci v podobě vnitřních sil, kterými na sebe částice vzájemně působí. Tyto zóny vzájemného působení však nepřevyšují rozměr atomů a molekul tělesa. [1] [2] [3] [4]



Obrázek 1: Schéma pružné (elastické) deformace a trvalé (plastické) deformace [4]

Tváření se řídí zákony plastické deformace.:

Zákony plastické deformace

- Zákon stálosti objemu - Je založen na předpokladu, že kovy jsou nestlačitelné a objem před tvářením se rovná objemu po tvářením.
- Zákon nejmenšího odporu - Každý bod tvářeného tělesa ze všech možných směrů vybere směr nejmenšího odporu.
- Zákon stálosti potenciální energie změny tvaru - Velikost měrné potenciální energie nutné na uskutečnění trvalé změny tvaru tělesa je při konstantních podmínkách tvářením nezávislé na schématu napjatosti.
- Zákon podobnosti - Tělesa splňující geometrické, mechanické a fyzikální podmínky jsou podobná.
- Zákon maximálních smykových napětí - V krystalografických rovinách skloněných pod úhlem o velikosti 45° působí maximální smykové napětí.
- Zákon odpružení - Udává, že při zatížení dochází nejdříve k elastické deformaci, a poté k plastické. Po odlehčení dojde k odpružení a výsledná deformace vychází pouze z plastické deformace.
- Zákon přídavných napětí - V reálných procesech vznikají lokální nerovnoměrné napjatosti a tím i nerovnoměrné deformace. V důsledku těchto vlivů vznikají v materiálu tzv. přídavná napětí.
- Zákon tření - Je jedním ze základních jevů v procesu tvářením. Ke třením dochází mezi materiálem a nástrojem. Existuje několik druhů třením.

[1] [2] [3]

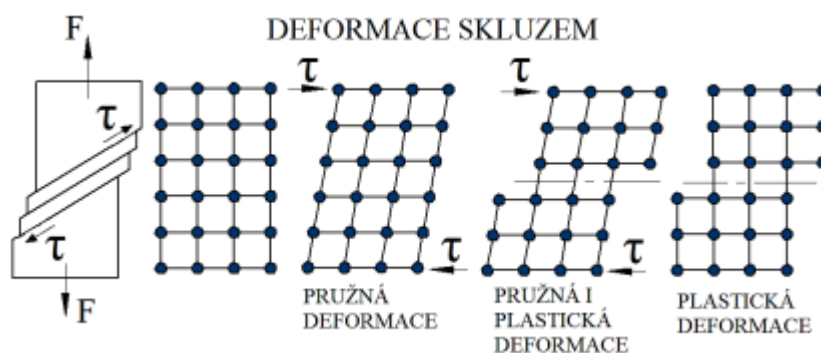
Princip plastické deformace vychází z toho, že jsou kovy především polykrystalické látky, jejich struktura je tedy tvořena větším množstvím krystalů, které se z metalurgického hlediska nazývají zrna. Zrna mají zpravidla polyedrický tvar, což znamená, že při tuhnutí kovu v tavenině vzniká velké množství krystalizačních center, která jsou navzájem náhodně orientovaná. Deformace může vznikat na hranicích bloků, tedy uvnitř krystalu. Jedná se o prostorovou orientaci bloků a kluz vzniká na krystalových rovinách bloků.

Zrna se prodlužují ve směru převládající deformace. Tímto způsobem lze docílit velké plastické deformace, pokud se soudržnost na hranicích bloků neporuší. Dále může deformace vznikat na hranicích zrn, mezikrystalicky. Tato deformace nemůže působit větší změnu tvaru, jelikož se soudržnost hranic zrn brzy poruší a tvářený kov se stane křehkým. [1] [2] [3]

Základními mechanismy plastické deformace jsou skluzem a dvojčatěním případně difúzí.

Deformace skluzem

Deformace skluzem je základním mechanismem plastické deformace, kluzový systém je určen rovinou kluzu a směrem kluzu. Jedná se zpravidla o nejhustěji obsazené atomy. Může vzniknout jednoduchý (translační) nebo složitý kluz. Jednoduchý kluz vzniká v počáteční fázi plastické deformace a probíhá podle jednoho systému kluzových čar. Složitý kluz vzniká při dalším zatěžování, probíhá současně v několika kluzových systémech a dochází k natáčení kluzových rovin, zpevnění, zvýšení deformačního odporu, vzniku mikroskopických trhlin a také k fragmentaci krystalů. [1] [2] [3] [4] [6]

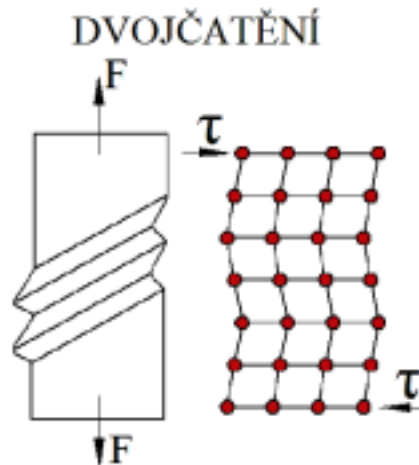


Obrázek 2: Deformace skluzem [5]

Deformace dvojčatěním

Plastická deformace dvojčatěním vzniká vlivem vnějších sil a část krystalu se symetricky pootočí kolem roviny dvojčatění, přičemž vytvoří zrcadlový obraz nedeformované části. Deformace kovu při vzniku dvojčat nemůže být velká, protože při ní vzniká značné zpevnění, takže následné deformace vznikají zpravidla kluzovými mechanismy. Deformace difúzí vzniká při

vysokých teplotách a velmi malé deformační rychlosti. Principem je přemístování atomů do energeticky výhodnějších poloh. Na difúzní pohyby má vliv koncentrace vakancí a intersticiálních atomů, teplota a napětí při deformaci krystalu. [1] [2] [3] [6]



Obrázek 3: Znárodnění deformace dvojčatěním [5]

Při plastické deformaci dochází ke zpevnění a odpevnění materiálu.

Deformační zpevnění

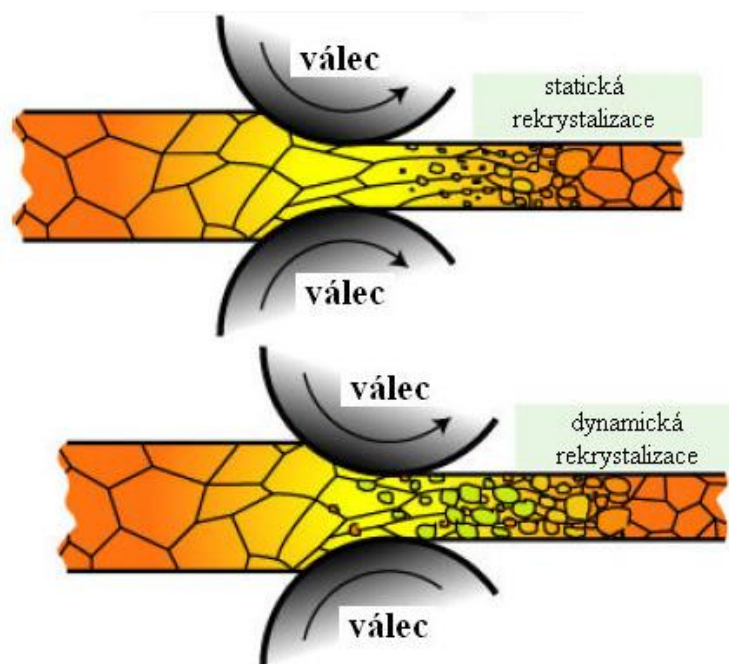
Ke zpevnění materiálu dochází pod rekryalizační teplotou, kde převládá kluzový mechanismus. Projevuje se rostoucím odporem materiálu vůči dalšímu přetvoření a je doprovázeno změnou mechanických a plastických vlastností. Zpevněním se mechanické vlastnosti, tvrdost a pevnost, zvyšují a plastické vlastnosti, tažnost, kontrakce a vrubová houževnatost klesají. Zpevnění se často využívá u hotových polotovarů, jako jsou například plechy, trubky nebo dráty. [1] [2] [3] [4]



Obrázek 4: Zrna před tvářením a zrna po tvářením [7]

Deformační odpevnění

Deformační odpevnění je částečné, nebo úplné odstranění příčin zpevnění. Odpevňování může probíhat při tváření, s krátkým časovým rozdílem po zpevňování, nebo až po tváření ohřevem materiálu. Odpevňování vrací kovu původní vlastnosti a provádí se z důvodu dosažení optimálních fyzikálních podmínek v materiálu. Zároveň je odpevňování nutné provádět z důvodu zabránění vyčerpání plasticity materiálu před další operací tváření. Základními procesy odpevnění po plastické deformaci jsou zotavení s polygonací a rekrytalizace. Zotavení je soubor procesů, kterým dochází v deformované stavbě krystalu při teplotách 0,25 – 0,3 teploty tavení. Snižuje se při něm hustota dislokací a částečně mizí bodové poruchy. Tyto procesy snižují zbytkové napětí v materiálu, a tedy i jeho tvrdost a pevnost. Rekrytalizace probíhá při teplotách 0,35 – 0,45 teploty tavení a dochází ke změně mechanických i fyzikálních vlastností. Během rekrytalizace se vytvoří struktura nové fáze, ale nová struktura stejné fáze. Při ohřevu materiálu jsou deformovaná zrna nahrazena nově vzniklými shluky, které tvoří jádro a rostou, dokud nedojde k úplnému odstranění původních zrn. [1] [2] [3] [6] [4]



Obrázek 5: Válcování za tepla [4]

Stav napjatosti

Při tváření vzniká v materiálu určitý stav napjatosti. Ukazatelem stavu napjatosti jsou převládající tahové, respektive tlakové složky napětí v tvářeném tělese. Obecně lze říct, že tahové složky v materiálu způsobují pravděpodobnost vzniku křehkého interkrystalického lomu v tělese. Tlaková napětí naopak napomáhají k lepší soudržnosti. Tyto složky lze zlepšit vhodnou volbou procesu tváření na základě kterého bude vyvolán příznivý stav napjatosti, ve kterém budou převažovat tlakové složky napětí. [1] [6] [8]

2.2 Tvařitelnost

Tvařitelnost je schopnost materiálu snášet plastické deformace za určitých podmínek tváření až do porušení soudržnosti. Technologická tvařitelnost vyjadřuje vliv dané technologie tváření na pravděpodobnost vzniku trhliny a je ovlivněna především stavem napjatosti. Vliv metalurgických činitelů na tvařitelnost za daných termomechanických podmínek ukazuje metalurgická tvařitelnost. Tvařitelnost je vyhodnocována mechanickými vlastnostmi získanými ze zkoušky tahem nebo pomocí technologických zkoušek, které odpovídají podmínkám příslušné technologie. Postupy těchto zkoušek jsou uvedeny v příslušných normách. Normy uvádějí postupy, podmínky a další nutné náležitosti. [6] [8] [9] [10]

2.2.1 Zkoušky se dělí dle:

- Teploty – za studena nebo za tepla
- Typu – jednoduché, speciální nebo technologické
- Cíle – ke stanovení kritérií tvařitelnosti nebo ukazatelů tvařitelnosti

2.2.2 Faktory ovlivňující tvařitelnost

Pro tuto práci budou důležité faktory, které ovlivňují proces tváření trubek za studena. Jak již bylo zmíněno, tyto faktory mohou být buď technologické nebo metalurgické. Mezi nejvíce se projevující faktory patří chemické složení materiálu, jeho mechanické vlastnosti, struktura materiálu, rychlost zatěžování, mazání, geometrie nástroje, anizotropie v materiálu nebo stav napjatosti při tváření. [11] [12]

2.2.3 Ukazatele tvařitelnosti za studena

Tvařitelnost je možné popisovat přes mechanické vlastnosti, získané ze zkoušky tahem nebo pomocí technologických zkoušek. Výstupem těchto zkoušek je posouzení vhodnosti materiálu být tvářen neboli posouzení ukazatele tvářitelnosti. [8] [13] [14] [52]

- Poměr smluvní meze kluzu a meze pevnosti ($R_{p0,2}/R_m$)
 - Tento poměr by se měl pohybovat v rozmezí $0,6 < R_{p0,2}/R_m < 0,8$.
 - Obecně však platí, že čím nižší, tím lepší tvařitelnost, jelikož se zvětšuje oblast, kde může docházet k plastické deformaci.
- Součinitel plastické anizotropie
 - Součinitel plastické anizotropie vyjadřuje poměr mezi skutečnou deformací šířky ϕ_b a skutečnou deformací tloušťky ϕ_t při jednoosém zatěžování.
 - Vyjadřuje nestejnorodost vlastností v různých směrech a udává schopnost materiálu odolávat ztenčení při tažení.
- Exponent deformačního zpevnění
 - Vyjadřuje schopnost materiálu se rovnoměrně plasticky deformovat.
 - Je závislý na směru válcování
- Zásoba plasticity
 - Je definována jako množství práce potřebné k plastické deformaci 1 mm^3 v oblasti rovnoměrné deformace.
 - Zásoba plasticity se vypočítává dle vztahu (2.1)
- Komplexní ukazatel tvařitelnosti
 - Komplexní ukazatel tvařitelnosti je možné získat ze vztahu (2.2)
- Index tvařitelnosti IT
 - Index tvařitelnosti IT je možné získat ze vztahu (2.3)
 - Materiály s dobrou tvařitelností mají index tvařitelnosti $IT \geq 300$.

Zásoba plasticity:

$$ZP = k * (R_m - R_e) * e_{\max} \quad [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

Kde e_{\max} je maximální hodnota poměrného prodloužení [-], k je materiálový součinitel [-], R_m je mez pevnosti [MPa] a R_e mez kluzu [MPa].

Index tvařitelnosti:

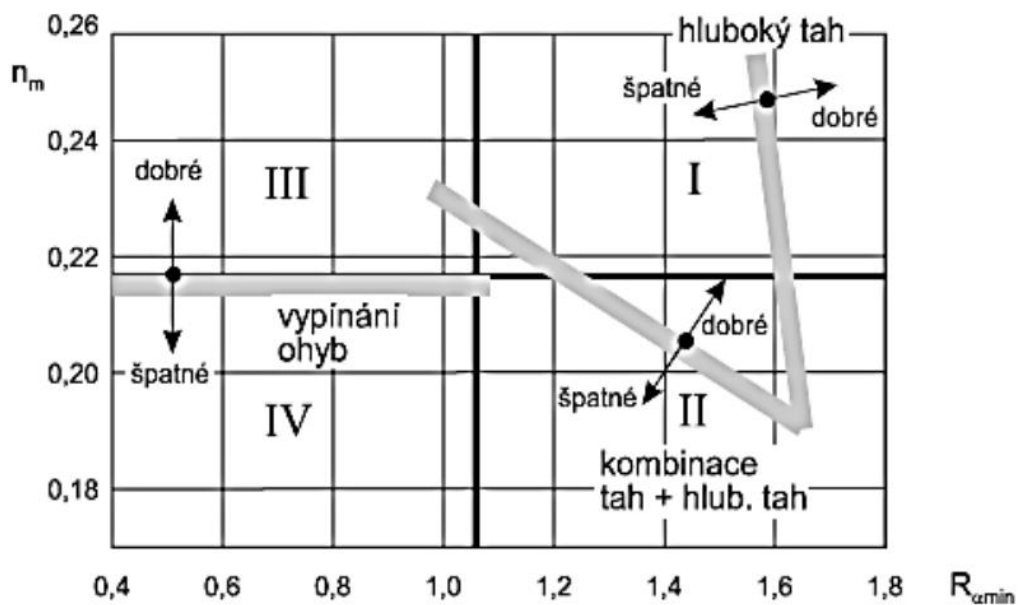
$$IT = r_s * n_s * 1000 \quad [-] \quad (2.2)$$

Kde r_s je součinitel plastické anizotropie [-] a n_s je střední hodnota exponentu deformačního zpevnění [-].

Komplexní ukazatel tvařitelnosti:

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} * A_c \quad [-] \quad (2.3)$$

Kde $R_{p0,2}$ je smluvní mez kluzu [MPa], R_m je mez pevnosti [MPa] a A_c je celková tažnost [%].



Obrázek 6: Diagram tvařitelnosti podle LILETa, kde I. oblast je vhodná pro nejsložitější tažené operace, II. oblast je s převládající tlakovou deformací, III. Oblast je s převládající tahovou deformací, IV. oblast je nevhodná pro hluboké tažení. [52]

2.2.4 Mechanické zkoušky

Ověřování mechanických vlastností se zpravidla neprovádějí na samotné součásti, ale na zkušebních tělesech zhotovených buď přímo ze součástí nebo z materiálu, který je stejný jako samotná součást. Podle způsobu zatěžování se zkoušky dělí na zkoušky tahem, krutem, tlakem, v ohybu a ve stříhu. Níže bude popsána pouze zkouška tahem, protože byla pro tuto práci zásadní. [15] [16]

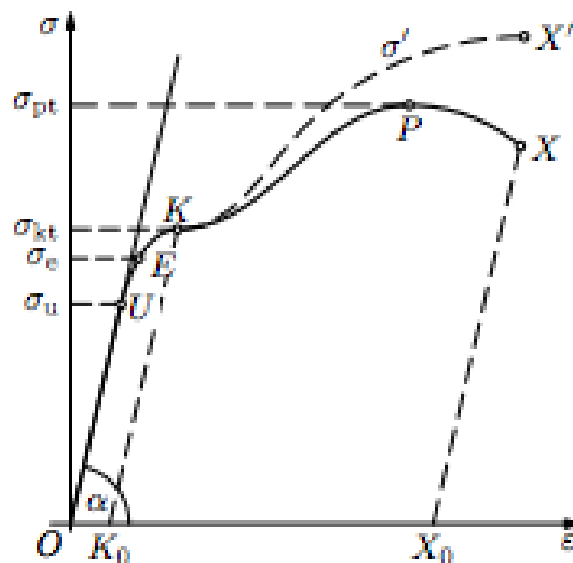
2.2.4.1 *Ověřování tvářitelnosti pomocí zkoušky tahem*

Zkouška tahem patří mezi zkoušky mechanických vlastností, pomocí které je možné určit základní mechanické charakteristiky k vyhodnocení jakosti materiálu nebo například i plasticita materiálu. Zkouška kovových materiálů tahem probíhá v souladu s ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška spočívá v deformaci zkušebního tělesa na zkušebním stroji. Zkušební těleso se upne do upínacích čelistí a postupně se zatěžuje zpravidla až do přetržení. V první fázi zatěžování působí na těleso elastická deformace a po odlehčení by se vrátilo do původních rozměrů. Při dalším zatěžování začíná vznikat plastická deformace a po odlehčení již tyč zůstává deformována. V případě dalšího zatěžování dojde k překročení meze pevnosti a tyč se přetrhne. V tomto případě se nejčastěji zkouška tahem u kovů ukončuje. Zkouška obvykle probíhá za pokojové teploty, ale obecné požadavky v normě ČSN EN ISO 6892-1 udávají rozmezí 10 °C až 35 °C. [17] [18] [19]

Výstupem zkoušky je vytvoření pracovního diagramu $F=f(\Delta L)$, kde F [N] je zatěžující síla a ΔL [mm] je absolutní prodloužení zkušebního tělesa nebo skutečného pracovního diagramu $\sigma = f(\varphi)$, kde je σ [MPa] skutečné napětí a φ [-] je okamžité prodloužení. [17] [18] [19]

Popis pracovního diagramu

V první fázi, až do hodnoty σ_U (meze úměrnosti) je prodloužení tyče přímo úměrné zatížení a platí Hookův zákon vztah (2.4). Poměrné prodloužení je změna délky vztažená k původní délce zkušebního tělesa vztah (2.5). Oblast mezi hodnotou σ_U a σ_E je oblast pružné deformace. Napětí odpovídající bodu σ_E je mez pružnosti. Mez pružnosti je mezní napětí, které po odlehčení zanechá první trvalé deformace. V oblasti mezi σ_E a σ_K již vznikají trvalé deformace. Napětí odpovídající σ_K se nazývá mez kluzu R_{eH} (dříve σ_{Kt}), platí vztah (2.6). Mez kluzu je napětí, po jehož dosažení se zvyšuje poměrné prodloužení, aniž by se zvyšovalo napětí. Naopak napětí někdy poklesne. U všech materiálů se výrazná mez kluzu nevyskytuje a v praxi se používá napětí, které způsobí trvalou deformaci 0,005% popř. 0,2%. Tyto hodnoty se pak označují $\sigma_{0,005}$ a $\sigma_{0,2}$. Po dosažení hodnoty σ_P (napětí na mezi pevnosti) dochází k porušení zkušebního vzorku. Jedná se o nejvyšší napětí. Mez pevnosti v tahu vypočítáme ze vztahu (2.7). [17] [20] [21] [22]



Obrázek 7: pracovní diagram zkoušky tahem [22]

Hookův zákon:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (2.4)$$

Kde σ je napětí [MPa], E je modul pružnosti [MPa], ε je poměrné prodloužení [-]

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = (l_1 - l_0) / l_0 \quad [-] \quad (2.5)$$

Kde l_1 je délka naměřená po přetržení [mm] a l_0 původní délka [mm]

Mez kluzu v tahu:

$$R_{eH} = F_K / S_0 \quad [\text{MPa}] \quad (2.6)$$

Kde F_K je síla na mezi kluzu [N] a S_0 je průřez vzorku [mm²]

Mez pevnosti v tahu:

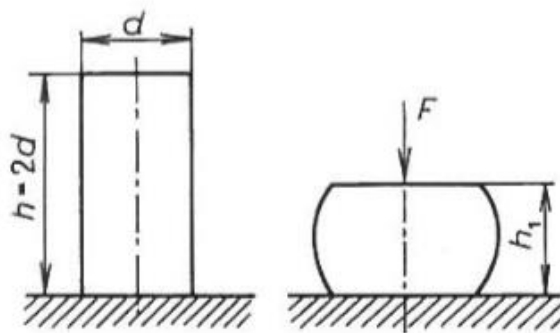
$$R_p = F_p / S_0 \quad [\text{MPa}] \quad (2.7)$$

2.2.5 Technologické zkoušky

Technologické zkoušky slouží k zjišťování vhodnosti materiálu pro určité technologické zpracování. Výsledkem zkoušky může být často jen porovnání nebo otestování materiálů pro určitou technologii a výstupem může být pouze, jestliže je materiál vhodný či nevhodný právě pro danou technologii. Výstupní hodnoty těchto zkoušek obvykle nebývají v normách. Níže je proveden výběr zkoušek, které se dají považovat za zajímavější vzhledem k charakteru práce. [23] [24]

2.2.5.1 Pěchovací zkouška

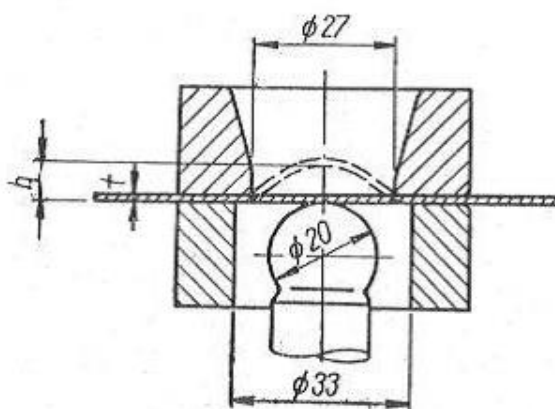
Pěchovací zkouška se řídí dle normy ČSN 42 0426 a má za úkol ověřit tvárnost, případně i dosažený stupeň zpevnění nebo křehkost při pěchování. Jako zkušební těleso se obvykle používá váleček, který má shodný průměr se zkoušeným předmětem a výška zkušebního válečku odpovídá dvojnásobku jeho průměru. Tento zkušební váleček se zpevňuje až do 50% a pro vyhovující zkoušku nesmějí na válečku vzniknout žádné praskliny. [25] [26] [27]



Obrázek 8: zkouška pěchováním [27]

2.2.5.2 Zkouška hloubením dle Erichsena

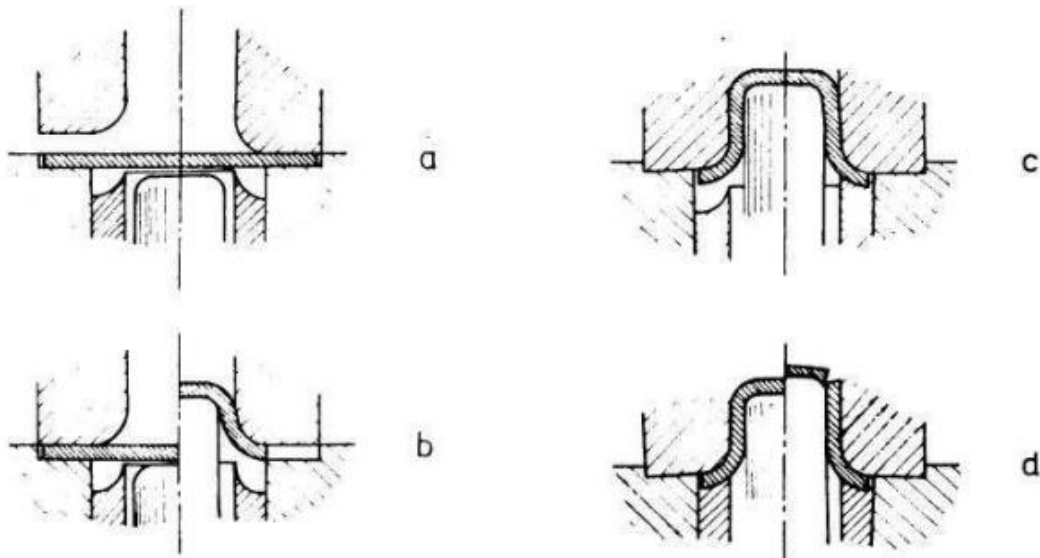
Zkouška hloubením dle Erichsena vychází z normy ČSN EN ISO 20482 a používá se pro zkoušky plechů a pásů. Cílem zkoušky je zjistit schopnost plechu se deformovat do určitého tvaru pomocí plastické deformace. Při zkoušce se měří hloubka vtisku do iniciace prvních trhlin. Zkouška probíhá tak, že se plech upne přidržovačem a vtlačuje se do něj tažník. Tažník má kulový tvar o průměru 20 mm. Výsledkem zkoušky je prohloubení a zároveň také tvar a směr šíření trhliny. Dále se může vyhodnocovat homogenita materiálu. U nehomogenního materiálu nemusí být správně dodržen tvar vtisku. Jedná se o velmi oblíbenou a používanou zkoušku, protože je rychlá a nenáročná na přípravu, zároveň má ale velmi vypovídající hodnotu. Mezi varianty této zkoušky se dá zahrnout kalíškovací zkouška nebo hydraulická hloubící, či kombinovaná kalíškovací-hloubením. [28] [29]



Obrázek 9: zkouška hloubení dle Erichsena [28]

2.2.5.3 Engelhartova-grossova zkouška

Jedná se o kombinovanou zkoušku spočívající v hlubokém tažení a následujícím vypínání vzorku, sevřeném v přidržovači. Podstatou zkoušky je zaznamenávání síly při tažení kalíšku. Zkouška je ukončena při utržení dna kalíšku. Jako zkušební vzorky se používají vystřižené přístřihy. [30]



Obrázek 10: Schéma zkoušky a) schéma přidržení plechu, b) tažení, c) sevření příruby d) porušení [31]

Z naměřených hodnot se ze zkoušky zjišťuje tzv. přirozený stupeň hlubokotažnosti dle vztahu (2.8) a platí, že pro dobře tvářitelný hlubokotažný plech musí být $T' > 0,4$. [30]

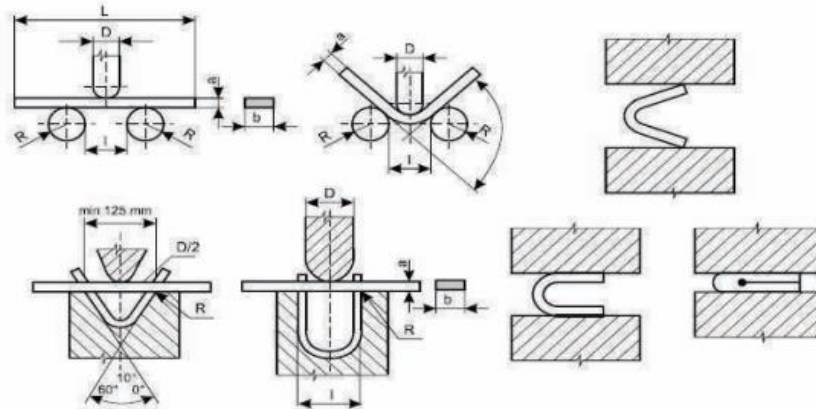
Stupeň hlubokotažnosti:

$$T' = \frac{F'_{\max} - F_{\text{taz}}}{F'_{\max}} * 100 \quad [\%] \quad (2.8)$$

Kde F_{taz} [N] je maximální tažná síla a F'_{\max} [N] je maximální síla při odtržení dna kalíšku po sevření zbývající části příruby.

2.2.5.4 Zkouška lámavosti

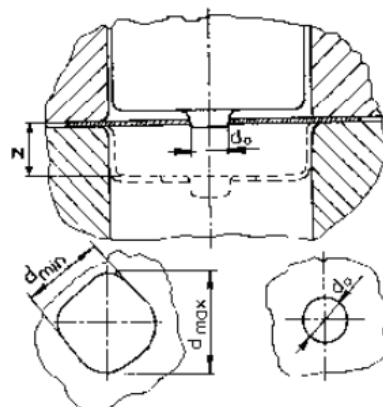
Zkouška lámavosti je podobná zkoušce ohybem, provádí se však u křehkých materiálů nebo taktéž u svarů. Zkouška může probíhat za tepla i za studena. Výsledkem zkoušky je úhel, do kterého je materiál schopen se deformovat bez vzniku porušení. Samotná zkouška se řídí normou ČSN 42 0401. [31]



Obrázek 11: princip zkoušky lámavosti [31]

2.2.5.5 Zkouška rozšiřováním otvorů

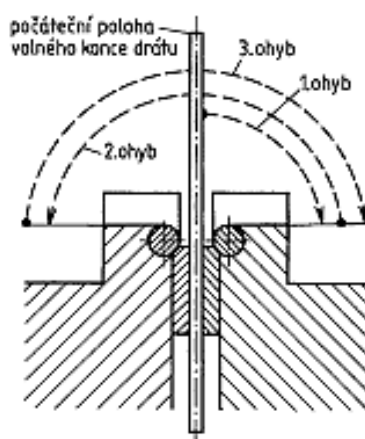
Princip zkoušky spočívá v před vytvoření otvoru do plechu, který se následně upne přidržovačem. Otvor je následně rozšiřován pomocí tažníku. V této zkoušce se vyhodnocuje hloubka tahu, rozšíření díry a plošná anizotropie. Hlavním parametrem bývá hodnota vypočtená z poměru hodnot, popisujících konečné hodnoty popisující změnu tvaru otvoru. [32]



Obrázek 12: Princip zkoušky rozšiřování otvorů [32]

2.2.5.6 Zkouška střídavým ohybem

Zkouška je popsána normou ČSN ISO 7799 a probíhá tak, že se zkušební vzorek upne do upínací části zkušebního zařízení a pomocí unašeče, spojeného s ohýbací pákou se střídavě vzorek ohýbá viz (Obr. 13). Cílem zkoušky je vyhodnotit odolnost materiálu proti střídavému 90° ohybu kolem válcových ploch o předepsaném poloměru. Určuje se počet ohybů do úplného zlomení vzorku, přičemž se nepočítá ohyb, u kterého došlo k porušení. [31]



Obrázek 13: Princip zkoušky střídavým ohybem [33]

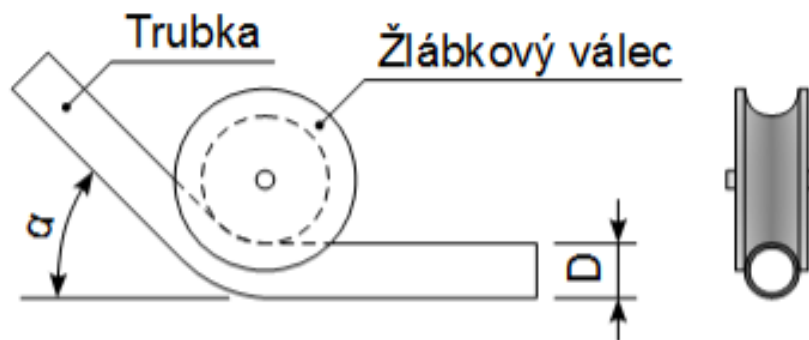
2.2.6 Vybrané zkoušky trubek

Jedná se o poměrně jednoduché zkoušky, u kterých se zjišťuje, zda je možné s daným materiálem dosáhnout požadovaného tvaru za určitých podmínek.

2.2.6.1 Zkouška ohybem

U zkoušky ohybem trubek, která se řídí normou ČSN EN ISO 8491 (42 0324) se hodnotí, zda je trubku možné ohnout do určitého úhlu bez vzniku trhlin. Zkoušeným tělesem je část trubky s vnějším průměrem výhradně do 65 mm. Trubka musí mít dostatečnou délku. Trubka se postupně nepřerušovaně ohýbá až do požadovaného úhlu (obvykle 90°) kolem žlábkového kalibru v ohýbacím stroji. Během zkoušky musí být po celou dobu trubka v kontaktu s kalibrovacím strojem, na kterém zkouška probíhá. Žlábkovací kalibr má tvar zkoušeného tělesa a jeho poloměr je taktéž dán normou. Zkouška se provádí

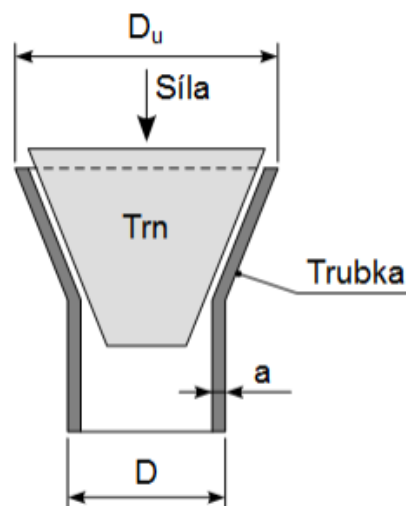
za teplot 10 °C – 35 °C. Pokud se zkouška provádí na trubce se svarem, tak musí být svar v pozici 90° stupňů s rovinou ohybu. [34] [35] [36]



Obrázek 14: Princip zkoušky ohybem [34]

2.2.6.2 Zkouška rozšiřováním

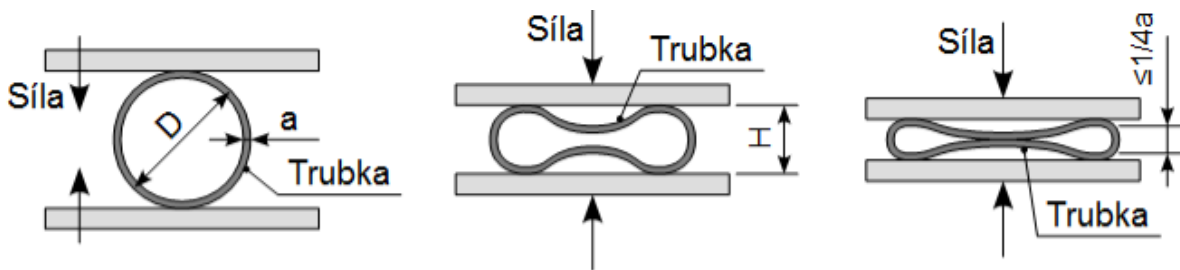
Zkouška rozšiřováním se provádí dle normy ČSN EN ISO 8493 (42 0326). zkouška je určena pro trubky do průměru 150 mm s tloušťkou stěny maximálně 10 mm. Zkušebním tělesem je trubka s délkou závislou na požadovaném úhlu rozevření, tedy na zkušebním trnu, který konec trubky rozšiřuje a vytváří tzv. hrdlo. Zkouška probíhá tak, že se kuželový trn zatlačuje do zkušebního tělesa a je ukončena po dosažení požadovaného rozšíření konce trubky. Zkouška se požaduje za vyhovující, pokud na vzorku nevzniknou praskliny nebo lom. Provádí se za teplot 10 °C - 35 °C. [34] [37]



Obrázek 15: Princip zkoušky rozšiřováním [34]

2.2.6.3 Zkouška smáčknutím

Tato zkouška se řídí normou ČSN ISO EN 8492 (42 0325). Zkouší se, zda je trubka schopna se smáčknout do požadované vzdálenosti čelistí bez vzniku trhlin, či lomu v místě ohybu. Zkušebním vzorkem je trubka o průměru do 600 mm a tloušťky stěny do 15 % tohoto rozměru. Zkoušku je možné provést přímo na trubce, nebo se vyrábějí tělesa o délce 10 – 100 mm. V případě, že se zkouška provádí přímo na trubce se kolem zkoušené oblasti dělají zářezy hluboké minimálně 80 % průměru trubky. Zkouška se provádí za teplot 10 °C - 35 °C. [34] [38]



Obrázek 16: Princip zkoušky smáčknutím [34]

3. Modelování tvářecích procesů

Modelování tvářecího procesu je možné rozdělit na experimentální a matematické. Experimentální metody využívají data získaná z reálného experimentu a mají za úkol získat vstupní data pro matematické modelování a jeho následné ověření. [39] [40] [41]

Matematické modelování řeší velmi složité technologické operace, které bývají neřešitelné nebo velmi složitě řešitelné analytickými způsoby. Ukazují chování materiálu v reálném čase a výsledky je možné graficky znázornit. Pomocí simulace je možné rychle a poměrně levně minimalizovat riziko chyby v procesu nebo již zavedený proces optimalizovat. [42] [43] [41]

Matematické modelování je možné rozdělit na analytické a experimentální. Pro matematické modelování procesu tváření se užívají matematické metody a počítačové simulace. Výsledkem je získání vhodné technologie, konstrukce nástrojů nebo optimalizace již zaběhnutého procesu. Cílem těchto simulací je zjistit energeticko – silové parametry, potřebné k realizaci tvářecí operace, návrhu geometrie nástroje, pro samotné určení pracovního stroje nebo pro charakteristiku toku materiálu a limity tvářitelnosti. Matematické modelování vychází z několika mechanických rovnic. [39] [40] [42] [43] [44] [45]

- Konstitutivní rovnice
- Rovnice rovnováhy sil
- Rovnice kontinuity toku
- Rovnice okrajových podmínek

V praxi se využívá několik metod. Jedná se o

- Metodu horní meze – Spočívá v tom, že je součet okamžitých výkonů vnitřních sil roven výkonu tvářecí síly
- Metodu okrajových prvků – Základem je materiálový model nestlačitelné Newtonovské kapaliny

Metodu konečných prvků – momentálně nejdominantnější metoda z napětově-deformačních analýz. Oproti ostatním metodám, které jsou založeny na diferenciálním a integrálním počtu, je MKP založena na obecně méně známém počtu variačním a hledá minimum nějakého funkcionálu. [40] [42] [45]

3.3 Využívané programy

K matematickému modelování lze využít různé programy s již nadefinovanými tvářecími podmínkami, díky čemuž odpadá nutnost hluboké znalosti MKP. Programy, které jsou na principu FEM nebo FVM tyto podmínky nadefinované nemají a musí se připravovat pro každou simulaci, což je časově náročné. Pro tuto práci byly vybrány programy se zaměřením především na objemové tváření, které je pro tuto práci podstatné. [40] [42] [43] [44] [45] [46]

3.3.1 Simufact forming

Jedná se o specializovaný software pro simulaci tváření pro virtuální testování a návrh procesů pro optimalizaci dílů od firmy Hexagon. Pokrývá velké množství výrobních procesů v kovo zpracujícím průmyslu. Procesy jsou sdruženy do tří skupin. Tváření, spojování a aditivní výroba, které jsou přidány k aktuálně 17 oblastem použití, které obsahují různé speciální procesy. [47]

Software dokáže pracovat ve 3D a je založen na metodě konečných objemů (FVM) nebo metodě konečných prvků (FEM), záleží na uživateli, jaký zvolí řešič, přičemž každý je vhodný pro jiný typ úlohy, např. pokud řeší objemové nebo plošné tváření. Pomocí několika kliknutí myši lze nastavit a vyhodnotit všechny standardní procesy tváření.: [47]

- Tváření za studena
- Kování za tepla
- Tváření plechů
- Válcování
- Válcování kroužků
- Otevřené zápusťkové kování
- Tepelné zpracování

- Mechanické spojování
- Tlakové svařování

3.3.2 QForm

Simulační software QForm od firmy Quantor Ltd. se používá pro vývoj a optimalizaci mnoha různých procesů tváření kovů pro výrobu dílů v leteckém a obraném průmyslu, automobilovém průmyslu, energetice a v dalších odvětvích. Software pracuje ve 2D prostředí a je založen na metodě konečných prvků. Výsledky simulace je však možné zobrazit prostřednictvím 3D grafiky. Vytvořen byl v roce 1991 a distribuci po celém světě zajišťuje síť poboček a zástupců společnosti ESI Group. [48]

3.3.3 Deform – 3D

Jedná se o výkonný systém od firmy Scientific Forming Technologies Corporation, využívaný pro simulaci procesů určených k analýze trojrozměrného toku složitých procesů tváření kovů. Typické aplikace zahrnují:

- Uzavřené zápustkové kování
- Otevřené zápustkové kování
- Obrábění
- Válcování
- Vytlačování
- Ohraňování
- Tažení
- Přesazování

Defom – 3D je otevřený systém založený na metodě konečných prvků, který poskytuje velkou flexibilitu konstruktérům a analytikům. Poskytuje komplexní možnost vícenásobné deformace tělesa s libovolným kontaktem. [49]

3.3.4 Form FEM

Jedná se o software od firmy ITA-Tech, s. r. o. založený na metodě konečných prvků. Software pracuje ve 2D prostoru s úplnou teplotní vazbou. Software je schopen také nasimulovat tepelné zpracování nebo ho zapojit do

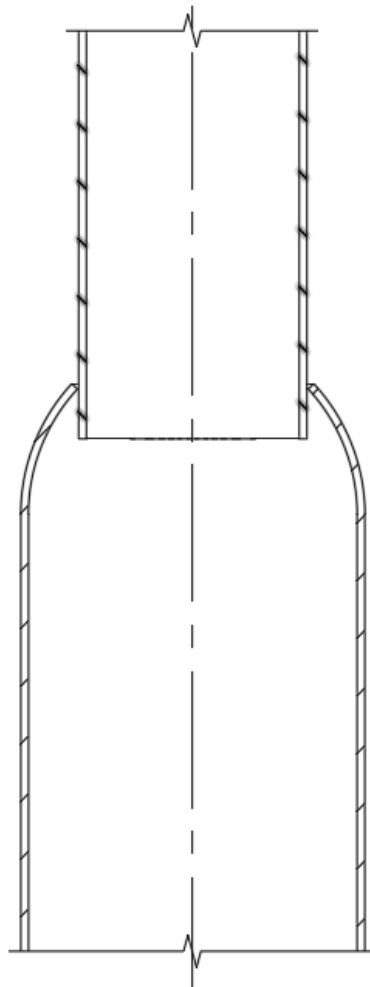
procesu. Slouží pro simulování objemového i plošného tváření za tepla i za studena. [50]

3.3.5 Forge

Program Forge od firmy Transvalor disponuje funkcemi pro sledování bodů, které umožňují odhalit případné studené oblasti v dílu, což je nezbytné pro zajištění dobrých mechanických vlastností výkovku. Inovativní techniky také umožňují zhmotnit segregace nacházející se ve středu výkovku. Obecně také obsahuje několik kritérií poškození, které umožňují odhalit kritická místa na dílu. Program se také zaměřuje na životnost nástrojů tím, že předpovídá napětí, abrazivní opotřebení, teploty a také oblasti podléhající pružné nebo plastické deformaci. [51]

4. Definování problému

Cílem této části je provést popis tvářecího procesu úpravy konců trubek. Trubky jsou použity pro výrobu sloupu lampy veřejného osvětlení. Tento sloup se skládá vždy z dvou a více trubek, přičemž každá následující trubka má menší průměr než trubka předchozí. Konkrétní oblastí zájmu je tento přechod mezi průměry. Větší průměr, do kterého se vkládá menší průměr je tvářen tvarovým nástrojem (Obr. 17). Následně jsou tyto dva průměry spojeny svarem.



Obrázek 17: Schéma spoje

Obvykle se používá materiálová jakost S235JRH a vnější průměr trubky je nejčastěji 150 mm, 133 mm a 89 mm. Tloušťky stěn se pohybují v rozmezí 3 – 5 mm. Rizika na těchto vstupech jsou primárně nedodržení předepsaných mechanických vlastností pro tuto jakost, tolerance vnějšího průměru, ovalita průměru nebo nedodržení tolerance tloušťky stěny.

Výrobní proces začíná přípravou trubky na předepsanou délku. Tato operace probíhá na pilách, kde vzniká riziko špatné kolmosti řezu nebo nedodržení tolerance délky. Následně se provádí tváření konců trubek, kterým se primárně tato práce zabývá. Následuje proces svařování na automatizovaném svařovacím pracovišti. Svařené trubky se dále posílají na povrchovou úpravu, kde se opatří žárovým zinkem. Takto připravený sloup putuje v posledním stádiu na montáž, kde se přidělá elektronika, revizní dvířka, rozvodová skříň a pojistky. Pro lepší přehlednost je níže uvedena Tab. 1 se stručným soupisem jednotlivých operací.

Tabulka 1: Nástin výrobního postupu

Stručný výrobní postup	
Operace	Proces
1	Dělení materiálu
2	Tváření konců trubek
3	Vkládání trubek do sebe
4	Svařování
5	Povrchová úprava
6	Montáž

Tato práce má za úkol optimalizovat proces tváření, která z velké části ovlivňuje následující technologie, primárně automatizované svařování. Při procesu tváření je hlavní riziko v dodržení úzké tolerance vnitřního průměru tvářeného konce trubky. Tato mezera mezi vnitřním průměrem tvářené trubky a vnějším průměrem vložené trubky musí odpovídat svařovacím požadavkům. Dalším rizikem je vznik vzpěru při samotném tváření. Tento problém také navazuje na následné technologie, primárně zase na proces svařování. Pokud by byla trubka ohnutá nebo zdeformovaná, tak by díky házení na svařovacím robotovi nebylo možné udělat kvalitní svar. Zároveň by deformace nebo ohnutí sloupu kazilo vizuální dojem z finálního produktu.

5. Charakteristika procesu oblasti zaměření

- Rozbor vstupního materiálu

Materiál se bude hodnotit na základě zkoušky tahem. Výsledky zkoušky budou porovnány s normou a materiálovými listy, které poskytuje dodavatel k materiálu. Zároveň se bude proměřovat geometrie trubek posuvným měřítkem. Měřit se budou tloušťky stěn a vnější průměry, ze kterých se následně bude vypočítávat ovalita. Naměřené hodnoty se následně porovnájí s normou.

- Experiment na hydraulickém zkušebním stroji

Ve druhé fázi bude tvářecí proces napodoben experimentem se skutečným nástrojem, který byl pro testování dodán. Probíhat bude na hydraulickém zkušebním stroji ZD100.

- Numerická simulace

Ve třetí fázi bude tento experiment napodoben matematicky v programu Simufact Forming a nakonec se budou dosažené výsledky vyhodnocovat a porovnávat.

6. Charakteristika tvářeného materiálu

V tomto konkrétním procesu výroby sloupů je použit materiál S235JRH, dle normy ČSN EN 10219-1 (technické dodací podmínky), ČSN EN 10219-2 (norma pro tolerance), popř. 10219-3 (norma pro vysokopevnostní materiál a pro materiál proti povětrnostním podmínkám).

Jedná se o nelegovanou ocel obvyklých jakostí. Značení vychází z normy EN 10027-1. Pro duté profily z nelegovaných ocelí se značení skládá z čísla evropské normy (EN 10219-1), velkého písmene S pro konstrukční ocel, minimální zaručené meze kluzu pro tloušťky ≤ 16 mm v MPa, velkými písmeny JR pro jakosti se zaručenými hodnotami nárazové práce při pokojové teplotě a velkého písmena H, které označuje, že se jedná o dutý profil.

Tabulka 2: Chemické složení materiálu

Označování oceli		Způsob dezoxidace	Hmotnostní podíl v % max.					
značka	Číselné označení		C	Si	Mn	P	S	N
S235JRH	1.0039	FF	0,17	-	1,4	0,04	0	0,009

Pozn.: Způsob dezoxidace FF: plně uklidněná ocel s dostatečným množstvím prvků, které vážou dusík
Pozn.: Maximální hodnota pro obsah dusíku neplatí, pokud ocel obsahuje celkový podíl Al minimálně 0,020% při minimálním podílu Al/N 2:1, nebo pokud jsou přítomny jiné dostatečné prvky, které vážou N. Obsah prvků, které vážou N musí být uveden v dokumentu kontroly.

Tabulka 3: Mechanické charakteristiky materiálu

Označování oceli		Minimální mez kluzu R_{eH} [Mpa]		Pevnost v tahu R_m [Mpa]		Tažnost A [Mpa]	Minimální hodnota nárazové práce KV [J]		
		Jmenovitá tloušťka [mm]		jmenovitá tloušťka [mm]		jmenovitá tloušťka [mm]	Při zkušební teplotě		
značka	číselné označení	≤ 16	$> 16 \leq 40$	< 3	$\geq 3 \leq 40$	≤ 40	-20 °C	0 °C	20 °C
S235JRH	1.0039	235	225	360-510	360-510	24	-	-	27

Pozn.: Vlastnosti nárazové práce jsou ověřovány pouze pokud je specifikován volitelný požadavek 1. 3.
Pozn.: Pro tloušťky > 3 a volikost profilu $D/T < 15$ (kruhový průřez) a $(B+H)/2T < 12,5$ (čtvercový a obdelníkový průřez) je minimální tažnost snížena o 2. Pro tloušťky ≤ 3 mm je minimální hodnota tažnosti 17% .

6.4 Ověření mechanických vlastností

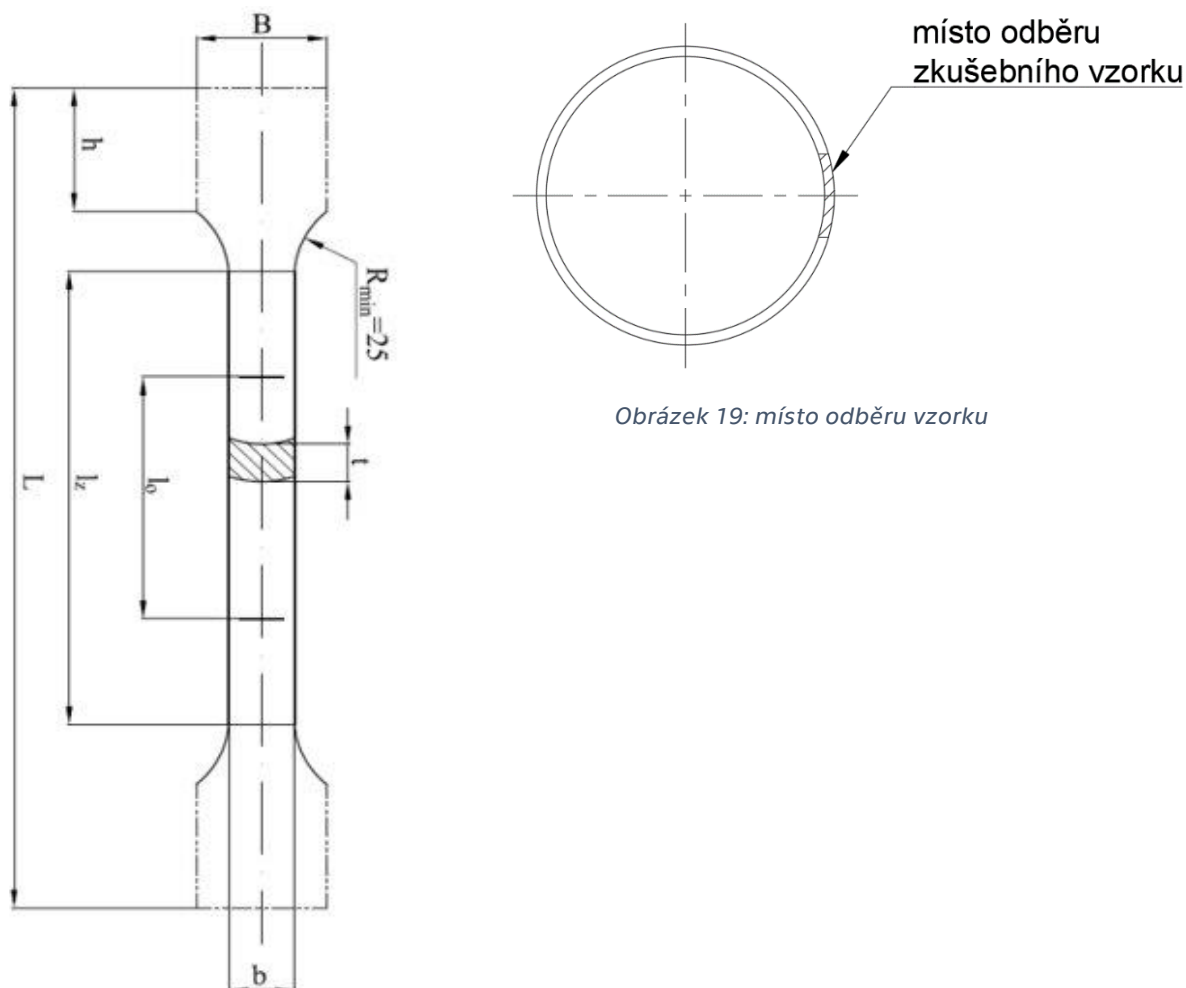
Mechanické vlastnosti se ověřovaly pomocí zkoušky tahem na trhacím mechanickém zkušebním stroji LabTest 5.100SP1 dle normy pro zkoušku kovu tahem - ČSN EN ISO 6892-1. Kontrakce byla měřena extenzometrem MFA-2 a protažení bylo měřeno pomocí bezkontaktního laserového extenzometru LE05. Teplota v laboratoři během zkoušek byla $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obrázek 18: Fotografie laboratoře

6.4.1 Způsob přípravy vzorků

Vzorky byly připraveny podélně z rozvinuté trubky. Po vyřezání z trubek proběhlo vyfrézování do tvaru zkušební tělesa a seskupení vzorků do skupin A–K, přičemž každá skupina měla 4 vzorky a jeden z nich vždy obsahoval svar.



Obrázek 20: náčrt zkušební vzorku

Rozměry tělesa se řídily normou ČSN EN ISO 6892-1, která říká, že standardní zkušební tělesa mají měrnou délku $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$. Pro tloušťky menší než 3 mm se používá měrná délka $L_0 = 80$ mm, pokud je možné dosáhnout šířky zkušební tělesa 20 mm. Jinak se u šířky zkušební tělesa 12,5 mm použije měrná délka 50 mm. Vzorky byly připraveny tak, aby bylo možné je řešit jako poměrové krátké, tak i nepoměrové s délkou 50 mm.



Obrázek 21: Příprava vzorků

6.4.2 Popis principu zkoušky

V první fázi bylo nutné připravené vzorky proměřit. Měřila se šířka b a tloušťka t v oblasti l_0 vzorku. Tyto naměřené hodnoty se použily jako vstupní hodnoty do programu ke zkušebnímu zařízení. Vzorek se upnul do klínových čelistí a nasadil se mechanický příčný extenzometr. Následně se na vzorek připnuly svorky ve vzdálenosti 50 mm, které sloužily jako referenční hodnoty pro podélný laserový extenzometr. Extenzometr se na tuto hodnotu vynuloval a aktivoval. Zapnula se zkouška, ke se zaznamenávala síla a dráha zkušebního nástroje. Na základě těchto hodnoty zkušební stroj vyhodnotil mez kluzu, mez pevnosti a tažnost.

6.4.3 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty viz Tab. 5 byly porovnány s normou a barevně označeny. Zelené hodnoty odpovídají normě. Hnědé hodnoty jsou na hraně tolerance a červené hodnoty jsou mimo toleranci. Normou předepsané hodnoty jsou vidět v Tab. 4. Důležité je však brát v úvahu, že norma předepisuje pouze minimální mez kluzu, takže například u vzorku G, který má dle normy mez kluzu vyhovující, je průměr ze tří měření 399,5MPa. Z pohledu tváření je toto však velký problém, protože se tím výrazně zužuje oblast mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. Poměr mezi mezí kluzu a mezí pevnosti je z hlediska tváření

dobré mít co nejmenší, jelikož tím roste zásoba plasticity. Z hlediska tváření je také dobré, aby byla mez kluzu co nejmenší, protože dříve začne plastická deformace. Obecně je však na výsledcích vidět, že dosahují předepsaných hodnot. Dle očekávání nastává problém u vzorků, které obsahovaly svar. Zde je vidět výrazný pokles tažnosti a nárůst meze pevnosti. Toto chování však může být zapříčiněno tím, že nebyla měřena tloušťka svaru, která může být větší, takže by se jevila větší i pevnost. Kompletní tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze této práce.

Tabulka 4: Předepsané hodnoty

Normované hodnoty	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
A-G, J, K	min. 235	360-510	min. 17%
H, I	min. 235	360-510	min. 24%

Tabulka 5: Průměry naměřených hodnot zkouškou tahem

Řada vzorků	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
A	243	389,5	44,19
A svar	398	412	27,67
B	298	371	42,41
B svar	378	423	25,07
C	246	373,7	42,01
C svar	363	416	23,01
D	235	373,7	44,89
D svar	339	423	19,94
E	253	363,7	42,46
E svar	396	419	23,89
F	359	416,3	32,29
F svar	484	502	17,69
G	399,5	462	33,74
G svar	439	525	18,88
H	353	408,7	37,35
H svar	451	468	19,76
I	332	408	39,86
I svar	464	522	16,96
J	328,3	421,3	42,24
J svar	433	465	25,4
K	304,7	440,3	39,62
K svar	446	485	22,91

6.4.4 Prodloužení posuvným měřítkem

V rámci ověřování mechanických vlastností materiálu se provádělo na několika vzorcích (A-G a J,K) ověření prodloužení A_{p50} pomocí posuvného měřidla. Měření proběhlo tak, že se před zkouškou tahem na vzorky udělaly dvě rysky. Vzdálenost mezi ryskami byla 50 mm. Tato vzdálenost se následně měřila po přetržení vzorku tak, že se dva přetržené kusy přiložily k sobě. Během tohoto měření je nutné brát v potaz to, že orýsování vzdálenosti 50 mm na vzorek nebylo možné udělat naprosto přesně. Stejně tomu bylo také při odečítání hodnoty po přetržení vzorku. V Tab. 6 jsou uvedeny výsledky pro vzorky A-C. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze. Obecně však vyplývá, že rozdíl mezi tažností měřenou touto metodou a tažností odečtené ze zkušebního zařízení se pohybuje v řádu nižších jednotek procent, což je pravděpodobně zaviněno již zmíněnou nepřesností této metody.

Tabulka 6: Měření prodloužení posuvným měřidlem

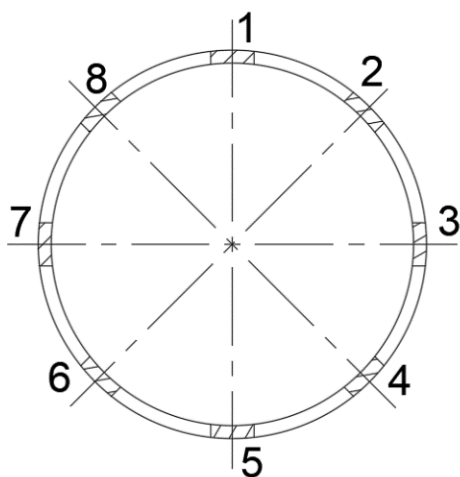
Řada vzorků	Číslo vzorku	L_1	L_0	A_{p50} měřeno	A_t ze stroje	rozdíl
		[mm]	[mm]	[%]	[%]	[%]
A	1	69,69	50	39,38	-	-
	2	70,07	50	40,14	43,02	2,88
	4	70,91	50	41,82	45,36	3,54
	3-S	60,67	50	21,34	27,67	6,33
B	2	68,56	50	37,12	40,46	3,34
	3	69,7	50	39,4	43,29	3,89
	4	70,91	50	41,82	43,47	1,65
	1-S	61,4	50	22,8	25,07	2,27
C	1	70,44	50	40,88	41,73	0,85
	2	70,46	50	40,92	42,74	1,82
	4	69,35	50	38,7	41,55	2,85
	3-S	61,28	50	22,56	23,01	0,45

6.4.5 Popis materiálového modelu

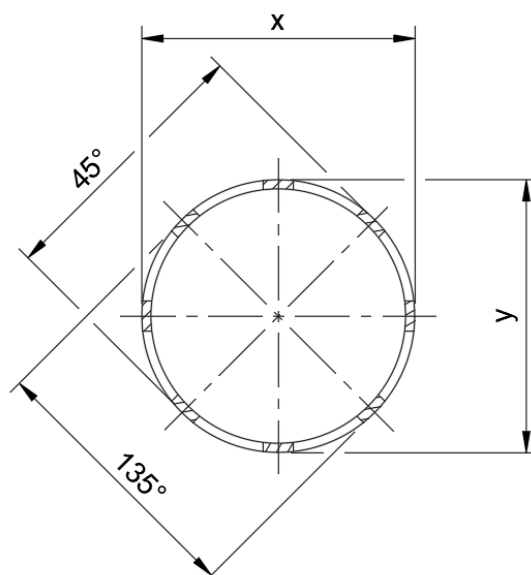
Hodnoty získané ze zkoušky tahem byly upraveny pro potřeby sestavení křivky zpevnění. Pro tyto účely se dopočítávalo skutečné napětí a skutečné deformace. Křivka zpevnění bude následně v práci použita pro úpravu materiálového modelu pro simulace v programu Simufact Forming, díky čemuž bude možné co nejpřesněji popsat skutečný materiál, který se využívá v daném výrobním procesu.

6.5 Ověření geometrie trubek

Ověření geometrie probíhalo pomocí posuvného měřítka. Měřil se po obvodu vnější průměr a také tloušťka stěny. Vnější průměr se měřil na 4 místech. Konkrétně v ose x, poté v ose y a dále ve 45° a 135° od osy x (Obr. 22). Tloušťka stěny se měřila ve 12 bodech (Obr. 23).



Obrázek 23: Polohy pro měření tloušťky stěny



Obrázek 22: polohy pro měření průměru trubky

Naměřené hodnoty se následně porovnávaly s normou ČSN EN 10219-2 pro svařované a duté profily tvářené za studena z konstrukčních ocelí, která udává, že pro vnější průměr je maximální odchylka od nominální hodnoty $\pm 1\%$, nejméně však $\pm 0,5\text{ mm}$ a nejvýše $\pm 10\text{ mm}$. U tloušťku stěny $T \leq 5\text{ mm}$ je maximální odchylka od nominální hodnoty $\pm 10\%$. Pro hodnotu ovality udává odchylku $\pm 2\%$.

6.5.1 Naměřené hodnoty tloušťky stěny

Pro interpretaci výsledků jsou v tabulce uvedeny první čtyři vzorky, které se měřily. Hodnoty pro všechny vzorky jsou přiloženy v příloze. Nominální hodnota tloušťky byla u všech vzorků 3 mm.

Tabulka 7: Hodnoty tloušťky stěn

		Tloušťka stěny T [mm]			
Vzorek	poloha	1	2	3	4
A	hodnota	2,73	2,73	2,76	2,74
	poloha	5	6	7	8
	hodnota	2,71	2,71	2,73	2,73
B	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,73	2,7	2,7	2,67
	poloha	1	2	3	11
	hodnota	2,63	2,74	2,73	2,71
C	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,67	2,69	2,66	2,7
	poloha	6	7	9	11
	hodnota	2,68	2,6	2,7	2,72
D	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,78	2,78	2,75	2,79
	poloha	6	7	9	11
	hodnota	2,77	2,78	2,8	2,76

Tabulka naměřených hodnot (Tab. 7) ukazuje, že se hodnoty pohybují v tolerančním pásmu a nevzniká zde velké riziko nepřesnosti geometrie. Z uvedených rozměrů se pouze vzorek C nachází mírně pod tolerančním pásmem, které pro tloušťku udává 10 % nominální hodnoty, tedy že vyhovující rozměr je 2,7-3,3 mm. Takto malá nepřesnost mohla vzniknout i tím, že byly hodnoty měřené analogovým posuvným měřidlem.

6.5.1 Naměřené hodnoty průměru trubky

U vzorků A-F byla nominální hodnota vnějšího průměr 89 mm a pro vzorek G byla nominální hodnota 133 mm. Vzorky H a I s nominální hodnotou 150 mm nebyly měřeny. Hodnota ovality byla vypočtena ze vztahu (6.1).

Ovalita:

$$O = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} * 100 \quad [\%] \quad (6.1)$$

Kde D_{\max} [mm] je maximální průměr, D_{\min} [mm] je minimální průměr a D [mm] je nominální průměr

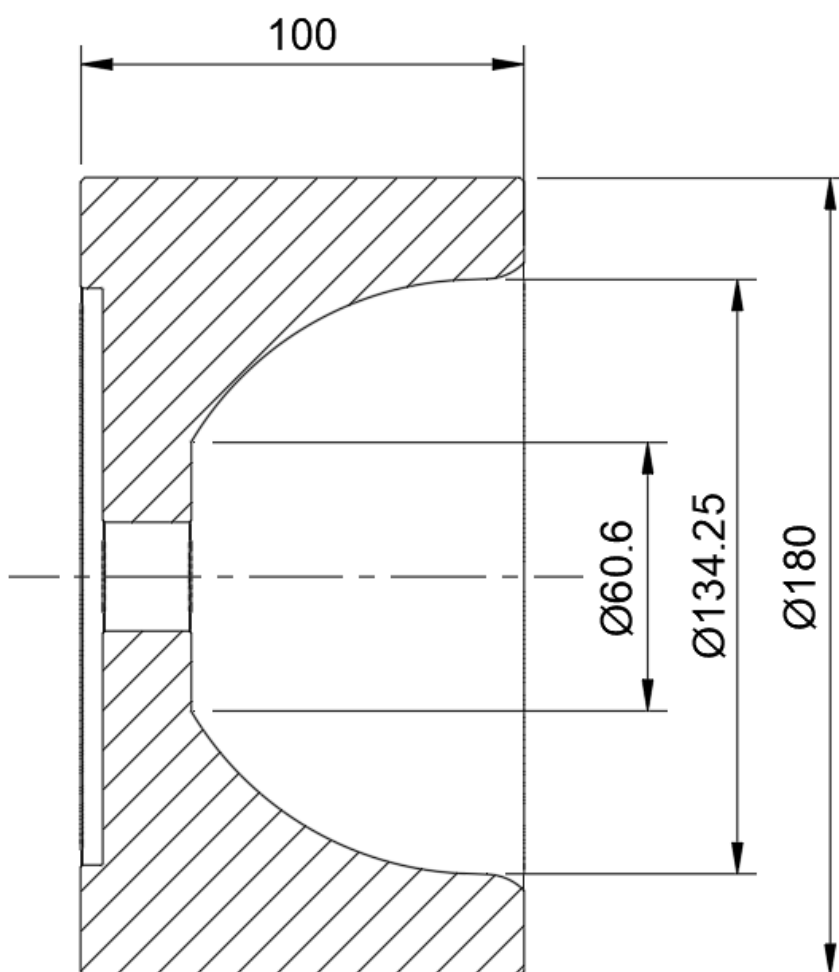
Tabulka 8: Naměřené průměry vzorků

Vzorek	Vnější průměr D [mm]				Ovalita [%]
	osa x	osa y	45°	125°	
A	89,19	89,01	89,03	89,22	0,24
B	89,13	89,36	88,94	89,09	0,47
C	89,09	89,05	88,9	89,03	0,21
D	88,99	89,12	89,3	88,8	0,56
E	89,15	88,88	89,3	88,9	0,47
F	89,5	89,2	89,2	89,4	0,34
G	132,69	133,16	132,7	133,3	0,46

Dle normy ČSN EN 10219-2 pro svařované a duté profily tvářené za studena z konstrukčních ocelí musí profil splňovat podmínku $\pm 1\%$ vnějšího rozměru. Pro nominální hodnotu 89 mm je tedy hodnota tolerance $\pm 0,89$ mm. Pro nominální hodnotu 133 je hodnota tolerance 1,33 mm. Jak je vidět z naměřených hodnot v Tab. 8, všechny naměřené hodnoty leží v tolerančním pásmu. Z naměřených průměrů byla následně vypočtena ovalita dle vztahu (6.1), která by neměla přesáhnout 2 %. Z hodnot v Tab. 8 tedy vyplývá, že i hodnota ovality odpovídá předepsaným hodnotám.

7. Ověření průběhu tvářecího procesu pomocí reálného nástroje

Experiment byl prováděn na dodaném nástroji, který byl z výroby vyřazen. Z toho důvodu bylo nutné ho v první fázi vyčistit a zkontrolovat, zda odpovídá jeho geometrie a rozměry předepsaným údajům z výkresové dokumentace. Zasláný nástroj byl pro zpracování trubek o průměru 133 mm, která se zužovala na vnitřní průměr trubky 88,9 mm.



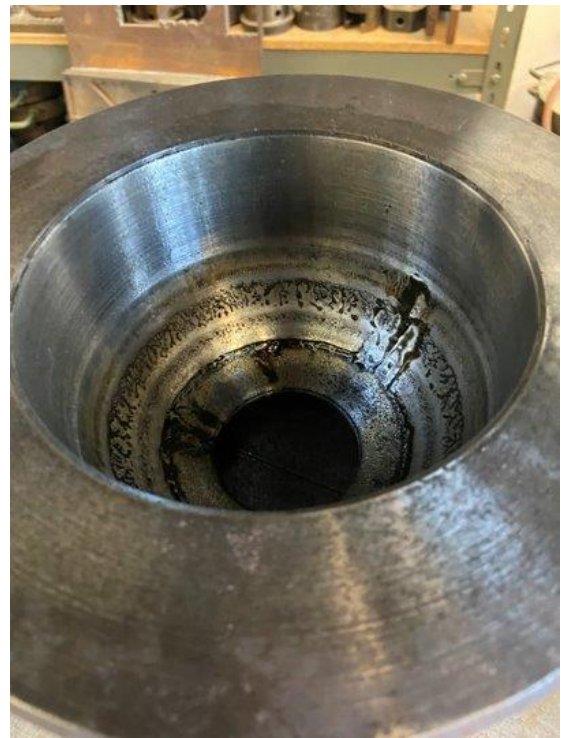
Obrázek 24: Nástroj pro tváření trubky s vnějším průměrem 133 mm

Dále se na hydraulický zkušební stroj ZD100, na kterém experiment probíhal upevnily ocelové bloky, na které se nástroj položil a na beran zkušebního stroje se upnula tlačná deska.

Tváření trubkového profilu probíhalo v několika krocích, přičemž se po každém kroku zaznamenávala celková délka profilu, vnitřní průměr a síla a posuv nástroje. V každém kroku se síla zvyšovala o 50 kN. Počáteční síla byla 100 kN a konečná 300 kN, kde již bylo dosaženo požadovaného vnitřního průměru. Celé toto měření proběhlo na dvou profilech, které byly dodány. Výsledky se u obou trubek shodovaly, takže se dají považovat za uspokojivé.



Obrázek 26: Fotografie procesu



Obrázek 25: ukázka nástroje

6.10.2 Naměřené hodnoty

Vnitřní průměr a délka trubky byly měřeny posuvným měřítkem. Síla a posuv nástroje se odečítaly ze stroje.

Tabulka 9: Výsledky experimentu, nahoře experiment 1, dole experiment 2

Krok	vnitřní průměr [mm]	síla [kN]	posuv [mm]	délka trubky [mm]
1	112,7	100	23,5	120,5
2	105,7	150	30	120
3	99,4	200	35	119,5
4	92,9	250	40	118,4
5	86,8	300	44	117,4

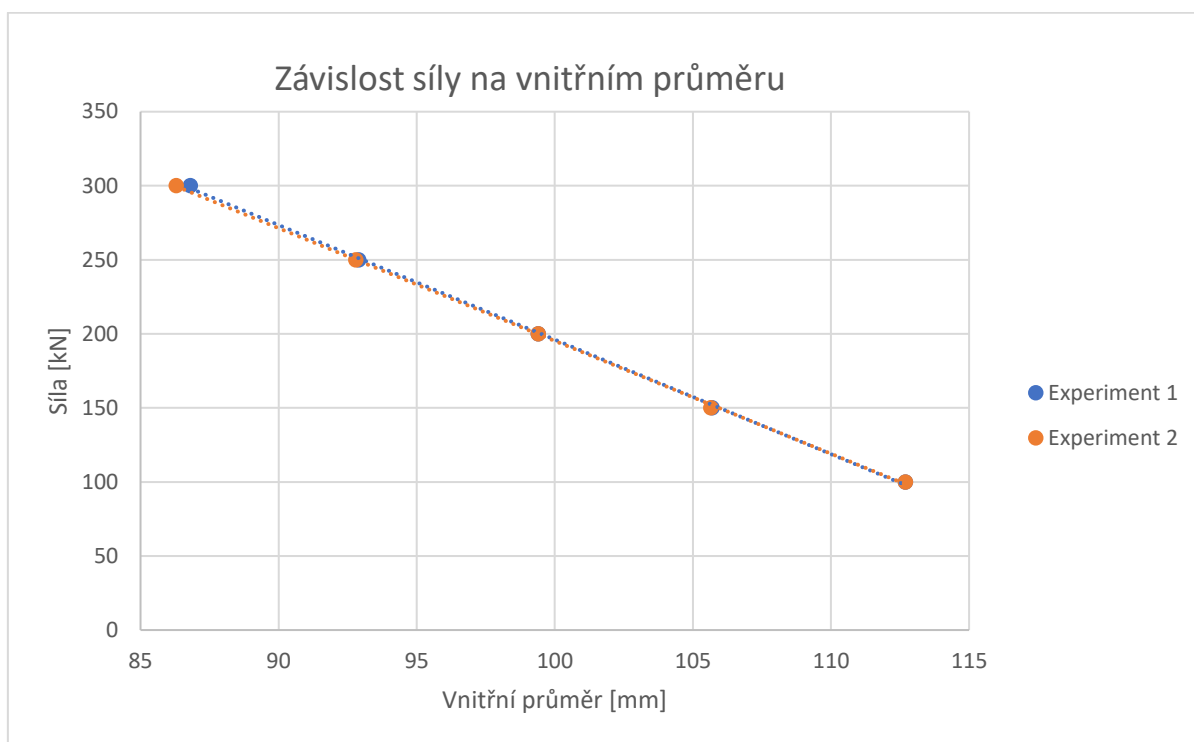
Krok	vnitřní průměr [mm]	síla [kN]	posuv [mm]	délka trubky [mm]
1	112,7	100	23	120,9
2	105,65	150	29	120,4
3	99,4	200	34,5	119,6
4	92,8	250	39,5	118,8
5	86,3	300	44	118,6

Oba experimenty vyšly velice podobně. Můžeme tedy předpokládat, že jsou hodnoty vypovídající a můžeme je dále použít pro vstup do matematických simulací a pro následné porovnání právě s těmito simulacemi.

Z naměřených hodnot byly sestrojeny pro lepší interpretaci výsledků grafy. Níže jsou uvedeny grafy pro závislost síly na posuvu, závislost posuvu na vnitřním průměru a závislost síly na vnitřním průměru.

Pro praktické závěry je důležité vyhodnotit zejména závislosti síly a posuvu na vnitřním průměru, protože se nabízí možnost na základě těchto parametrů celý proces řídit, tedy zajistit správné vyrobění konečného vnitřního průměru zaoblené části. Závislost posuvu na síle je naopak vypovídající spíše pro porovnání s následnou matematickou simulací.

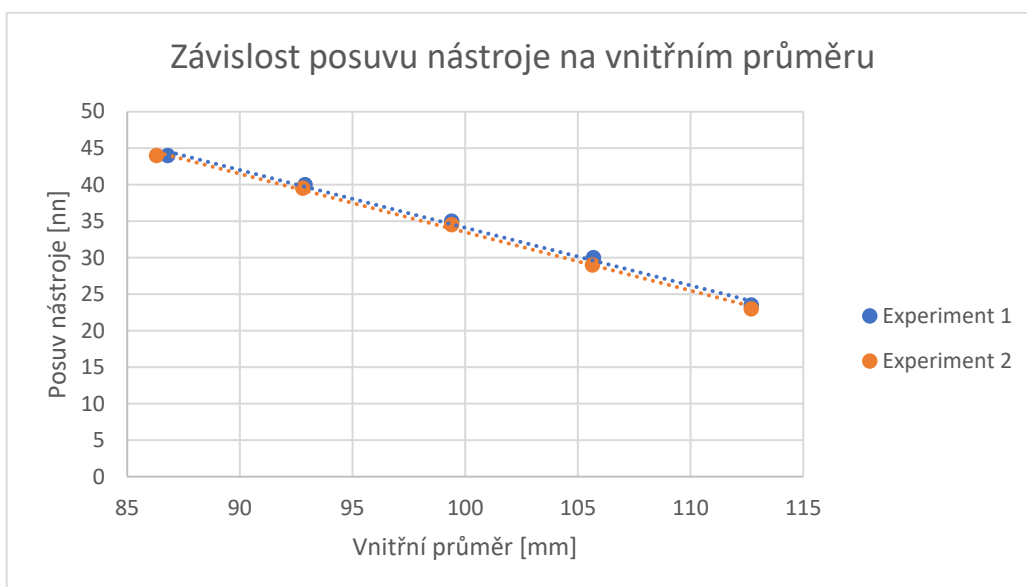
6.10.3 Závislost síly na vnitřním průměru



Obrázek 27: Závislost síly na vnitřním průměru trubky

Z obou experimentů zanesených v Obr. 27 vyplývá, že ideální síla pro dosažení požadovaného průměru 89,9 mm je přibližně 274 kN. Tato hodnota se může mírně lišit v závislosti na odměřování síly z analogové stupnice zkušebního stroje, či nepřesného odměřování. Nabízí se zde však možnost otestovat proces na několika trubkách, kde by se tváření zastavilo vždy přesně na této hodnotě a následně by se kontrolovaly hodnoty průměrů.

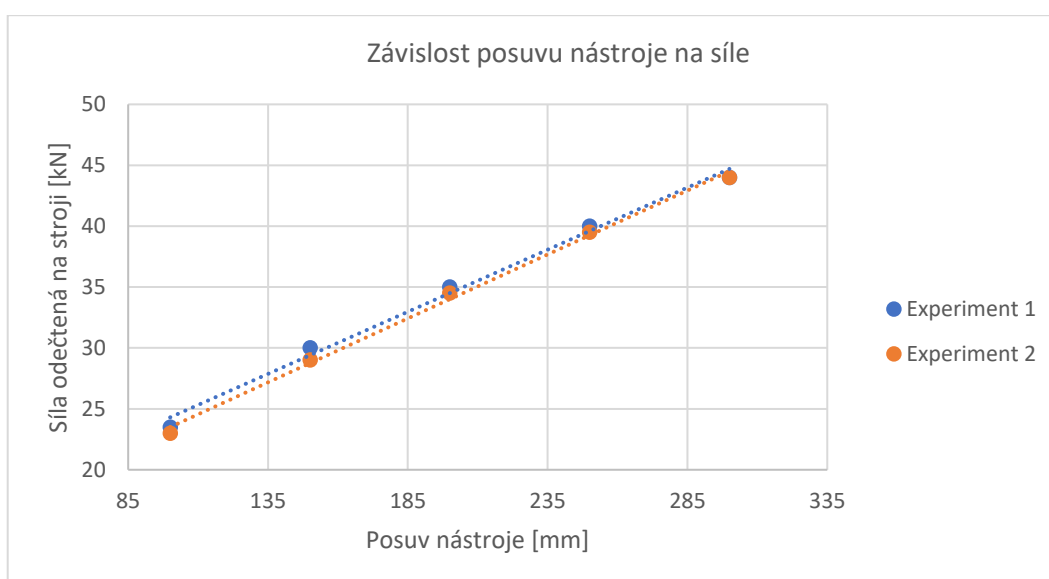
6.10.4 Závislost posuvu na vnitřním průměru



Obrázek 28: Závislost posuvu na vnitřním průměru

Ze závislosti posuvu na vnitřním průměru tvářené trubky je možné odečíst hodnotu posuvu přibližně 34,9 mm. Stejně jako při ladění procesu na ukončení dle maximální síly se nabízí možnost otestovat ukončení procesu na vykonanou dráhu nástroje. Pokud by se zjistilo, že jsou výsledky konstantní pro konstantní dráhu nástroje, bylo by možné odladit přesnou hodnotu a proces takto řídit.

6.10.5 Závislost posuvu na síle



Obrázek 29: závislost posuvu na síle

Závislost posuvu na síle je zde uvedena hlavně pro další potřeby porovnání s matematickou simulací. Stejně jako u předchozích grafů jsou pro obě zkoušené trubky výsledky téměř totožné, což je pro případnou optimalizaci procesu pozitivní.

6.10.6 Celkové zhodnocení

Hlavním pozitivem experimentu je, že dvě různé trubky, z různých dodávek materiálu nevykazují výrazné rozdíly ve výsledcích. V případě dalšího průzkumu by bylo vhodné dodat více materiálu a udělat větší vzorek hodnot. Pokud by se potvrdilo, že odchylky vstupního materiálu nemají zásadní vliv na proces, bylo by možné poměrně jednoduše proces experimentálně vyladit i na poměrně těsnou toleranci výsledného průměru.

6.10.7 Vizuální kontrola tvářené trubky

Při vizuální kontrole zkušebních kusů vyšlo najevo, že na nich již při krátké délce vzniká deformace vzpěrem. Tato deformace je viditelná pouhým okem, ale byla ověřena i pravítkem přiloženým na bok trubky, kdy před zkouškou dokonale přiléhalo, ale po zkoušce byl vidět značný průsvit světla ve střední části trubky.

Dalším problémem, který byl vidět již pouhým okem byl vznik „varhan“ na zaoblené části trubky. Toto však vzniklo pouze při použití tuhého maziva (Obr. 30), které bylo při dalších zkouškách nahrazeno olejem (Obr. 31 a Obr. 32). Po úpravě tření mezi nástrojem a trubkou byl tento problém eliminován. Výsledky zkoušky s tuhým mazivem byly tedy odstraněny a použity jsou výsledky, kde byl použit mazací olej.

Dalším problémem viditelným pouhým okem je oblast svaru, kterým se však tato práce nezabývá. Od této oblasti se očekává, že bude problémová a nabízí se zde možnost k případnému dalšímu průzkumu. Deformace v oblasti svaru je možné vidět na Obr. 32.



Obrázek 31: Experiment 1 - použití mazacího oleje



Obrázek 30: Neplatná zkouška - použití tuhého maziva



Obrázek 32: Experiment 2 - použití mazacího oleje

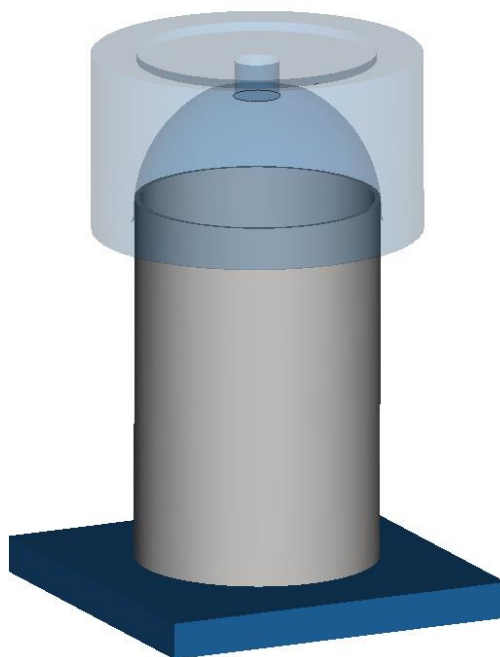
8. Numerická simulace procesu

6.11 Princip a nastavení

Numerická simulace probíhala v programu Simufact Forming na základním materiálovém modelu S235, který svým chemickým složením a mechanickými vlastnostmi odpovídal našemu materiálu S235JRH.

Do simulace byly nahrány modely vytvořeny dle zaslaných výkresů nástroje a dle zadané trubky. Pro simulace byl použit hydraulický lis s nastaveným zdvihem, u kterého víme, že bude dle reálného experimentu stačit pro vytvoření průměru 89,9 mm. Pro nástroje byla zvolena nástrojová ocel DB.20MnCr5, která však neměla na simulaci vliv, protože byly nástroje nastaveny jako dokonale tuhé. Teploty nástrojů byly nastaveny na 20 °C. Na tuto teplotu byly vytemperovány i nástroje pro reálný experiment. Po několika testech simulace byla pro trubku zvolena tetragonální síť neboli v angličtině mesh.

Požadavkem na proměnnou v této simulaci bylo primárně tření mezi nástrojem a trubkou, proto se dělalo několik simulací s různými třeními. Tření bylo voleno z přednastavených možností pro ocel (good – medium – bad).



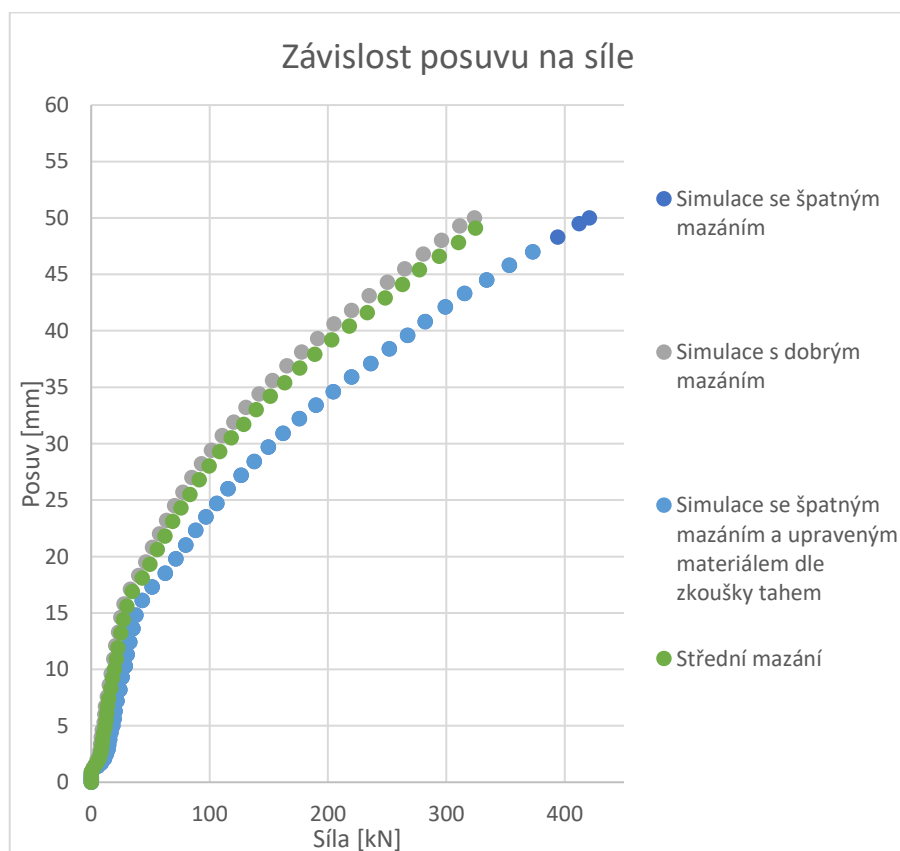
Obrázek 33: Připravená simulace

6.12 Vyhodnocování

Ze simulace se vyhodnocovalo několik závislostí. Nejdůležitějšími byly pro další porovnávání zejména tyto.:

6.12.1 Dráha nástroje (posuv) – síla nástroje

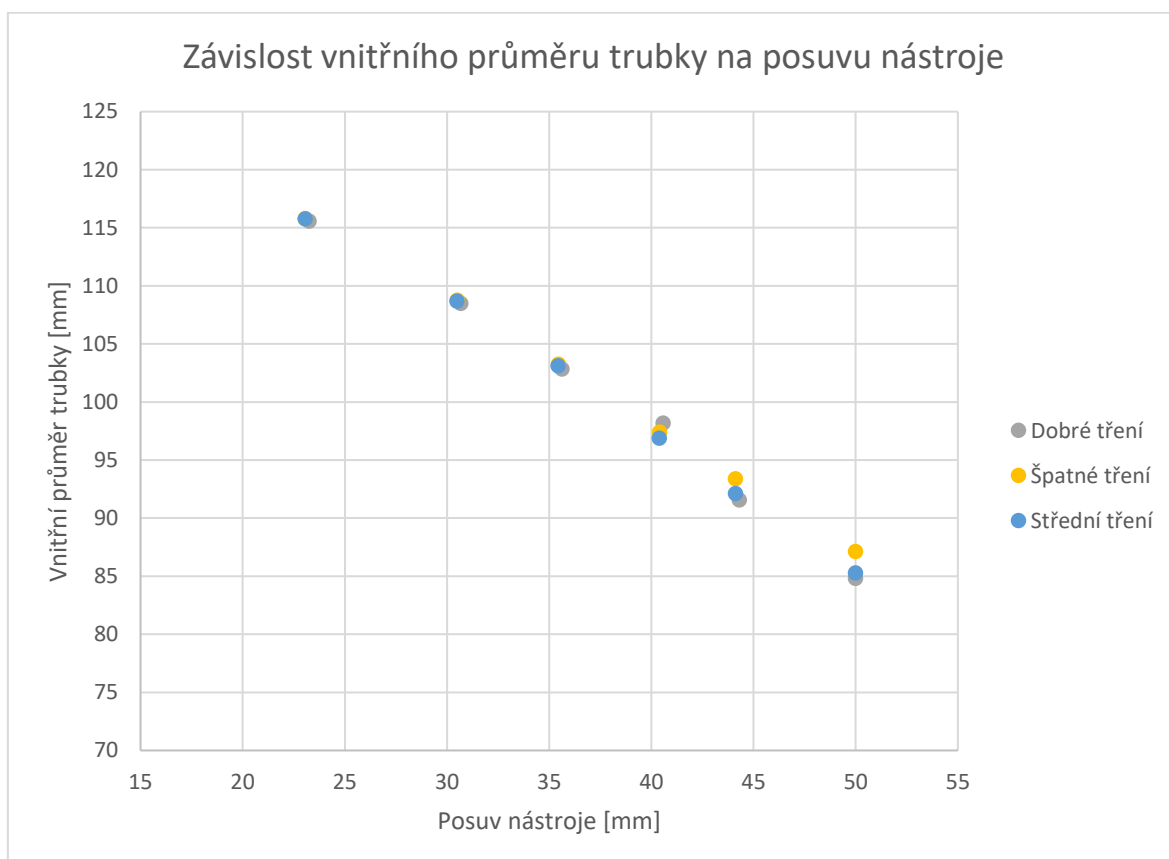
Tyto parametry se generovaly přímo z programu Simufact Forming. V grafu (viz Obr. 34) jsou znázorněny čtyři simulace. V první simulaci, nazvané jako simulace se špatným mazáním, je nastaven koeficient tření 0,2. V druhé simulaci nazvané simulace s dobrým třením je nastaven koeficient tření 0,05. Třetí simulace je nastavena se středním koeficientem tření 0,1. Následně byla ještě provedena čtvrtá simulace, kdy byl zanechán koeficient tření 0,2, ale byl upraven materiálový model na základě tahových zkoušek. Na grafu je vidět, že se křivka pro simulaci s nástrojem S235 z knihovny překrývá s materiálem nastaveným dle tahových zkoušek. Z tohoto důvodu se následně používal již pouze jen materiál z knihovny Simufact Formingu.



Obrázek 34: Závislost posuvu na síle ze simulace

6.12.2 Dráha nástroje – vnitřní průměr trubky

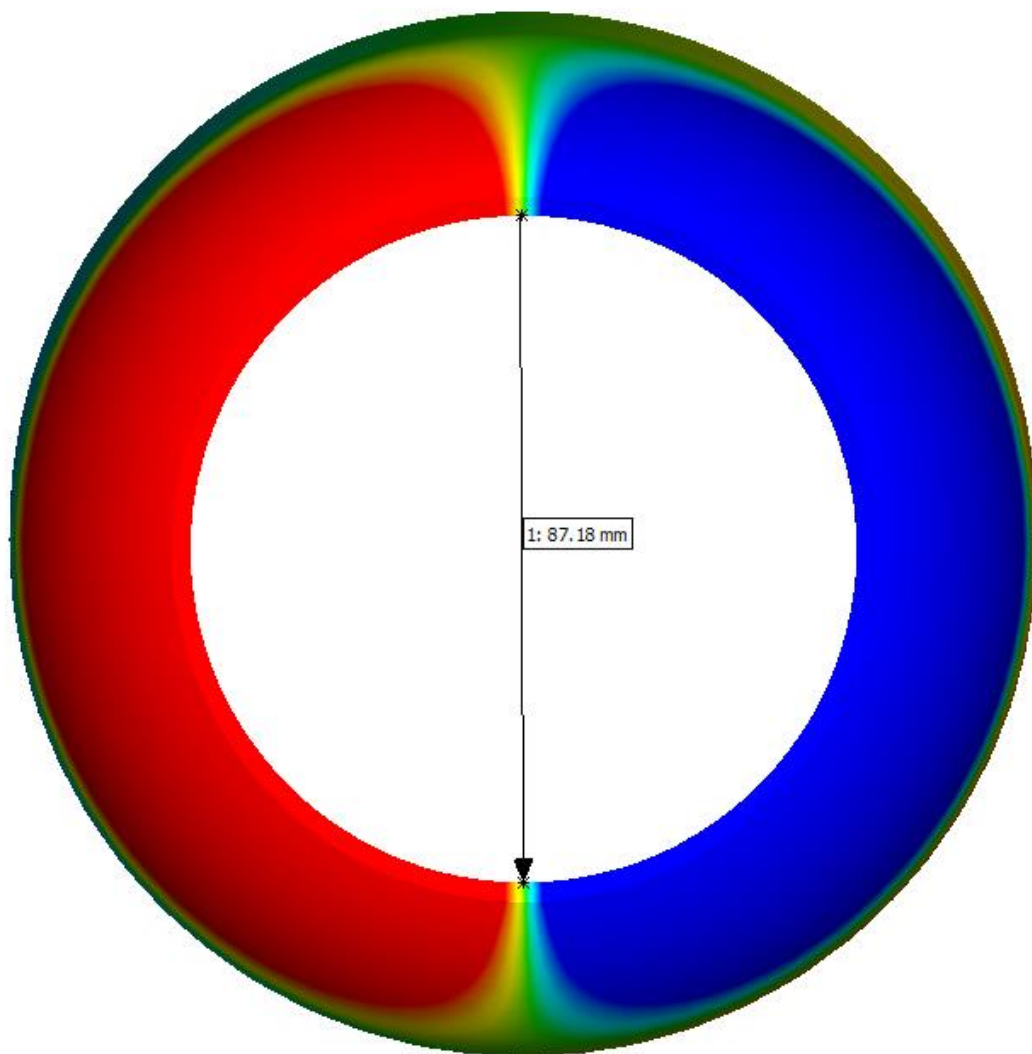
Závislost dráhy nástroje na vnitřním průměru trubky se odečítala tak, že se nastavovaly časové intervaly, ve kterých byla určitá hodnota posuvu. V těchto místech se následně pomocí funkce měření ručně měřila vzdálenost ve dvou bodech viz Obr. 36. Byla snaha tyto dva body dávat vždy přesně do osy, ale i přes to bylo při opakovaném měření vždy dosaženo mírně odlišných hodnot. Tyto rozdíly se pohybovaly v řádech desetin milimetru.



Obrázek 35: Závislost posuvu nástroje na vnitřním průměru trubky

6.12.3 Ideální síla pro vytvoření průměru 88,9 mm

Při porovnávání ideální síly pro vytvoření průměru 88,9mm vyšlo, že při reálném experimentu bylo této hodnoty teoreticky dosaženo při posuvu nástroje 42,3 mm a při optimalizované simulaci, která nejlépe odpovídala reálnému experimentu vyšlo 47,8 mm. Z grafu (Obr. 34) je možné odečíst, že při posuvu 42,3 mm byla při experimentu síla přibližně 280 kN. Při optimalizované simulaci byla přibližně 283 kN.

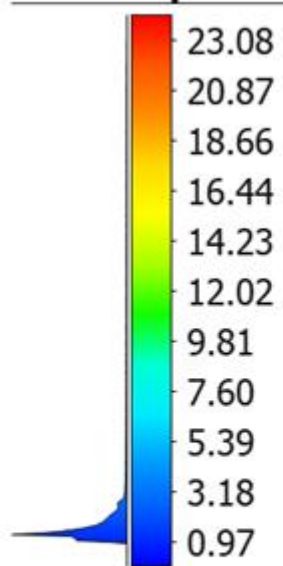


Obrázek 36: Způsob odměřování průměru

6.12.4 Závěrečné zhodnocení simulací

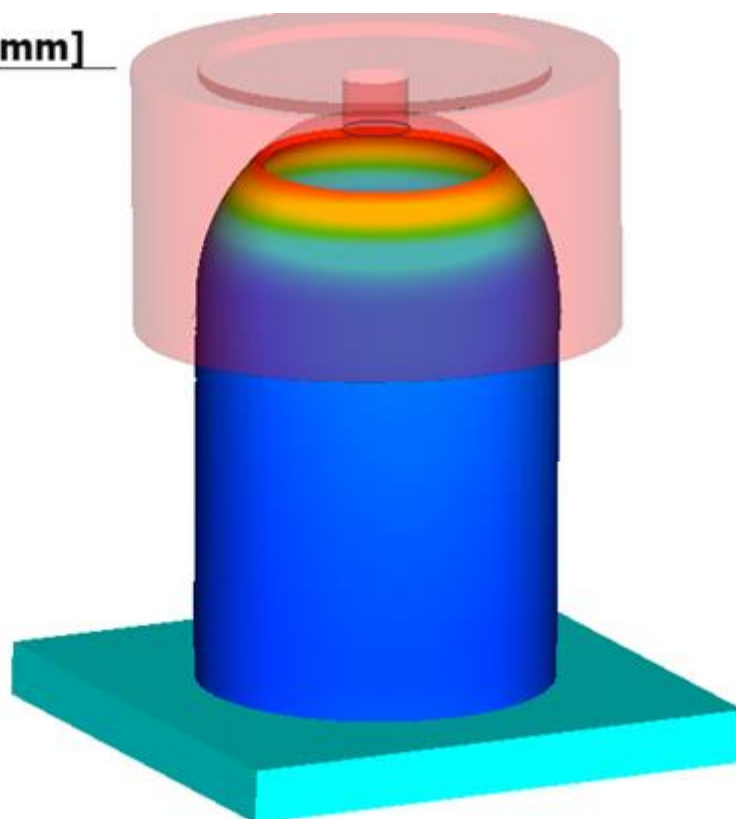
Dle očekávání je z výsledků patrné, že na sílu, kterou musí stroj vyvinout pro dosažení určitého posuvu hraje tření velký vliv. Dále se potvrdil předpoklad, že výsledný průměr konce tvářeného profilu je přímo závislý na poloze nástroje. Z tohoto faktu tedy vyplývá, že pokud není zajištěno konzistentní mazání, je vhodnější proces řídit na základě posuvu nástroje, a ne na základě síly. Dále je nutné zohlednit, jaký stroj se využije v reálné výrobě. Zvolený stroj musí mít dostatečnou sílu, aby byl schopen dosáhnout požadované koncové polohy nástroje.

Total displacement [mm]



max: 23.08

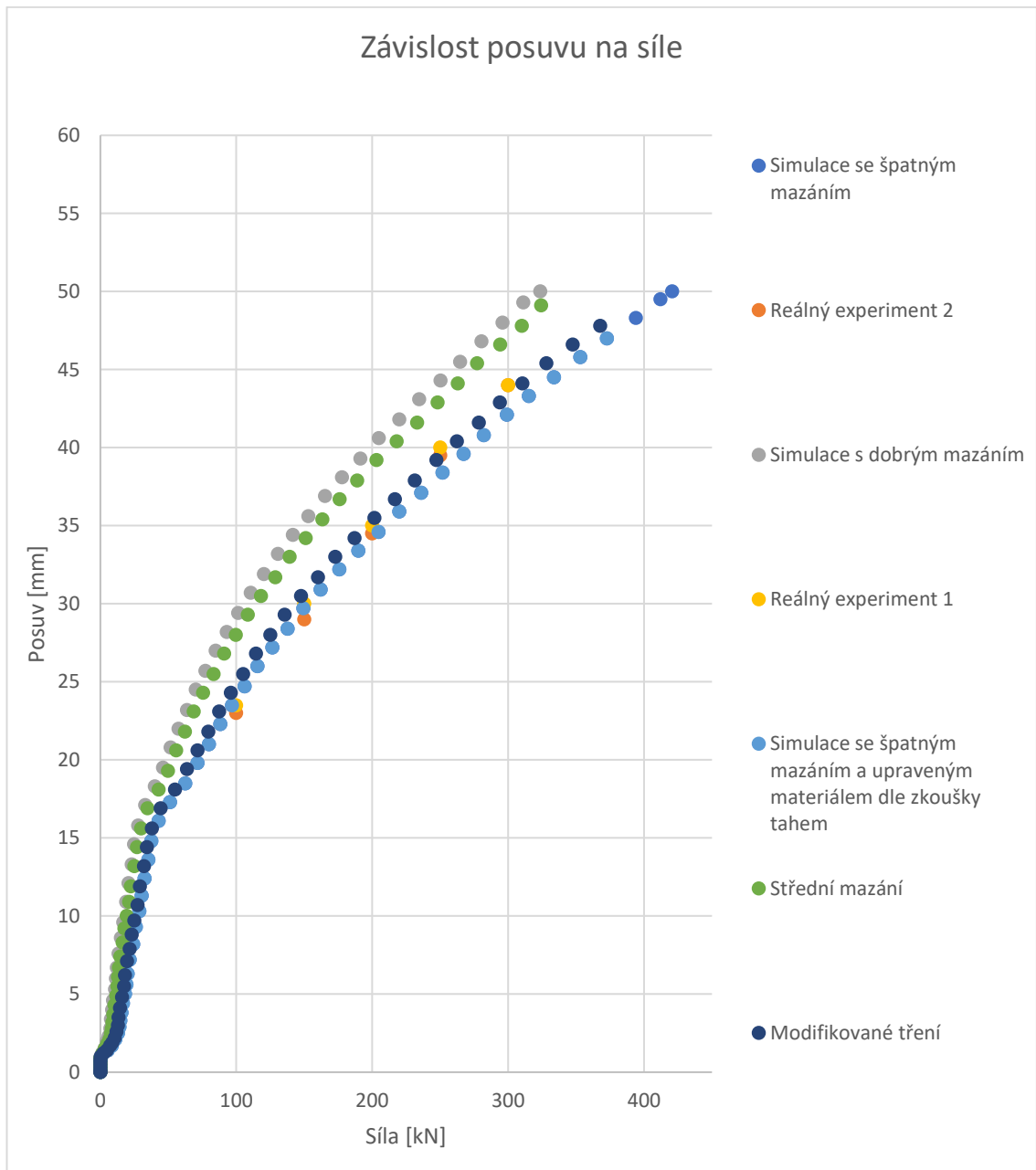
min: 0.00



Obrázek 37: Ukončení simulace při posuvu 50 mm

9. Porovnání numerické simulace s reálným experimentem

Hlavním cílem bylo, co nejlépe napodobit matematickou simulaci s reálným experimentem. Dosažení parametrů, které by odpovídaly reálnému experimentu by velice zjednodušilo optimalizaci celého procesu. Možnost optimalizovat proces pouze virtuálně by znamenalo velkou úsporu času, materiálu a výrobních kapacit.



Obrázek 38: Závislost posuvu na síle pro všechny hodnoty

6.13 Změna tření

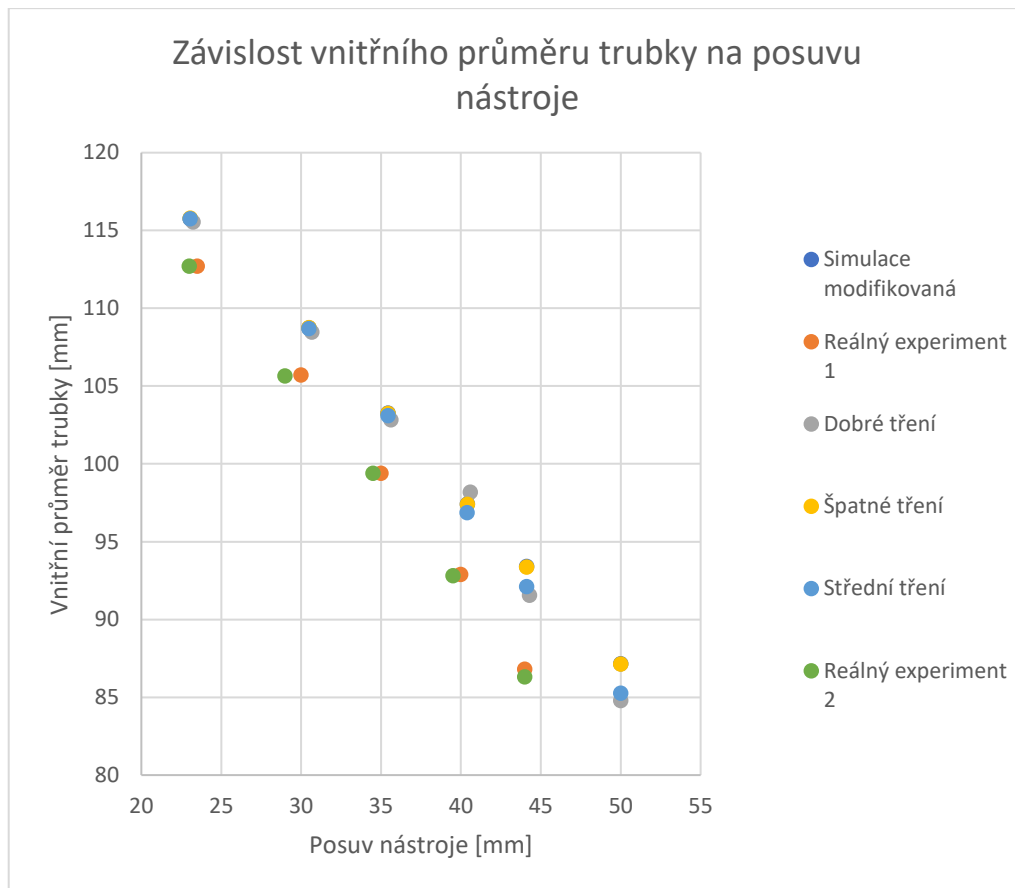
V prvotní fázi proběhly tři simulace s třením, které vycházely z předvolených možností definice tribologického systému v programu Simufact Forming – špatné, střední a dobré. Všechny tři možnosti vycházely z Coulombova zákona tření, přičemž špatné tření mělo koeficient tření 0,2, střední 0,1 a dobré 0,05. Na základě těchto tří experimentů bylo nakonec ještě použito tření s koeficientem 0,17, v grafu pojmenované jako modifikované, které nejlépe odpovídá reálnému procesu.

6.14 Simulace se špatným třením a modifikovaným materiálem

Úkolem této simulace bylo zjistit změnu chování při modifikaci materiálového listu na základě dat získaných zkouškou tahem. Pro tento experiment byl zvolen vzorek B2. Jak ukázal graf, křivka vycházející ze základního materiálového modelu S235 z knihovny programu Simufact Forming se překrývá s křivkou pro stejnou simulaci, kde je upraven materiálový model na základě zkoušek tahem. Z tohoto důvodu se již v dalších testech materiál neměnil.

6.15 Zhodnocení porovnání závislosti posuvu na síle

Z grafu je patrné, že při nastavení koeficientu tření 0,17 je možné velmi přesně simulovat reálný proces. Malé odchylky mezi reálným experimentem a takto nastavenou simulací mohly vzniknout pravděpodobně tím, že hodnoty při reálném experimentu (síla i posuv) byly odečítány z analogové stupnice. U posuvu je tak přesnost odečítání přibližně půlka dílku stupnice, který byl v tomto případě 1 mm. U síly mohla vzniknout podobná chyba, která by mohla být až 1 kN. Z tohoto důvodu budeme považovat výsledky simulace se základním materiálovým modelem a koeficientem tření 0,17 za vyhovující.

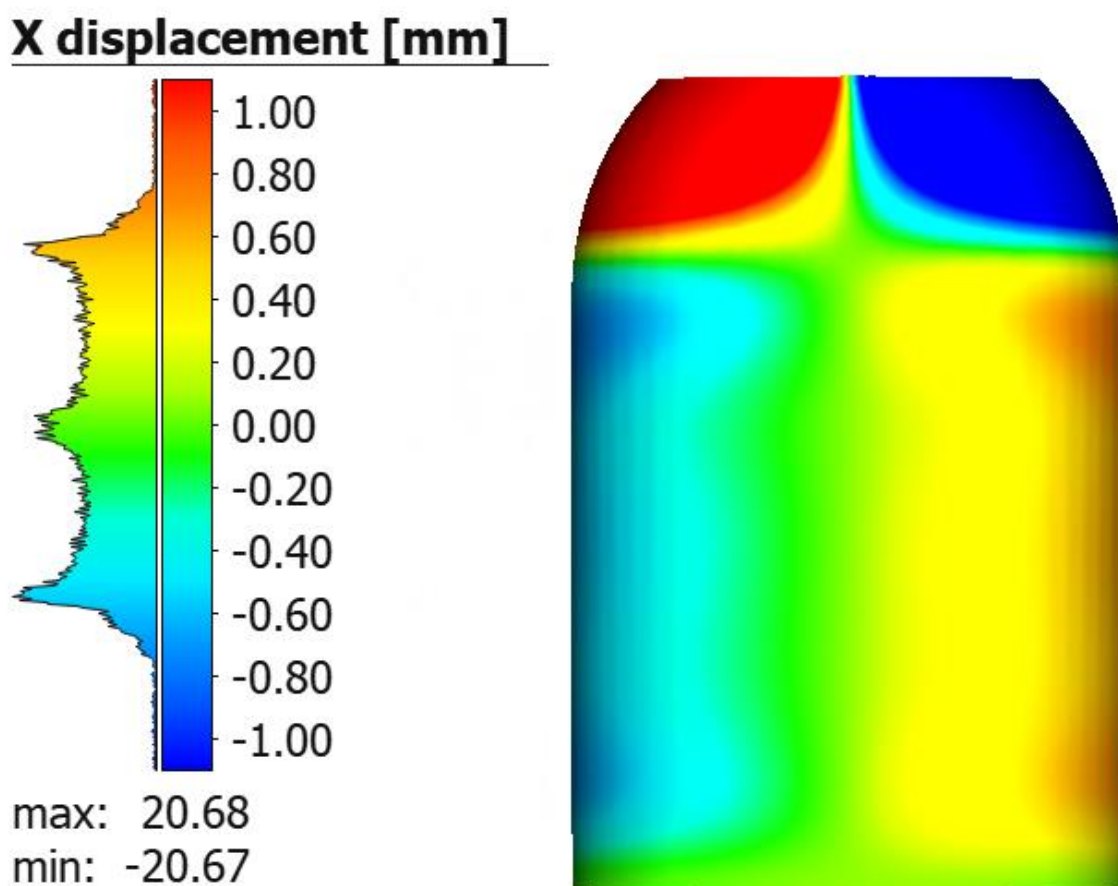


Obrázek 39: závislost vnitřního průměru na posuvu nástroje

Z grafu (Obr. 39) je patrné, že i přes to, že byla simulace vyladěna na závislost posuvu na síle se výsledky závislosti průměru na posuvu mírně odchyľují od reálných experimentů. Jelikož se jedná o řády nízkých jednotek milimetrů, je možné, že rozdíl vznikl nepřesným odměřováním. Zároveň je i možné, že geometrie vyřazeného nástroje, který byl pro experimenty poskytnut již neodpovídal geometrii z modelu. V případě, že by se průměr nástroje lišil, dá se předpokládat, že při stejném posuvu jako v simulaci bude dosaženo jiného průměru. Nabízí se zde možnost detailnějšího proměření nástroje například na souřadnicovém měřícím stroji.

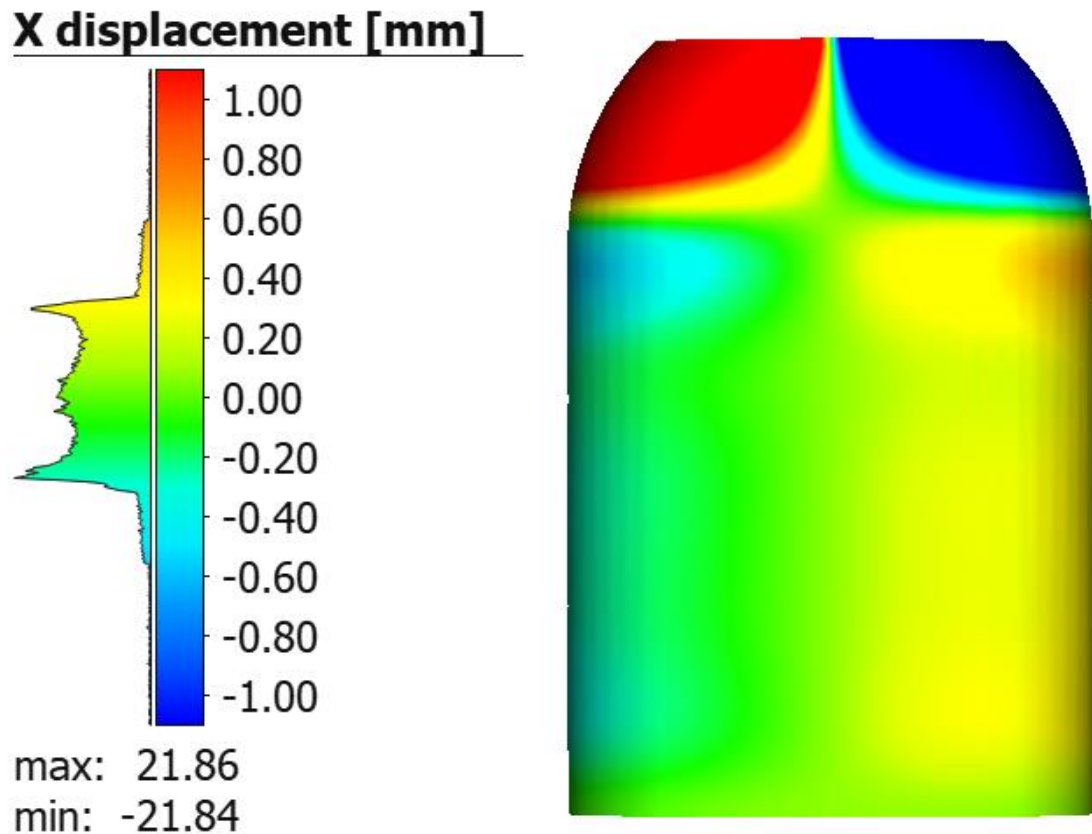
6.16 Ověření deformace vzpěrem

Obr. 40 vychází ze simulace, která na základě závislosti „síla – posuv“ nejvíce odpovídala reálnému procesu. Na Obr. 40 je vidět, že deformace vzpěrem, která vznikala při reálném experimentu se potvrdila i při matematickém modelování. Pro správné zobrazení těchto deformací bylo upraveno měřítko odchyly bodů v ose x od (-1 mm do 1 mm). V nejkritičtějších místech se pohybuje kolem 1 mm, což odpovídá deformaci, která byla již okem viditelná.



Obrázek 40: ověření vzpěru při modifikovaném mazání (koeficient 0,17)

Při kontrole simulace, kde byl nastaven nízký koeficient tření (0,05) (Obr. 41) je patrné, že při tomto tření vznikají menší deformace. V nejkritičtějších místech se pohybují kolem 0,3 mm, tedy více než třikrát menší.



Obrázek 41: Deformace vzpěrem při snížení tření

6.16.1 Zhodnocení deformace vzpěrem

Dle očekávání se potvrdilo, že tato deformace, která se objevila při reálném experimentu, se objeví také na simulacích. Zajímavé je pozorovat její změnu v závislosti na změně tření, mezi trubkou a nástrojem. Jednoznačně je možné určit, že pokud bychom potřebovali tyto deformace potlačit, je nutné zvolit jinou metodu mazání v průběhu procesu tváření.

10. Závěr

Tato práce měla za úkol řešit tváření konců trubek, které se provádí při výrobě sloupů veřejného osvětlení. Důvodem řešení tohoto problému bylo zavedení stability do procesu, protože stabilní proces je základem pro správné fungování navazujících technologií.

Z reálného procesu bylo zjištěno několik nedostatků, které by měla tato práce pomoci vyřešit. Jedním z nich je nutnost vytvoření přesného průměru trubky v zaoblené části. Jedná se primárně o to, jak proces řídit, aby bylo dosaženo právě tohoto průměru a jak konzistentně je možné toto provádět. Druhý nedostatek, které bylo třeba zmapovat byl vznik deformace vzpěrem při lisování. Deformace, které vznikaly již při krátké délce trubky by měly pomoci navrhnout metody, které by zamezily tomuto vzniku.

Zmapování procesu probíhalo v několika fázích. V první fázi bylo nutné ověřit vstupní materiál. Z trubek, které byly dodány se po rozvinutí vyřezaly zkušební vzorky, se kterými byla provedena zkouška tahem. U ostatních trubek byla ověřena geometrie. Měřily se tloušťky stěn po celém obvodu a hodnoty vnějšího průměru ve třech místech.

Ve druhé fázi byl pomocí dodaného nástroje proveden experiment na hydraulickém zkušebním zařízení. Experiment probíhal tak, že se na beran zkušebního zařízení upnula tlačná deska a pod ní se položily ocelové bloky, na které se umístil nástroj. Následně se do nástroje položila trubka a v několika krocích se provedlo lisování. Po každém kroku byly zaznamenávány hodnoty síly a posuvu na zkušebním zařízení. Dále se po každém kroku vyjmula trubka z nástroje a měřil se vnitřní průměr a celková délka trubky. Po ukončení lisování se vizuálně trubka kontrolovala a přikládalo se pravítko pro zjištění deformace vzpěrem.

Ve třetí fázi byly provedeny matematické simulace. Hlavním cílem simulací bylo nastavení vstupních parametrů tak, aby výsledky co nejlépe odpovídaly reálnému experimentu, díky čemuž by bylo následně možné celý proces optimalizovat bez nutnosti reálných zkoušek.

Na základě vyhodnocení vstupního materiálu vyšlo najevo, že většina materiálu byla v souladu s dodanými materiálovými listy z pohledu mechanických vlastností i geometrických vlastností. Největší problém, který nastával, byla často velmi vysoká mez kluzu. Nastávaly případy, kde se mez kluzu velmi blížila mezi pevnosti a díky tomu byla u některých vzorků velmi nízká mez plasticity.

Z reálného experimentu vyšlo najevo, že ze dvou dodaných taveb materiálu experimenty odpovídaly, což je pozitivní a značí určitou konzistenci procesu. Z experimentu byly zaznamenány určité hodnoty, které se následně porovnávaly s matematickou simulací.

Z matematických simulací vyšlo najevo, že v procesu není ideálně vyřešeno mazání mezi nástrojem a trubkou. I na základě toho můžeme předpokládat, že dochází ke ztrátě stability a vzniká deformace vzpěrem již při krátké délce trubky. Ze simulací byly navrženy hodnoty, na základě kterých by bylo možné proces řídit. Bylo by však vhodné tyto parametry dále zkoušet, až budou chodit další tavby materiálu.

Z porovnání experimentu a simulace je patrné, že se podařilo určit hodnotu tření mezi materiálem a nástrojem. Mírně se však lišily závislosti posuvu na vnitřním průměru. Pravděpodobně to bylo zapříčiněno poškozeným nástrojem, který byl již vyřazen z výroby. Toto by bylo vhodné dále prověřit například na souřadnicovém měřícím stroji.

Jelikož bude práce pokračovat s tím, jak budou poskytovány další materiálové tavby, je vhodné nastínit několik doporučení. Prvním doporučením je detailnější průzkum materiálů, které měly velmi vysokou mez kluzu a nízkou mez pevnosti a porovnání s materiály, které měly naopak mez kluzu nízkou a mez pevnosti vyšší. Zmapovat tedy na experimentech chování u materiálů, které měly velkou zásobu plasticity a velkou tažnost s materiálem, který měl tyto parametry nižší. Dále by bylo vhodné, po poskytnutí dalších trubkových profilů vykonat další experimenty a rozšířit tak vzorek výsledků. Důležité je také prozkoumat oblast svaru na trubce. Tato problematika nebyla

cílem této práce, ale již z výsledků tahových zkoušek, pro tuto oblast je patrné, že tento problém nebude zanedbatelný, což se potvrdilo i při vizuální kontrole výlisku při reálném experimentu. Tento problém je možné zahrnout také do simulace, kde by se pro oblast svaru nastavily materiálové hodnoty ze zkoušky tahem právě ze vzorků, které obsahovaly svar.

Z této práce vyplývá několik návrhů, pro stabilizaci procesu. Jedním z nich je řízení procesu buď na základě posuvu nebo na základě síly. Z dosažených výsledků se zdá, že by bylo vhodnější použít řízení na základě posuvu, ale pro konečné rozhodnutí by bylo nutné provést více zkoušek a ověřit, který z těchto procesů bude v reálném procesu konzistentnější. Dalším návrhem, pro zlepšení stability je snaha o lepší mazání mezi nástrojem a polotovarem, čímž by se měla omezit deformace vzniklá vzpěrem.

11. Reference

- [1] Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy), Praha: Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [2] J. PETRUŽELKA, Úvod do tváření I., Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita,, 2001.
- [3] p. LENFELD, „Technologie tváření kovů. Technologie II,“ Technická univerzita Liberec, Liberec, 2020.
- [4] T. u. v. L. - F. strojní, „ksp.tul.cz,“ [Online]. Available: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm.
- [5] M. a. M. P. FOREJT, Teorie obrábění, tváření a nástroje, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
- [6] C. prof. Ing. Radek ČADA, „TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLÉVÁNÍ,“ VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Ostrava, Ostrava 2013.
- [7] spszengrova, „spszengrova.cz,“ [Online]. Available: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT4_1-teorie_tvareni_SPU.pdf.
- [8] J. KOTOUČ, Teorie a metodika tváření: návody ke cvičení, Praha: České vysoké učení, 1992.
- [9] K. a. Z. P. MACEK, Nauka o materiálu, Praha: České vysoké učení technické, 1996.

- [10] KARTHIK, V, R.J COMSTOCK, D.L HERSHBERGER a R.H WAGONER. Variability of sheet formability and formability testing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, 121(2-3), 350-362 [cit. 2022-08-12]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(01)01219-5
- [11] I. a. P. K. SCHINDLER, „Deformační chování materiálu: studijní opora,“ Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Ostrava, 2013.
- [12] Č. z. u. v. Praze, „Technologie Tváření,“ [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>.
- [13] J. PETRUŽELKA, Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření, Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita, 200.
- [14] L. m. z. k. materiálů, „Laboratoř mechanického zkoušení kovových materiálů,“ INSTITUTE OF CHEMICAL TECHNOLOGI PRAGUE, [Online]. Available: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Mechanick%C3%A9%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20kovov%C3%BDch%20materi%C3%A1l%C5%AF.pdf?redirected>.
- [15] UPOL, „Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení,“ [Online]. Available: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf.
- [16] ZHANG, Zong Zhi, Jun Qi QIN, Chang Chun DI a Dong WANG. An Introductory Review of Mechanical Reliability Testing. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2014, 541-542, 1414-1418 [cit. 2022-08-13]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.541-542.1414

- [17] „Materiály 2 - Statické zkouška tahem,“ Zamek Kuřim, [Online]. Available: https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/13__Sada__Materialy__2/VY__32__INOVACE__13__05__Staticka__zkouska__tahem.pdf.
- [18] „Elektronická učebnice,“ [Online]. Available: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1566>.
- [19] E. a. J. S. ČIŽMÁROVÁ, *Nauka o materiálu I. a II*, Praha: České vysoké učení technické, 2014.
- [20] VSB, „Vlastnosti a zkoušení materiálů,“ [Online]. Available: https://homel.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni__VZM.pdf.
- [21] Matca, „Matca.cz,“ [Online]. Available: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>.
- [22] „wikiskripta.eu,“ projekt 1. lékařské fakulty a Univerzity Karlovy, 2018. [Online]. Available: https://www.wikiskripta.eu/w/Hook%C5%AFv__z%C3%A1kon.
- [23] I. K. Procházka, „Střední škola průmyslová a umělecká,“ 2011/2012. [Online]. Available: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM__III/VY__52__INOVACE__J-05-30.pdf.
- [24] VOREL, Ivan, Štípán JENÍČEK, Hana JIRKOVÁ a Bohuslav MAŠEK. Material and technological modelling of closed-die forging. *Materiali in tehnologije* [online]. 2016, 50(4), 499-503 [cit. 2022-08-13]. ISSN 15802949. Dostupné z: doi:10.17222/mit.2014.220
- [25] Kakov, „Zkoušky tvárnosti,“ [Online]. Available: <http://iucebna.kakov.cz/MTR1/MTR-I1-63h.pdf>.

- [26] „strojirenstvi.studentske.cz,“ 2022. [Online]. Available: <https://strojirenstvi.studentske.cz/2008/10/zkouky-tvrnosti-za-studena.html>.
- [27] „Technologické zkoušky - Zkoušky svařitelnosti,“ [Online]. Available: <https://docplayer.cz/10566341-Ovmt-technologicke-zkousky-zkousky-svaritelnosti.html>.
- [28] ELUC, „ELUC,“ [Online]. Available: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1568>.
- [29] A. E. E. E. S. HRIVŇÁK, Technológia plošného tvarnenia, Bratislava: Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1990.
- [30] I. Č. R. prof., Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody tváření, plošná tvářitelnost, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002.
- [31] L. PTÁČEK, Nauka o materiálu I., Brno: CERM, 2001.
- [32] M. F. G. a. K. N. DVOŘÁK, Technologie tváření: plošné a objemové tváření 2, Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1999.
- [33] V. Renner, „INTEGROVANÁ STŘEDNÍ ŠKOLA, SLANÝ,“ [Online]. Available: http://xyz12345.wz.cz/tmr/zkousky_tech.html.
- [34] U. kakov, „Ucebna kakov,“ [Online]. Available: <http://iucebna.kakov.cz/MTR1/MTR-I1-64h.pdf>.
- [35] R. Z. L. a. E. Š. SAMEK, Speciální technologie tváření: Část II, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011.
- [36] ČSN EN ISO 8491 (420324), Kovové materiály - Trubky (plného průřezu) - Zkouška, Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [37] ČSN EN ISO 8493 (420326), Kovové materiály - Trubky - Zkouška rozšiřováním, Praha: Český normalizační institut, 2005.

- [38] ČSN EN ISO 8492 (420325), Kovové materiály - Trubky - Zkouška smáčknutím, Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [39] V. Brno, „Metoda konečných prvků,“ [Online]. Available: http://www.old.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/Stud__opory/MKP4.pdf.
- [40] P. -. P. J. -. S. C. HARLEY, Numerical Modelling of Material Deformation Processes, London: Springer-Verlag, 1992.
- [41] IORDACHE, Dan-Alexandru, Paul STERIAN, Andreea Rodica STERIAN a Florin POP. Complex Computer Simulations, Numerical Artifacts, and Numerical Phenomena. *International Journal of Computers Communications & Control* [online]. 2014, 5(5), 744-754 [cit. 2022-08-13]. ISSN 1841-9836. Dostupné z: doi:10.15837/ijccc.2010.5.2234
- [42] C. BREBBIA, The boundary element method for engineers, London: Penetch, 1980.
- [43] P. -. P. P. BROŽ, Metoda okrajových prvků v inženýrské praxi, Praha: Praha: SNTL, 1987.
- [44] L. LINDGREN, Formulation and Modelling in Simulation of Material, Luleå: Luleå: TU,, 1998.
- [45] C. -. O. E. KRATOCHVÍL, Mechanika těles - počítače a MKP, Brno: VUT v Brně, 1987.
- [46] LI, Fu Guo, Xiao Na WANG a Xiao Lu YU. A New Optimization Method of Constitutive Equation for Hot Working Based on Physical Simulation and Numerical Simulation. *Materials Science Forum* [online]. 2008, 575-578, 402-407 [cit. 2022-08-13]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.575-578.402
- [47] <https://www.simufact.com/>, „simufact,“ [Online]. Available: <https://www.simufact.com/>. [Přístup získán 2022].

- [48] qform3d.com, „qform3d.com,” [Online]. Available: <https://www.qform3d.com/about>.
- [49] deform, „deform.com,” [Online]. Available: <https://www.deform.com/products/deform-3d/>.
- [50] ita-tech, „ita-tech.cz,” [Online]. Available: <https://www.ita-tech.cz/en/products-and-services/>.
- [51] transvalor, „transvalor.com,” [Online]. Available: <https://www.transvalor.com/en/forge>. [Přístup získán 2022].
- [52] PETRUŽILKA, J., BŘEZINA, R., *Tvařitelnost kovových materiálů*, Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2001

12. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma pružné (elastické) deformace a trvalé (plastické) deformace [4]	12
Obrázek 2: Deformace skluzem [5]	14
Obrázek 3: Znázornění deformace dvojčatěním [5]	15
Obrázek 4: Zrna před tvářením a zrna po tvářením [7]	15
Obrázek 5: Válcování za tepla [4]	16
Obrázek 6: Diagram tvařitelnosti podle LILETa, kde I. oblast je vhodná pro nejsložitější tažné operace II. oblast s převládající tlakovou deformací III. oblast s převládající tahovou deformací IV. oblast nevhodná pro hluboké tažení. [52]	19
Obrázek 7: pracovní diagram zkoušky tahem [22]	21
Obrázek 8: zkouška pěstování [27]	23
Obrázek 9: zkouška hloupení dle Erichsena [28]	23
Obrázek 10: Schéma zkoušky a) schéma přidržení plechu, b) tažení, c) sevření příruby d) porušení [31]	24
Obrázek 11: princip zkoušky lámavosti [31]	25
Obrázek 12: Princip zkoušky rozšiřování otvorů [32]	25
Obrázek 13: Princip zkoušky střídavým ohybem [33]	26
Obrázek 14: Princip zkoušky ohybem [34]	27
Obrázek 15: princip zkoušky rozšiřováním [34]	27
Obrázek 16: Princip zkoušky smáčknutím [34]	28
Obrázek 17: Schéma spoje	33
Obrázek 18: Fotografie laboratoře	37
Obrázek 19: místo odběru vzorku	38
Obrázek 20: náčrt zkušební vzorku	38
Obrázek 21: Příprava vzorků	39
Obrázek 22: Polohy pro měření tloušťky stěny	42
Obrázek 23: polohy pro měření průměru trubky	42
Obrázek 24: Nástroj pro tvářením trubky s vnějším průměrem 133 mm	46
Obrázek 25: ukázka nástroje	47
Obrázek 26: Fotografie procesu	47
Obrázek 27: Závislost síly na vnitřním průměru trubky	49
Obrázek 28: Závislost posuvu na vnitřním průměru	50
Obrázek 29: závislost posuvu na síle	50
Obrázek 30: Neplatná zkouška – použití tuhého maziva	52
Obrázek 31: Experiment 1 - použití mazacího oleje	52
Obrázek 32: Experiment 2 - použití mazacího oleje	52
Obrázek 33: Připravená simulace	53
Obrázek 34: Závislost posuvu na síle ze simulace	54

Obrázek 35: Závislost posuvu nástroje na vnitřním průměru trubky	55
Obrázek 36: Způsob odměřování průměru	56
Obrázek 37: Ukončení simulace při posuvu 50 mm	57
Obrázek 38: Závislost posuvu na síle pro všechny hodnoty	58
Obrázek 39: závislost vnitřního průměru na posuvu nástroje.....	60
Obrázek 40: ověření vzpěru při modifikovaném mazání (koeficient 0,17).....	61
Obrázek 41: Deformace vzpěrem při snížení tření	62

13. Seznam tabulek

Tabulka 1: Nástin výrobního postupu	34
Tabulka 2: Chemické složení materiálu	36
Tabulka 3: Mechanické charakteristiky materiálu	36
Tabulka 4: Předepsané hodnoty	40
Tabulka 5: Průměry naměřených hodnot zkouškou tahem	40
Tabulka 6: měření prodloužení posuvným měřidlem.....	41
Tabulka 7: Hodnoty tloušťky stěn.....	43
Tabulka 8: Naměřené průměry vzorků.....	44
Tabulka 9: Výsledky experimentu, nahoře experiment 1, dole experiment 2	48

Přílohy:

Příloha 1 – Měření tloušťky stěny

		tloušťka stěny T [mm]			
Vzorek	poloha	1	2	3	4
A	hodnota	2,73	2,73	2,76	2,74
	poloha	5	6	7	8
	hodnota	2,71	2,71	2,73	2,73
B	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,73	2,7	2,7	2,67
	poloha	5	6	7	8
C	hodnota	2,63	2,74	2,73	2,71
	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,67	2,69	2,66	2,7
D	poloha	6	7	9	11
	hodnota	2,68	2,6	2,7	2,72
	poloha	1	2	3	4
E	hodnota	2,78	2,78	2,75	2,79
	poloha	6	7	9	11
	hodnota	2,77	2,78	2,8	2,76
F	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,72	2,72	2,71	2,72
	poloha	6	7	9	11
G	hodnota	2,72	2,74	2,73	2,74
	poloha	1	2	3	4
	hodnota	2,77	2,8	2,8	2,75
H	poloha	6	7	9	11
	hodnota	2,77	2,8	2,8	2,82
	poloha	1	2	3	4
I	hodnota	2,81	2,88	2,78	2,81
	poloha	6	7	9	11
	hodnota	2,84	2,83	2,87	2,87
J	poloha	1	2	3	4
	hodnota	3,85	3,86	3,89	3,87
	poloha	6	7	9	11
K	hodnota	3,84	3,87	3,84	3,86
	poloha	1	2	3	4
	hodnota	4,55	4,56	4,51	4,55
L	poloha	6	7	9	11
	hodnota	4,6	4,53	4,53	4,57

Příloha 2 – Měření prodloužení posuvným měřítkem

Řada vzorků	Číslo vzorku	L ₁ [mm]	L ₀ [mm]	A _{p50} měřeno [%]	A _t ze stroje [%]	rozdíl [%]
A	1	69,69	50	39,38	-	-
	2	70,07	50	40,14	43,02	2,88
	4	70,91	50	41,82	45,36	3,54
	3-S	60,67	50	21,34	27,67	6,33
B	2	68,56	50	37,12	40,46	3,34
	3	69,7	50	39,4	43,29	3,89
	4	70,91	50	41,82	43,47	1,65
	1-S	61,4	50	22,8	25,07	2,27
C	1	70,44	50	40,88	41,73	0,85
	2	70,46	50	40,92	42,74	1,82
	4	69,35	50	38,7	41,55	2,85
	3-S	61,28	50	22,56	23,01	0,45
D	1	71,66	50	43,32	45,01	1,69
	2	71,79	50	43,58	45,01	1,43
	3	70,14	50	40,28	44,64	4,36
	4-S	59,73	50	19,46	19,94	0,48
E	1	70,07	50	40,14	44,6	4,46
	2	68,74	50	37,48	41,94	4,46
	4	69,31	50	38,62	40,85	2,23
	3-S	61,48	50	22,96	23,89	0,93
F	1	65,48	50	30,96	33,92	2,96
	2	63,52	50	27,04	30,51	3,47
	4	64,52	50	29,04	32,44	3,4
	3-S	58,46	50	16,92	17,69	0,77
G	1	67,05	50	34,1	36,28	2,18
	2	62,56	50	25,12	31,19	6,07
	3	-	50	-	-	-
	4-S	56,78	50	13,56	18,88	5,32
J	1	69,42	50	38,84	41,25	2,41
	3	70,52	50	41,04	42,92	1,88
	4	71,16	50	42,32	42,56	0,24
	2-S	63,8	50	27,6	-0,03	27,63
K	1	69,39	50	38,78	39,85	1,07
	2	69,38	50	38,76	39,07	0,31
	4	70,19	50	40,38	39,94	0,44
	3-S	60,24	50	20,48	22,91	2,43

