



# Návrh technologického postupu při výrobě koncovky výfuku

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**Daniel Hrnčíř**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie





## Zadání bakalářské práce

# Návrh technologického postupu při výrobě koncovky výfuku

*Jméno a příjmení:* Daniel Hrnčíř  
*Osobní číslo:* S19000040  
*Studijní program:* B0715A270008 Strojírenství  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* 2021/2022

### Zásady pro vypracování:

1. Přehled korozivzdorných, žárupevných a žáruvzdorných materiálů používaných ve strojírenství. Materiály používané pro výrobu výfukového potrubí v automobilovém průmyslu.
2. Základní principy technologie tažení, způsoby konvenčních a nekonvenčních metod tažení.
3. Základní principy návrhu technologických operací pomocí numerické simulace (PAM Stamp 2G).
4. Pro zvolený materiál provést experimentální zjištění základních mechanických vlastností pomocí statické zkoušky tahem a tvorba matematického modelu pro numerický výpočet v PAM Stamp 2G.
5. Návrh technologického postupu tažení koncovky výfuku (analýza deformace a tvarové stability výlisku).
6. Závěr.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

obrázky, tabulky, grafy  
cca 30 stran textu  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming. B.m.: ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [2] HOROVÁ, Ivana, Jiří ZELINKA, MASARYKOVA UNIVERZITA a PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA. Numerické metody. Brno: Masarykova univerzita v Brně, 2004. ISBN 978-80-210-3317-7.
- [3] KANÓCZ, Alexander, Miroslav ŠPANIEL, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STROJNÍ FAKULTA. Metoda konečných prvků v mechanice poddajných těles. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03590-0.
- [4] DAVIES, Geoffrey. Materials for Automobile Bodies. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [5] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 30. listopadu 2021

*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

19. května 2022

Daniel Hrnčíř

# **Návrh technologického postupu při výrobě koncovky výfuku**

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá návrhem tažení výfukové koncovky, následně analýzou její deformace a tvarové stability pomocí numerických simulací.

Klíčová slova: numerická simulace, plošné tváření, tažení, výfuková koncovka

## **Design of the technological process in the production of exhaust tailpipe**

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with the design of the exhaust tailpipe, followed by the analysis of its deformation and shape stability using numerical simulations.

Key words: Deep drawing, Exhaust tailpipe, Numerical simulation, Sheet metal forming

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval především doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a pomoc týkající se bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za umožnění studia a poskytnuté zázemí pro klidné studium.

# Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	9
1. Úvod.....	10
2. Teoretická část .....	11
2.1 Přehled korozivzdorných, žárupevných a žáruvzdorných materiálů používaných ve strojírenství .....	11
2.1.1 Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli .....	11
2.1.2 Žárupevné oceli.....	13
2.1.3 Materiály využívané na výrobu výfukového potrubí v automobilovém průmyslu .....	15
2.2 Základní princip technologie tažení, způsoby konvenčních a nekonvenčních metod tažení.....	15
2.2.1 Základní princip technologie tažení.....	15
2.2.2 Používané tažné nástroje.....	16
2.2.3 Technologické parametry tažení .....	17
2.2.4 Vady vznikající při tažení. ....	18
2.2.5 Způsoby konvenčních metod tažení .....	19
2.2.6 Způsoby nekonvenčních metod tažení.....	24
2.3 Základní principy návrhu technologických operací pomocí numerické simulace.....	27
2.3.1 Rozdělení typů numerických simulací.....	27
2.3.2 Základní princip MKP .....	28
2.3.3 Postup návrhu technologické operace s využitím numerické simulace.....	29
2.3.4 Výhody a nevýhody numerické simulace oproti experimentu .....	29
3. Experiment.....	30
3.1 Úvod experimentu.....	30
3.2 Statická zkouška tahem.....	30
3.2.1 Příprava vzorku pro tahovou zkoušku .....	31

3.2.2 Vlastní měření.....	34
3.2.3 Vyhodnocení naměřených dat .....	35
3.2.4 Výpočet materiálových konstant .....	38
3.3 Příprava nástrojů pro simulaci .....	41
3.3.1 Separace funkčních ploch nástrojů .....	41
3.4 Numerická simulace .....	43
3.4.1 Import nástrojů.....	43
3.4.2 Nadefinování materiálů.....	44
3.4.3 Vytvoření polotovaru .....	46
3.4.4 Struktura procesu tažení.....	47
3.4.5 Průběh simulace materiálu EN 1.4301 .....	47
3.4.5 Průběh simulace materiálu EN 1.4509 .....	51
4. Diskuse.....	55
5. Závěr .....	56
Literatura.....	57
Seznam příloh .....	59



## Seznam zkratk a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
$A$	%	tažnost
$a_0$	mm	tloušťka vzorku
$A_g$	%	homogenní tažnost
$b_0$	mm	šířka vzorku
$E$	MPa	modul pružnosti v tahu
$\varepsilon$	1	poměrná deformace
$F$	N	tažná síla
$K$	MPa	modul monotónního zpevnění
$\Delta L$	mm	prodloužení vzorku
$L_0$	mm	počáteční délka vzorku
$n$	1	exponent deformačního zpevnění
$R$	MPa	smluvní napětí
$R_m$	MPa	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
$\sigma$	MPa	skutečné napětí
$S_0$	mm <sup>2</sup>	plocha počátečního průřezu vzorku
$\varphi$	1	skutečná deformace
$\varphi_0$	1	offsetová deformace
$\varphi_{\text{plast}}$	1	skutečná plastická deformace
CAE	-	Computer Aid Engineering
CFD	-	Computer Fluid Dynamics
CRO	-	označení martenziticko-austenitických ocelí
FEA	-	Finite Element Analysis
FEM	-	Finite Element Method
KSP	-	katedra strojírenské technologie
MBD	-	Multi-body Dynamics
MKP	-	metoda konečných prvků
SVAR	-	oblast svaru
TOO	-	tepelně ovlivněná oblast
ZM	-	základní materiál

# 1.Úvod

V dnešní době jsou kladeny čím dál tím větší nároky na kvalitu vyráběných dílů. Ať už se jedná o jakost povrchu, tvarové a rozměrové přesnosti, či v neposlední řadě trvanlivost daných výrobků. Jedním z hlavních odvětví, kde jsou kladeny největší nároky, je automobilový průmysl.

Jednou z hlavních částí automobilové výroby, kde se požaduje vysoká odolnost a trvanlivost dílů, jsou výfukové systémy. Tyto části automobilu jsou exponované vysokým teplotám a nepříznivým korozním vlivům. Pro výrobu výfukových systémů jsou tedy v dnešní době používány korozivzdorné, žáruvzdorné a žárupevné oceli, které korozním a teplotním vlivům odolávají.

Na trhu lze najít velké množství korozivzdorných materiálů, ze kterých jsou výfukové systémy vyráběny. Podle technologického procesu výroby, pro který je materiál použit, však musí splňovat další vlastnosti, jako je například tažnost. Nevhodná volba materiálu totiž může mít velký vliv na další parametry výrobku jako je jakost povrchu či tvarová a rozměrová přesnost.

Jednou z firem, která se touto oblastí výroby zabývá je firma BOSAL ČR, spol. s.r.o. (dále jen BOSAL). Tato firma přišla s požadavkem na analýzu procesu tažení výfukové koncovky vyráběné z korozivzdorných materiálů. Firma pro výrobu používá austenitickou korozivzdornou ocel EN 1.4301, která ovšem není příliš vhodná při používání za zvýšených teplot. Z tohoto důvodu je snaha nahradit tento materiál korozivzdorným materiálem se zvýšenou teplotní odolností. Pro účely bakalářské práce byly tedy vybrány k posouzení pouze dva materiály, a to již zmíněná austenitická korozivzdorná ocel EN 1.4301 a feritická korozivzdorná ocel EN 1.4509, která je naopak vhodná pro aplikaci ve zvýšených teplotních podmínkách.

Cílem bakalářské práce tedy je analýza deformace a tvarové stability výfukové koncovky s využitím numerické simulace softwaru PAM STAMP 2G. Konkrétně se zabývá návrhem numerické simulace technologického postupu tažení s aplikací materiálů EN 1.4301 a EN 1.4509 zaslaných firmou BOSAL pro výrobu výfukové koncovky.

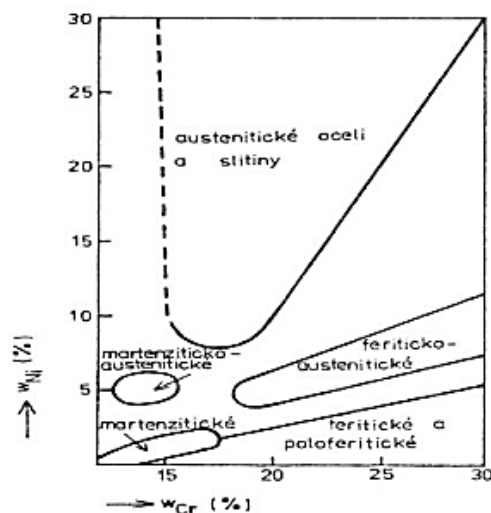
U obou materiálů proběhlo zjištění mechanických vlastností s využitím statické zkoušky tahem. Následně byla sestavena numerická simulace procesu tažení s implementováním výše zmíněných materiálů. Tímto bylo možné získat detailní pohled na celý proces tažení a zanalyzovat chování použitých materiálů z hlediska jejich deformace a tvarové stability.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Přehled korozivzdorných, žárupevných a žáruvzdorných materiálů používaných ve strojírenství

#### 2.1.1 Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli

Koroze představuje chemické či elektrochemické porušení materiálu. Je nežádoucím jevem na všech typech výrobků. Její výskyt máme možnost ovlivnit například vhodnou volbou materiálu. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli mají zvýšenou odolnost vůči korozi při normální i vyšší teplotě, tudíž jejich využití lze nalézt ve velké míře v automobilovém i chemickém průmyslu. I tyto oceli ovšem korodují, ale jejich koroze probíhá pomalu. Použití korozivzdorné oceli se samozřejmě promítne do ceny výrobku. Lze je rozdělit podle jejich chemického složení a struktury do několika skupin, jak je vidět na Obr. 1. Přesný poměr rozdělení legujících prvků a základní vlastnosti těchto ocelí lze najít v normě ČSN EN 10020 (420002). Jako korozivzdorné a žáruvzdorné oceli jsou vnímány chromové slitiny se železem, které obsahují 12-30 % chromu, až 30 % niklu nebo až 24 % manganu. V několika málo procentech se objevují další legující prvky, jako je křemík, měď, titan a molybden. Rozhodujícím prvkem je ovšem již zmíněný chrom, který zajišťuje pasivitu oceli a tím i její celkovou odolnost ke korozi. [1–3]



Obr. 1 Schéma oblastí chemických složení různých typů korozivzdorných ocelí [1]

#### - **Martenzitické (kalitelné) oceli**

Jsou to oceli, které vykazují po zakalení martenzitickou strukturu s obsahem chrómu až 18 % a 1,5 % uhlíku. Díky obsahu chrómu nad 10,5 % se vytváří pasivní vrstvy, a tím se zvyšuje odolnost vůči korozi. Snižuje se také kritická rychlost ochlazování austenitu. Díky této skutečnosti lze chromové kalitelné oceli prokalit do značných průřezů. Tyto oceli lze na rozdíl od vysokolegovaných samokalitelných niklových a manganových ocelí vyžít. Podle množství niklu se kalitelné oceli následně dělí na oceli **chromové** (Ni pod 1 %) a **chromniklové** (Ni nad 2 %). Při nízkém obsahu uhlíku jsou martenzitické oceli dobře svařitelné. Lze je vnímat jako levnější variantu korozivzdorných ocelí. Žárovzdorné jsou tyto oceli do přibližně 950 °C a dále mají také dobrou žárupevnost přibližně do teploty 600 °C. Využití nalezneme hlavně v prostředí, kde dochází ke kontaktu s vodou a párou, tudíž se s nimi můžeme setkat ve vodní technice a potravinářském průmyslu. [1, 3, 4]

#### - **Feritické a poloferitické oceli**

Feritické oceli jsou slitiny železa s více než 13 % chrómu s nízkým obsahem uhlíku do 0,08 %. Pokud se u těchto ocelí objeví větší obsah uhlíku, může dojít ke vzniku ledeburitických karbidů. Do teplot běžného tepelného zpracování například žhání (750-900 °C) a rychlého ochlazení je struktura feritická. V případě, že tyto oceli ohřejeme na vyšší teplotu, vykazují austenitickou přeměnu, a tím i smíšenou strukturu po ochlazení. Oceli pak nazývají **poloferitické**. Strukturu těchto ocelí tedy tvoří oblasti austenitu a feritu. Žháním a tvářením za studena jsme schopni feritické korozivzdorné oceli zpevnit. V oblasti teplot 400-550 °C dochází u těchto ocelí k poklesu houževnatosti, proto je neaplikujeme tam, kde by byly vystaveny této teplotní oblasti. Z hlediska fyzikálních vlastností se od martenzitických výrazně neliší. Feritické oceli mají poměrně dobrou korozní i žárovou odolnost. Z tohoto důvodu jsou aplikovány především v energetice na části výměníků, kotlů a rekuperátorů. Dále jsou hojně využívány v automobilovém průmyslu při výrobě výfukových systémů a katalyzátorů. [1, 4, 5]

#### - **Austenitické oceli**

Složení austenitických ocelí se pohybuje kolem 18 % chrómu, 9 % niklu, 0,08 % uhlíku a popřípadě 9-19 % manganu. V případě vyššího obsahu uhlíku je potřeba austenitické oceli homogenizačně žít při teplotě 1050 °C s následným ochlazením do vody. Tímto procesem se docílí austenitická struktura bez karbidů. Přidáváním dalších slitinových prvků lze dosáhnout zvýšení mechanických i fyzikálních vlastností. Dusík jako

austenitotvorný prvek zvýší mechanické vlastnosti, obrobitelnost jsme schopni zvýšit pomocí síry, selenu, fosforu, olova či mědi. V neposlední řadě jsme schopni zlepšit žáruvzdornost pomocí chrómu, hliníku, křemíku a niklu. Nejčastěji je však jako přídavný prvek používán molybden, jelikož výrazně zvýší korozní odolnost proti účinku redukčních kyselin a solných roztoků. Oproti martenzitickým a feritickým ocelím mají austenitické oceli vyšší korozivzdornost. Použití těchto ocelí je možné až do 1000 °C díky jejich výborné žáruvzdornosti. Austenitické korozivzdorné oceli jsou významné hlavně pro jejich tažnost a houževnatost. Jejich průmyslové využití nalezneme při výrobě hutních a spalovacích pecí či přídavných spalovačů u letadel. [1, 3–5]

#### - **Austeniticko-feritické oceli**

Tyto oceli můžeme zařadit do skupiny takzvaných duplexních ocelí, jelikož obsahují přibližně stejný podíl austenitu a feritu. Složením obsahují kolem 22 % chrómu a 5 % niklu. Zpracování probíhá nad teplotou 1000 °C a zvyšováním teploty nastane zvyšování podílu feritu ve struktuře oceli. Oproti čistě austenitickým ocelím dosahují vyšší meze kluzu (400-600 MPa). Tažnost je i při vyšších obsazích feritu dobrá jako u austenitických díky rozpouštěcímu žíhání. Použití těchto ocelí je omezené horší strukturní stabilitou, tudíž bychom měli jejich použití omezit pod teplotu 300 °C. [1, 4]

#### - **Martenziticko-austenitické oceli**

Posledním typem korozivzdorných ocelí jsou oceli martenziticko-austenitické, které taktéž patří do skupiny duplexních ocelí. Obsahují cca 13-17 % chrómu, 4-6 % niklu a 0,5-1,5 % molybdenu při hodnotě uhlíku do 0,06 %. Ve starší literatuře můžeme najít označení CRO. Tepelné zpracování těchto ocelí se skládá z normalizace za teploty 950-1050 °C, kalení z teploty cca. 910 °C a popouštění za teploty 520 °C. Po těchto krocích se může dosahovat pevnosti až 1000 Mpa. Využití těchto ocelí nalezneme díky vysoké pevnosti především k výrobě vodních turbín, kompresorů a součástí používaných v mořské vodě. [1, 4, 5]

### **2.1.2 Žárupevné oceli**

Žárupevné oceli musí navíc oproti žáruvzdorným ocelím odolávat nejen vysokým teplotám, ale i zvýšeným tlakům. Tyto oceli jsou také často nazývané jako creepové. Jejich vývoj probíhal velice rychle, jelikož se využívají všude, kde jsou vystaveny teplotám až

600 °C a tlaku až 1000 MPa. Podle chemického složení je možné rozdělení na nelegované oceli, nízkolegované oceli, vysokolegované chromové oceli, austenitické oceli a vytvrditelné oceli. U těchto ocelí musíme dávat pozor na stopové prvky jakou je cín, olovo, fosfor nebo třeba síra, které zhoršují mechanické vlastnosti. [3, 6]

- **Nelegované oceli**

Nelegované žárupevné oceli lze používat do teploty až 520 °C. Kvůli nízkým mechanickým vlastnostem za této teploty se však spíše orientujeme kolem teploty 350-400 °C. Využívány jsou nelegované oceli pro výrobu trubek, plechů a výkovek pro energetická zařízení. Do této skupiny patří například oceli 11 368, 11 418 či 11 478. [3]

- **Nízkolegované oceli**

Dělíme je na oceli pro použití v oblasti meze kluzu nebo meze tečení. První skupina má zaručenou mez kluzu za normálních i zvýšených teplot a poměrně dobré plastické vlastnosti. U druhé skupiny požadujeme vysokou plasticitu, odolnost proti oxidaci na vzduchu či vodní páře, dobrou tepelnou vodivost a svařitelnost. Lze je aplikovat při pracovních teplotách 500-550 °C. Legujícími prvky jsou obvykle chrom, molybden, vanad, bor či wolfram. Mezi tyto materiály se řadí oceli 15 020, 15 110, 15 320 či 15 335. [3]

- **Vysokolegované chromové oceli**

Oceli tohoto typu se používají při teplotách až 650 °C, jelikož u nich požadujeme nejen žárupevnost, ale také žáruvzdornost. Složení odpovídá 9 % chromu, 1 % molybdenu s tím, že žárupevnost zvýší vanad. Nalezneme je jako materiál pro výrobu trubek parních kotlů. Do této skupiny patří oceli 17 134, 17 341 nebo 17 482. [3]

- **Austenitické oceli**

- **Chrómniklové**

Hlavními prvky chrómniklových austenitických ocelí jsou chrom a nikl. Složení ocelí obsahuje 12-20 % chromu, 2 % wolframu a 1-3 % molybdenu. Některé typy austenitických ocelí mohou obsahovat niob či titan pro vytvoření stabilního karbidu s uhlíkem. Použití těchto ocelí se naskytá do teploty 700 °C. Žárupevná ocel typu 17 341 se často aplikuje na vysoce namáhané součásti potrubních systémů u tepelných či jaderných elektrárn. [3]

- **Manganchrómové**

Oproti chrómniklovým austenitickým ocelím neobsahují nikl, což se výrazně projeví na jejich ceně a jsou tedy levnější. Odolné jsou především v prostředí, které obsahuje

sloučeniny síry. Lze je použít v prostředí vodní páry do 650 °C nebo na vzduchu do 800°C. Mezi tyto oceli patří oceli 17 481, 17 482 nebo 17 483. Opět jsou aplikovány například na výrobu parních kotlů. [3]

#### - Vytvrditelné oceli

Pracovní teplota vhodná pro tento typ ocelí se pohybuje kolem 650-700 °C. Do této skupiny se řadí ocel AKRN, jejíž mez pevnosti při tečení je vysoká, má dobrou strukturní stabilitu a plastické vlastnosti. Využívány bývají především v lehkovodních jaderných reaktorech. [3]

### **2.1.3 Materiály využívané na výrobu výfukového potrubí v automobilovém průmyslu**

Výfukové systémy jsou primárně určeny pro zmírnění hluku a kontrolu emisí. Kvůli horkým výfukovým plynům, které procházejí výfukovým systémem musí být především uzpůsoben použitý materiál na části daného výfuku. Výběr materiálu závisí na použití vozidla, teplotě výfukových plynů a dané aplikaci výfuku. Na jednom konci může výfuk přicházet do kontaktu s plynem o teplotě cca 650 °C a na horkém konci výfuku může teplota vystoupat na teplotu 1050 °C. Vzhledem k těmto skutečnostem se volí korozivzdorný, žáruvzdorný a žárupevný materiál, který bude všem těmto vlivům odolávat. V dnešní době se proto převážně používají různé typy nerezových ocelí. Používané materiály pro výrobu koncové části výfuku by měly vykazovat dobrou tažnost, svařitelnost, odolnost proti korozi a dobré tepelné vlastnosti. Mezi tyto materiály patří například feritické oceli EN 1.4512, EN 1.4016, EN 1.4509. [7–9]

## **2.2 Základní princip technologie tažení, způsoby konvenčních a nekonvenčních metod tažení**

### **2.2.1 Základní princip technologie tažení**

Technologie tažení, patřící do skupiny technologií tváření za studena je proces, při kterém je z polotovaru působením vnějších sil vytvářen výrobek bez úběru třísek. Tváření za studena se dělí na objemové a plošné. Při plošném tváření se výrazně průřez, tloušťka stěny ani mechanické vlastnosti polotovaru nemění. Opačně to je u objemového tváření, kdy nastává změna vlastností tvářeného materiálu, především snížení tažnosti a zpevnění. Výchozí polotovar se mění průřezem i tvarem, ovšem objem materiálu zůstává stejný. Mezi

technologie objemového tváření se řadí například technologie protlačování, pýchování či redukování.

Základním principem technologie tažení je plošné tváření rovinného plechu, neboli výstřižku v nerozvinutelný tvar. Produktem je pak výtažek. Proces technologie tažení probíhá obvykle za studena. Zpravidla se dále výstřižek nezpracovává, pouze dojde k odstříhnutí přebytečného materiálu. Pro úspěšně provedené tažení musí materiál splňovat potřebnou tažnost. Technologie tažení má své výrazné zastoupení při sériové a hromadné výrobě díky nenáročnosti na další zpracování výstřižku. Touto metodou se zhotovují výrobky menších i větších rozměrů s tvarovou složitostí. Výrazné využití pak nachází technologie v automobilovém a leteckém průmyslu viz Obr. 2 [10, 11]



*Obr. 2 Příklady výrobků technologií tažení [11]*

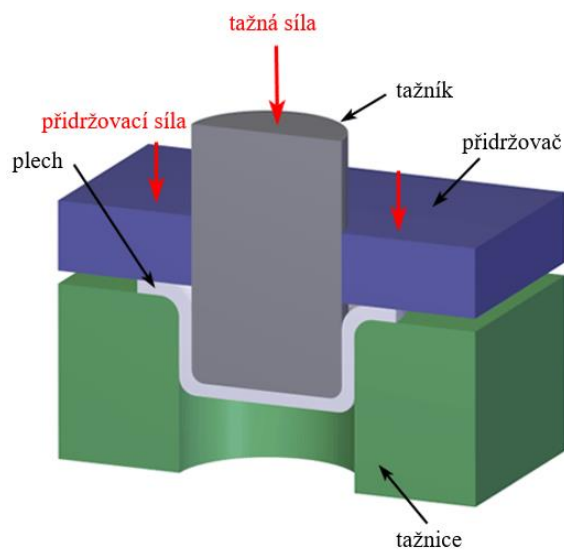
### **2.2.2 Používané tažné nástroje**

Pro technologii tažení je používaným nástrojem tažidlo, které se skládá z dvou základních částí tažníku a tažnice. Při procesu tažení může docházet ke zvlnění výtažku, tomuto můžeme předejít použitím přidržovače, který přidržuje plech k tažnici. Při průběhu tažení se musí přidržovač postupně uvolňovat. Díky této skutečnosti se dosáhne lepší kvality výtažku. Po vytažení výtažku získává přidržovač další funkci, a to funkci stírače výtažku z tažníku. Při hlubokém tažení je použití přidržovače nutností, ale pro výrobu mělkých výtažků lze táhnout i bez přidržovače. Tažením se naskýtá možnost vyrábět rotační i nerotační tvary na jeden tah, ale i postupným tažením, metodami s přidržovačem, bez přidržovače, se ztenčením i bez ztenčení stěny výtažku.

Tažné nástroje se dělí na jednoduché viz Obr. 3, postupové, sdružené a sloučené. Jednoduché nástroje jsou určeny pro jeden určitý typ operace. Nástroje postupové při jednom zdvihu vykonají více operací najednou. Na jednom pracovním místě se vykoná určitá pracovní operace a výtažek se posune do dalšího pracovního místa. Použitím sdruženého nástroje se sloučí například operace tažení a děrování do jednoho zdvihu. Možnost provádět



několik tažných operací najednou přináší použití sloučeného nástroje. Technologie tažení se nejčastěji provádí na mechanických lisech tzv. dvojčinných lisech. [10, 11]



*Obr. 3 Schéma jednoduchého tažného nástroje [12]*

### 2.2.3 Technologické parametry tažení

Při definování parametrů tažení musíme dbát na určité zásady. Základním předpokladem při výběru materiálu vhodného pro tažení, je dostatečná tažnost materiálu. Dále je nutné definovat tvar a rozměr polotovaru (přístříhu). Při tažení musí objem přístříhu odpovídat objemu výtažku. K finálnímu tvaru výtažku, je potřeba přidat 3 až 4 mm jako přídavek pro následné odstřížení.

Počet tahů pro vytažení požadovaného výtažku se stanoví na základě mechanických vlastností základního materiálu, konstrukce nástroje, tloušťce a kvality plechu, způsobu mazání a technologických podmínkách. Jako další parametr je nutné určit velikost tažné mezery. Její velikost se odvíjí od tloušťky plechu a výrobní tolerance.

Tažná mezera má za úkol eliminovat pěchování materiálu, protože díky ní se může zbývající materiál přesunout ve směru výšky. Při použití tažení na více tahů se tažná mezera zmenšuje. Při posledním kalibračním tažení může být i záporná. Po nevhodném zvolení velikosti tažné mezery může docházet k poškození výtažku. Zvlnění může nastat u zbytečně velké tažné mezery. Naopak při volbě malé mezery hrozí vznik trhlin.

Jako poslední parametr je nutné určit velikost tažné síly. Tažná síla musí být dostatečně velká pro pokrytí sil potřebných k plastické deformaci příruby, ohybu na tažné hraně a překonání tření na kontaktních plochách. [10, 11]

#### 2.2.4 Vady vznikající při tažení.

Vznik vad ovlivňujících kvalitu výtažku může být zapříčiněn mnoha faktory. Špatnou volbou materiálu nebo špatným nadefinováním technologických parametrů. Projevit se tyto vady mohou jako tvarové a rozměrové nepřesnosti, horší jakost povrchu nebo může v nejhorším případě dojít k úplnému zničení výtažku. [11, 13]

##### - **Tvárný lom**

Pokud dojde k vyčerpání plasticity materiálu a následnému překročení meze pevnosti, může v deformovaných oblastech vznikat tvárný lom viz Obr. 4. [11, 13]



*Obr. 4 Tvárný lom [11]*

##### - **Zvlnění**

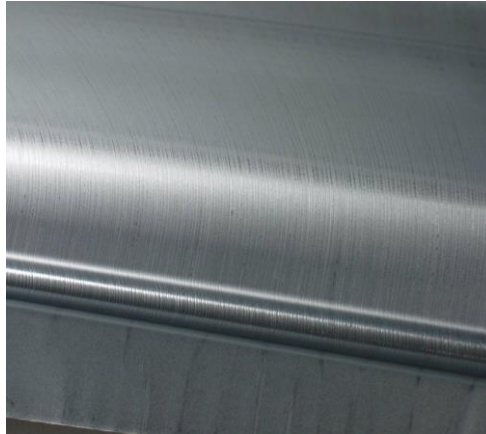
Jelikož se při tažení přesouvá poměrně velké množství materiálu, můžou vzniknout po ztrátě stability plechu vlny. Tomu lze zabránit použitím přidržovače, který sice zabráni vzniku vln, ale materiál se bude pěchovat a dojde ke zvětšení tloušťky stěny výtažku viz Obr. 5. [11, 13]



*Obr. 5 Zvlnění výtažku [11]*

- **Povrchové vrásky**

Vznikají při použití materiálu, u kterého se projevuje deformační stárnutí viz Obr. 6 (tj. zamezení pohybu dislokací). [11, 13]



*Obr. 6 Povrchové vrásky [11]*

- **Zadírání**

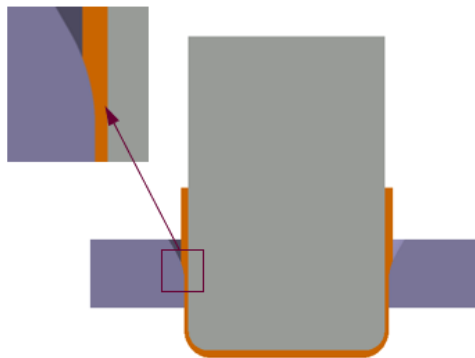
Při použití dvojice materiálů (př. ocel-Al) pro nástroj a plech, může docházet ke zhoršení jakosti povrchu. [11, 13]

## 2.2.5 Způsoby konvenčních metod tažení

Technologii tažení reprezentuje nejenom základní již zmiňovaný princip tažení, ale také se používají další metody, které rozšiřují sortiment možných výrobků. [10, 13]

- **Tažení se ztenčením stěny**

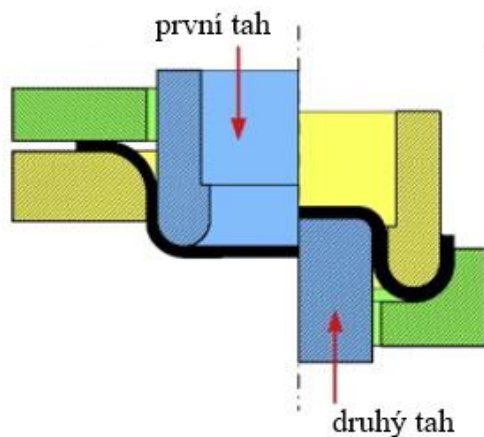
Této metody tažení se obvykle využívá při aplikaci více tahů, a to v posledních krocích, kdy dojde ke ztenčení stěny, a tím i změně rozměrů finálního výtažku. Požadovaného ztenčení stěny výtažku lze dosáhnout použitím záporné tažné mezery viz Obr. 7. Při tomto typu tažení hrozí poškození výtažku utržením dna. Obvykle najde tento postup tažení využití při výrobě nábojnic, brzdových válečků či nádob pro potravinářský průmysl. [11, 13]



**Obr. 7** Tažení se ztenčením stěny [11]

#### - **Zpětné tažení**

Pokud je při tažení vhodné použít vyšší tažnou sílu, ale zároveň není možné nebo nechceme použít přidržovač, je vhodné použít metodu zpětného tažení. V průběhu operace je materiál tažen nejdříve jedním a následně opačným směrem viz Obr. 8. Tímto způsobem dojde na dvojnásobnou deformaci, a tím vznikne velké zpevnění výtažku. Tato metoda je primárně určena pro výrobu kulovitých a elipsovitých tvarů. Vyznačuje se hlavně vysokou tvarovou a rozměrovou přesností. [13]



**Obr. 8** Zpětné tažení [14]

#### - **Tažení stupňovitých výtažků**

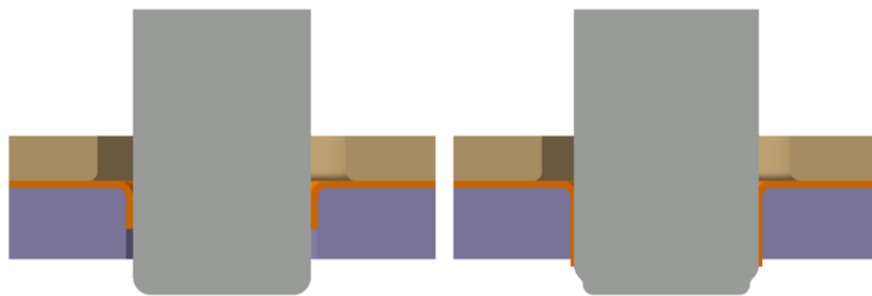
Jak již název napovídá, metoda se využívá hlavně při tažení na několik tahů, kdy se mohou přidat další operace př. lemování. Pro tento způsob tažení se buď zvýší tlak přidržovače, nebo se táhnou postupně jednotlivé tahy, nebo se předlísuje stupňovité těleso a posledním tahem dokončí na požadovaný tvar. Využívána je metoda hlavně při výrobě stupňovitých, kónických, kulovitých a parabolických výtažků. [13]

- **Tažení s ohřevem**

Největší využití získává tato metoda při tažení hoččkových slitin, které mají horší tváritelnost za studena. V důsledku této skutečnosti se materiál ohřívá mezi tažnicí a přidržovačem na teplotu 300 až 350 °C. [13]

- **Protahování**

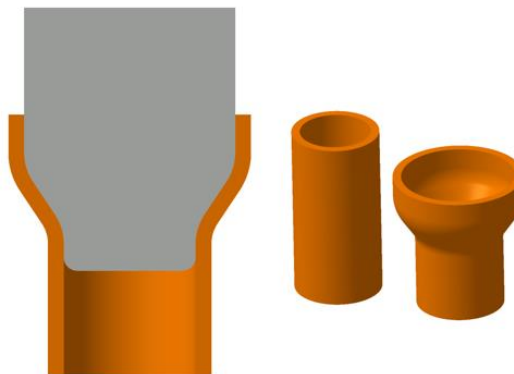
Předstřížený otvor v přístřihu je systematicky rozšiřován a protažením vznikne kolmá válcová plocha viz Obr. 9. [11]



*Obr. 9 Protahování [11]*

- **Rozšiřování**

V případě požadovaného zvětšení konce výtažku lze využít metodu rozšiřování viz Obr. 10. Tato technologie se nejčastěji uplatňuje při rozšiřování trubek. Jedinou operací lze docílit zvětšení průměru až o 30 %. Nejčastěji bývá rozšiřování doplňkovou operací k tažení. Při nutnosti většího rozšíření na více tahů je dobré zařadit mezioperační žíhání. [11, 13]



*Obr. 10 Rozšiřování [11]*

### - **Zužování**

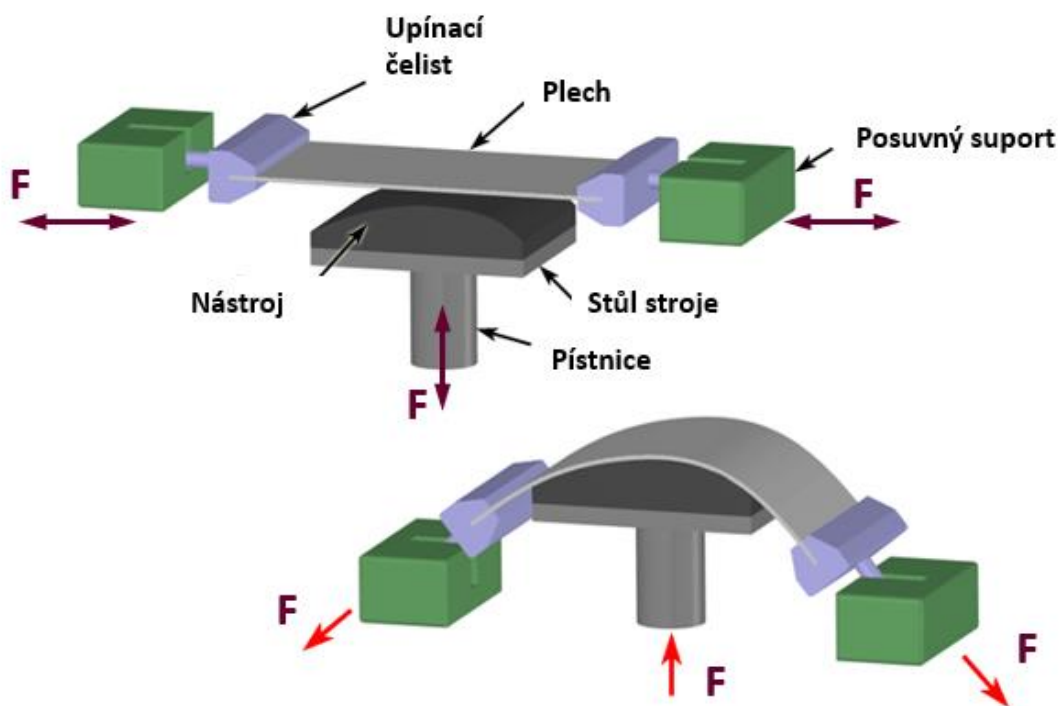
Opět se jedná o doplňkovou operaci po tažení. Při zužování je zachován průměr výtažku u dna pouze dochází k redukci otevřeného konce na požadovaný rozměr, jak je vidět na Obr. 11. Tento postup lze provádět na jednu či více operací. Tloušťka stěny výtažku není nijak redukována, ale tažený kov je pouze stlačován. Při zužování dochází k postupnému zpevnění materiálu, lze proto zařadit mezioperační žíhání pro zvýšení tvárnosti. V některých případech může docházet ke zborcení horní části výtažku, z toho důvodu by neměl tažený úhel překročit 45°. [11, 13]



*Obr. 11 Zužování [11]*

### - **Přetahování**

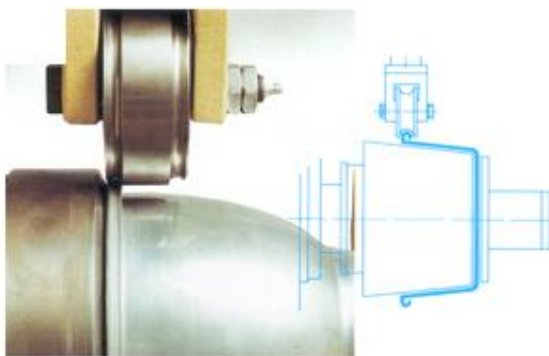
Další z technologií konvenčních způsobů tažení je technologie přetahování viz Obr. 12. Využívány jsou k tomu především hydraulické zvláště uzpůsobené lisy. Proces se provádí tažením plechu za konce přes pevnou šablonu nebo vnikáním šablony do plechu, přičemž konce jsou pevně zakotveny. Metoda se vyznačuje trvalým plastickým prodloužením v celém průřezu tvářeného materiálu. Při výrobě panelových výtažků je dosahováno běžnou technologií nedostatečné zpevnění materiálu, tudíž toto nedostatečné zpevnění je kompenzováno trvalým plastickým prodloužením. Finální výtažek díky této technologii vykazuje minimální odpružení. [11, 13]



*Obr. 12 Princip přetahování [11]*

#### - **Kovotlačení**

Technologie kovotlačení, neboli rotační tlačení plechů, je jednoduchá technologie prováděná na kovotlačitelském stroji (obdoba soustruhu). Vstupním polotovarem je převážně plech či trubka. Může se provádět ruční/strojní a se/bez ztenčení stěny. Princip metody spočívá v postupném přitlačování nástřihu na rotující model, jak je vidět na Obr. 13. Využití nachází metoda při výrobě dutých těles rotačních tvarů při převážně kusové výrobě s horší jakostí povrchu. [11, 13]



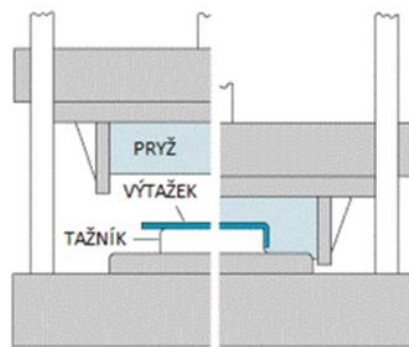
*Obr. 13 Strojní kovotlačení [11]*

## 2.2.6 Způsoby nekonvenčních metod tažení

Jako nekonvenční tedy speciální metody tažení jsou vnímány metody tažení nepevnými nástroji. Buď se může jednat o kapalinu nebo gumu. Tyto metody jsou aplikovány převážně při výrobě specifických tvarů. [11, 13]

### - Metoda Guerin

První použití metody tažení Guerin sahá až do roku 1872, tudíž tato technologie je jednou z nejstarších, co se týká technologií využívajících pryž. Pryží tvořená tažnice dovoluje maximální hloubku tažení cca 40 mm při maximální velikosti plechu 1,5 x 800 x 800 mm. Původně našla tato technologie využití při stříhání Sn folií, ale je vhodná i pro ohýbání a jednoduché tažení. Pryž je při tažení uložena v polouzavřené ocelové skříni na hydraulickém lisu. Nástroj je zatlačen do pryže, čímž se dosáhne potřebného napětí, které způsobí tváření plechu viz Obr. 14. Tím je docílen požadovaný tvar výtažku. Jednou z její hlavních výhod je to, že tváření touto metodou nezanechává stopy na povrchu materiálu. Pryž je využívána v různých tvrdostech v závislosti na prováděném úkonu. Při stříhání se volí vyšší tvrdost než při tažení. Pryž používaná při ohybu se pohybuje kolem 45-60 Sh, zatímco pryž pro stříhání kolem 70-80 Sh. Metoda bývá využívána při kusové a malosériové výrobě. Vhodná je pouze pro mělké výtažky z tenkých plechů. Možnost tvářet i více součástí během jednoho zdvihu, jednoduché nástroje a časově kratší výroba, to jsou jedny z mnoha výhod, které metoda nabízí. [10, 11, 13]

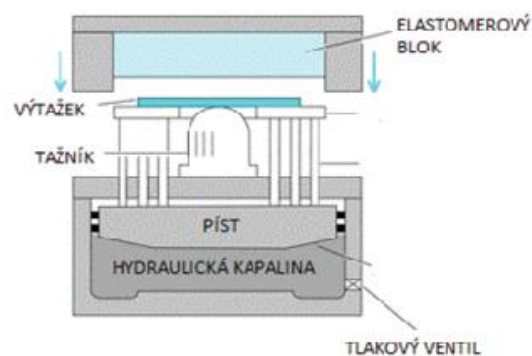


*Obr. 14 Princip metody Guerin [11]*



### - **Metoda Marform**

Podobnost této metody s metodou Guerin je ohledně principu provedení i používaných zařízení viz Obr. 15, ale hlavní rozdíl je v jejím využití. Díky hydraulickému přidržovači se metoda výhradně uplatňuje pro hluboké tahy. Rozdílem je, že pryžový polštář je oproti metodě Guerin větší. Jeho výška musí dosahovat trojnásobku výšky výlisku, aby nedošlo k rychlé degradaci a opotřebení pryže. Pro výtažky s tvarově členitým dnem není tato metoda vhodná. Uplatnění opět nalezne při kusové a malosériové výrobě pro výtažky z ocelových i neželezných tenkých plechů. Nevýhodou je nízká životnost nástroje (2000-3000 výtažků), potřeba velkých sil při tažení a celkově větší náklady než u předešlého způsobu. Hlavní výhodou je především možnost výroby hlubokých, geometricky složitých a rozměrných výtažků, univerzálnost tažnice a eliminace zvlnění díky přidržovači. [10, 11]



*Obr. 15 Princip metody Marform [11]*

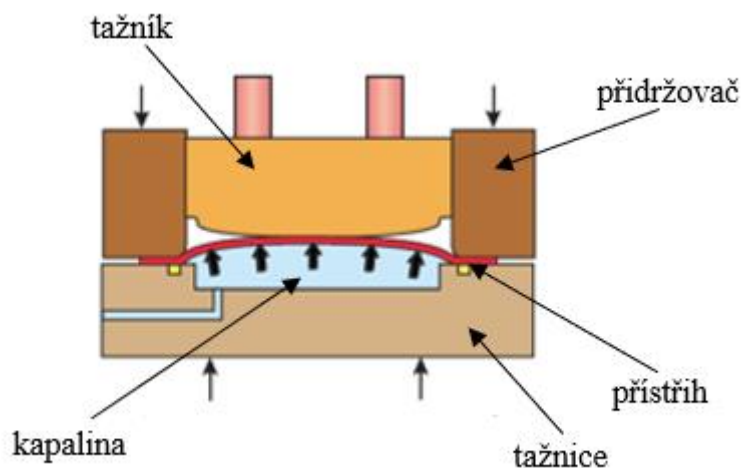
### - **Metoda Wheelon**

Opět se jedná o podobnou metodu jako je metoda Guerin, ale s tím rozdílem, že namísto pryže je použitý pryžový vak, který je naplněn kapalinou. Opět je zde použit přidržovač. Tlak potřebný pro hladký průběh procesu se pohybuje v rozmezí 35-200 MPa. Metoda je vhodná pro výrobu dílů s širšími přírubami, tvarově složitějších a žebrovaných součástí. Používané jsou i dvě modifikace a to Verson-Wheelon a ASEA Quintus. V první modifikaci pouze vak s kapalinou tlačí na pryžový špalek a při druhé modifikaci figuruje v procesu tváření pouze pryžová membrána. Vhodné použití je při velkých sériích, ale i prototypch.

Kladem jsou i nízké náklady na výrobu nástroje, naopak pořizovací cena stroje je velmi vysoká. [10, 11, 13]

#### - **Hydromechanické tažení**

Při použití této metody se již tvářený materiál dostane do kontaktu s kapalinou, jak je vidět na Obr. 16. Z toho vyplývá, že náročnost na těsnění je při této metodě velmi vysoká. Tažník působící na přístřih tlačí materiál do tažné komory, kde je hydrostatickým tlakem tvářen. Oproti jiným metodám kapalina působí i v místech, kde je běžně kontakt polotovaru s nástrojem. Tření a ztenčení stěny výtažku je pak minimální. Možnost výroby složitějších tvarů na jeden tah, geometrická přesnost a vysoká jakost povrchu jsou jedny z výhod, proč metodu aplikovat. Nevýhodou je však požadavek na vysoký tlak přídržovače kvůli těsnosti, nutnost použití speciálního média a nižší produktivita. Uplatnění nalezne metoda v malosériové i velkosériové výrobě. [10, 11, 13]

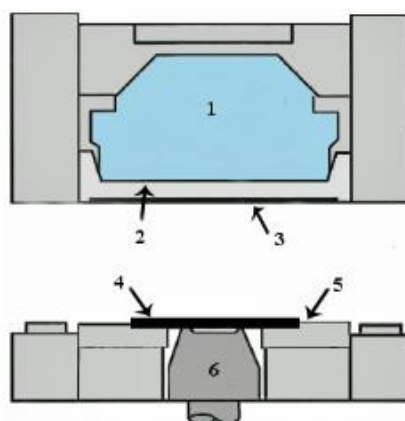


*Obr. 16 Princip metody Hydromechanického tažení [11]*

#### - **Metoda Hydroforming**

Princip této metody je opět založen na využití kapaliny a pryžové membrány viz Obr. 17. Rozdílem je zde ovšem ocelová skříň přepažená pryžovou membránou obsahující kapalinu, tudíž materiál není v přímém styku s kapalinou. Pryžová membrána brání styku kapaliny s plechem a zároveň ho přidržuje proti zvlnění. Tažník zatlačí tvářený plech do pryžové membrány v pracovním prostoru skříně, a tím dojde díky hydrostatickému tlaku k vytažení požadovaného tvaru. Nenastává omezení tvarem dna ani hloubkou, jelikož tato technologie jde

využít pro výtažky i přes 100 mm. Výhodou metody je odstranění požadavku na středění spodní a horní části nástroje a variabilita výroby. Naopak nevýhodou může být velká pořizovací cena, vysoké požadavky na těsnost celého systému či delší výrobní časy. Vhodná je především aplikovat při velkých výrobních sériích. [10, 11]



1- tažná komora, 2- pružná membrána, 3- povlak snižující opotřebení, 4- polotovaz, 5- doraz, 6- tažník

*Obr. 17 Princip metody Hydroforming [11]*

## 2.3 Základní principy návrhu technologických operací pomocí numerické simulace

Použití numerických simulací ve strojírenství nabízí velké množství výhod při analyzování deformace a optimalizace výroby. V dnešní době se hlavně v automobilovém průmyslu setkáváme s vysokými požadavky na kvalitu výlisků, při velké tvarové složitosti výrobků. Díky numerickým simulacím jsme schopni už ve fázi konstrukce zjistit mnoho informací o průběhu toku materiálu, nebezpečných oblastech pro vznik trhlin nebo odpružení. Tyto poznatky jsme schopni dále implementovat do procesu přípravy výroby a tím i optimalizovat daný výlisek. Optimalizace se pak pozitivně projeví například snížením nákladů, zmetkovitosti nebo možností vytvářet složitější tvary. [15]

### 2.3.1 Rozdělení typů numerických simulací

Numerické simulace, (CAE-Computer Aid Engineering) je možné rozdělit na 4 kategorie. Tyto kategorie jsou: FEA-Finite Element Analysis, CFD-Computer Fluid Dynamics, MBD-Multi-body Dynamics a ostatní metody. Numerické simulace typu FEA se hojně využívají při výpočtu deformací těles. CFD simulace lze využít při výpočtech

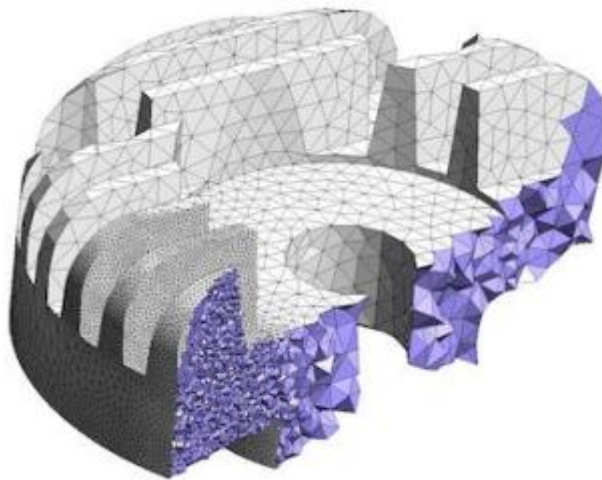
týkajících se proudění tekutin a MBD při výpočtech týkajících se mechanismů. Jako příklad simulace, která patří mezi ostatní typy simulací, může být analýza výrobních procesů.

Zdaleka největší zastoupení v kategorii simulací typu FEA má metoda FEM-Finite Element Method, neboli MKP - metoda konečných prvků. Metoda konečných prvků je tak dominantní metodou, že má až 90 % zastoupení mezi všemi používanými typy simulací. Pomocí této metody lze řešit široké spektrum úloh, ovšem ve velkém množství strojírenských úloh se nejčastěji setkáme v řešení strukturálních úloh. [16, 17]

### 2.3.2 Základní princip MKP

Jelikož modely v běžné strojírenské praxi mají často velmi složitou geometrii, musíme při jejich simulaci využít rozdělení na menší a jednodušší geometrii. Základním principem metody konečných prvků je rozdělení simulované oblasti na konečno-prvkovou síť. Tato síť je pak tvořena konečným počtem prvků neboli elementů, které jsou spojeny v uzlových bodech viz Obr. 18. Rozdělení simulované oblasti se také často nazývá jako diskretizace a tím vznikne diskrétní model. V místech, kde se očekává větší deformace, je časté využití zhuštění sítě, naopak v místech, kde se velký vliv deformace neočekává, může být síť hrubší. Díky tomuto rozdělení jsme schopni řešit prakticky jakýkoli tvar či geometrii, se kterou se lze ve strojírenství setkat.

K vytvoření konečno-prvkové sítě můžeme využít dvě varianty. Zpravidla síť vytváříme buď automatickou generací, nebo je možné vytvářet síť ručně (přímou generací). U rozsáhlejších simulací se můžeme s přímou generací sítě setkat, ale automatické generování sítě je využíváno v převážné většině případů. [16, 17]



**Obr. 18** Ukázka konečno-prvkové sítě [17]

### **2.3.3 Postup návrhu technologické operace s využitím numerické simulace**

V dnešní době se vyskytuje mnoho softwarů, které umožňují simulovat plošné tváření. Jedním z nich je například software PAM STAMP 2G od společnosti ESI Group. Pro definování numerické simulace je zapotřebí znát především veškerou geometrii činných ploch, ať už nástrojů, či přístřihu. Jako první je tedy nutné definovat funkční plochy všech nástrojů a přístřihu. K tomu je možné využít některý z mnoha dostupných CAD softwarů, jako je například Autodesk Inventor Professional 2021. Jako další krok je nutné specifikovat materiál přístřihu. V neposlední řadě je nutné určit technologické podmínky tažení a pohyby nástrojů. Software PAM STAMP 2G je pro jednodušší uživatelské definování technologických podmínek vybaven makry, která lze využít pro definování potřebných parametrů tažení. Po splnění všech nutných kroků pro spuštění simulace je možné nasimulovat výsledný průběh tažení. [15]

### **2.3.4 Výhody a nevýhody numerické simulace oproti experimentu**

Zda je výhodné či nevýhodné využít numerické simulace či experiment určuje mnoho faktorů. Obě možnosti mají své výhody a nevýhody. Velmi často se numerická simulace jeví jako levnější a rychlejší způsob řešení problému než experiment, a to především při větším množství variant, které je nutné nasimulovat. Jako hlavní nevýhoda simulace oproti experimentu je především její přesnost a spolehlivost. Velmi snadno může totiž vzniknout v simulaci chyba, které ovlivní správnost a relevantnost výsledné simulace. Naopak experimentem jsme schopni dosáhnout velmi přesných výsledků. Ideálním spojením je tedy využití simulace, díky které můžeme velice rychle dospět k efektivnímu návrhu, a následně použít ověření pomocí experimentu. Tento proces se v běžné praxi nazývá jako ověření modelu. [17]

## **3. Experiment**

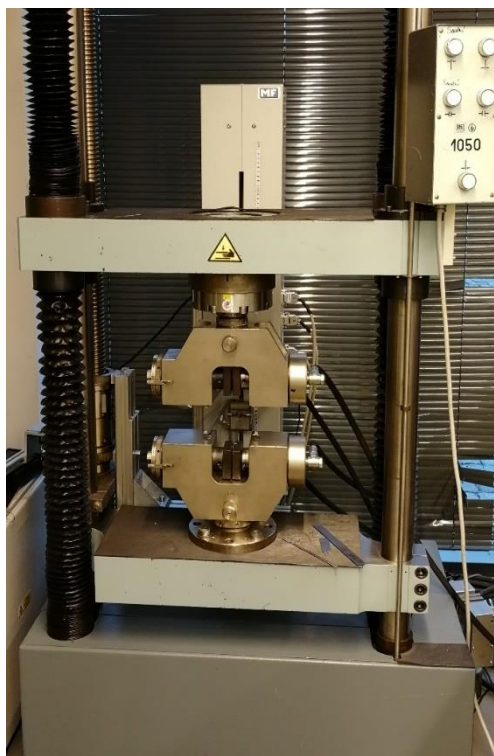
### **3.1 Úvod experimentu**

V experimentální části byly ve spolupráci s firmou BOSAL provedeny analýzy deformace a tvarové stability tažené výfukové koncovky pomocí numerických simulací softwaru PAM STAMP 2G. Cílem experimentu byla analýza materiálů používaných touto firmou na výrobu koncovek výfuku a posouzení jejich vhodnosti pro proces tažení.

Experiment byl rozdělen do dvou hlavních částí. V první části experimentu byly dva používané typy materiálů, zasláné firmou BOSAL, podrobeny experimentálnímu mechanickému zkoušení pro zjištění jejich mechanických vlastností. K jejich zjištění byla použita statická zkouška tahem. V druhé části experimentu byly nasimulovány průběhy tažení již zmíněné koncovky výfuku s použitím jednotlivých materiálových dat zjištěných v první části experimentu. Následně byly numerické simulace analyzovány pro získání deformace a tvarové stability výfukové koncovky.

### **3.2 Statická zkouška tahem**

Statická zkouška tahem je jednou ze základních experimentálních mechanických zkoušek pro zjištění mechanických vlastností zkoušeného materiálu. Její provedení je normalizované normou ČSN EN ISO 6892-1. Norma určuje podmínky, během kterých lze zkoušku provádět (teplota, rychlost deformace atd.) Zkušební vzorek je buď kruhového nebo obdélníkového průřezu a jeho rozměry jsou opět definovány normou ČSN EN ISO 6892-1. Statická zkouška tahem je prováděna na trhacích strojích viz Obr. 19. Zkušební tělísko je upnuto do čelistí trhacího stroje a zatěžováno jednoosým tahem. V průběhu zkoušky je zaznamenávána zatěžující síla a absolutní prodloužení zkušebního tělíska průtahoměrem. Díky této skutečnosti lze poté stanovit závislost napětí na poměrném prodloužení a tím i mechanické vlastnosti zkoušeného materiálu. [18, 19]



*Obr. 19 Trhací stroj TIRA Test 2300*

### **3.2.1 Příprava vzorku pro tahovou zkoušku**

Pro provedení statické zkoušky tahem bylo zapotřebí připravit zkušební vzorky z materiálů zasláných firmou BOSAL. Firma zaslala několik typů materiálů (trubek), které pro výrobu výfukové koncovky používá viz Obr. 20. Experimentální zkoušení materiálů bylo provedeno na dvou typech materiálů. První z vybraných materiálů byla austenitická korozivzdorná ocel EN 1.4301, a jako druhý materiál byla zvolena feritická korozivzdorná ocel EN 1.4509. U obou materiálů byl totožný rozměr trubky, a to 60x1,5 mm.



*Obr. 20 Materiály zasláné firmou BOSAL*



Celá příprava vzorků probíhala v laboratorních prostorech katedry KSP. Jelikož byl zasláný materiál ve formě trubek, bylo zapotřebí jeho nařezání. Pro tuto operaci byla použita pásová pila BOMAR Ergonomic 275.230 DG. Trubka byla upnuta do svěráku pily a následně podélně rozříznuta na dvě poloviny, jak lze vidět na Obr. 21.

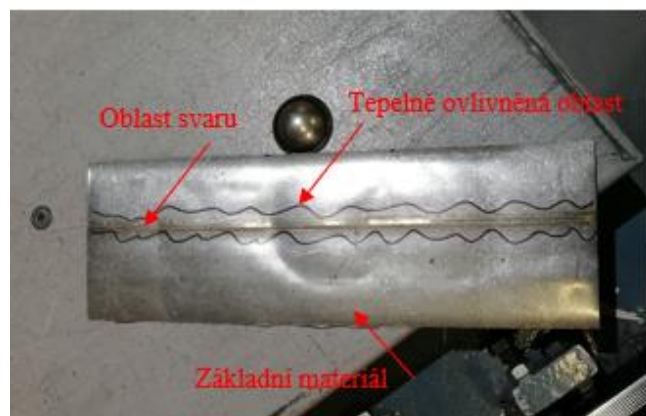


**Obr. 21** Podélné rozříznutí trubky pásovou pilou

V dalším kroku bylo zapotřebí rozříznuté poloviny trubek narovnat, pro jejich další zpracování. K této operaci byl použit hydraulický montážní lis CDC 2-7 viz Obr. 22, kde byla za pomoci pístu každá polovina trubky narovnána do formy plechu. Následně byly na plechu vyznačeny 3 oblasti. Oblast základního materiálu, oblast tepelně ovlivněné oblasti a oblast, kde se nacházel svar, jak lze vidět na Obr. 23.



**Obr. 22** Hydraulický montážní lis  
CDC 2-7



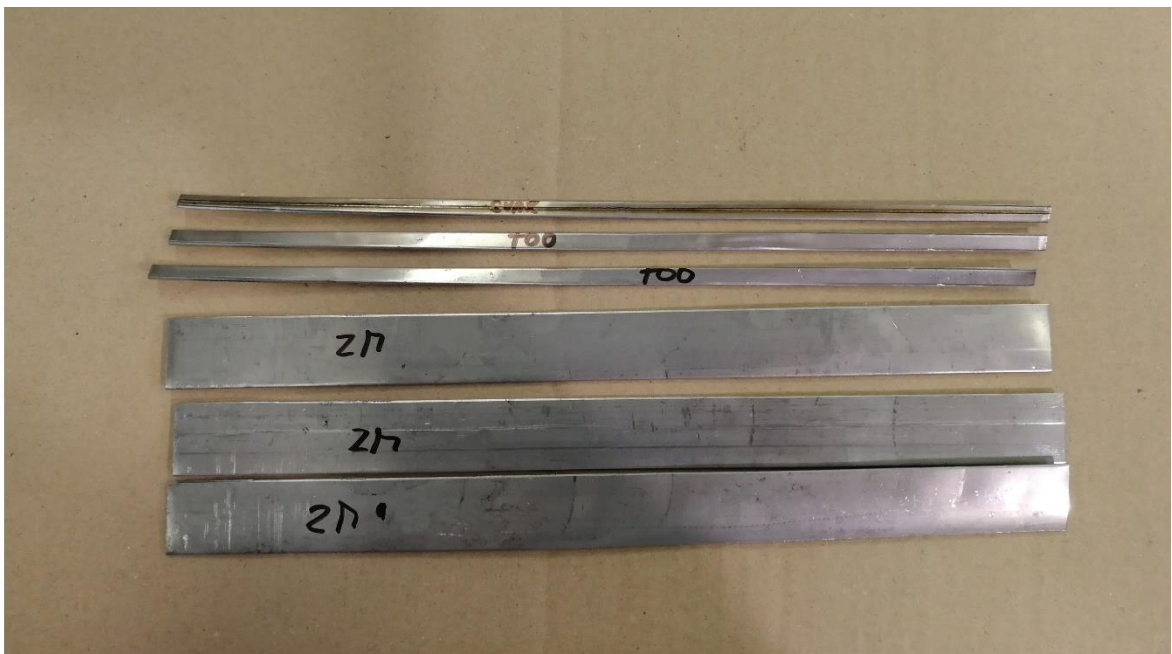
**Obr. 23** Vyznačení jednotlivých oblastí na materiálu



Jako další bylo nutné narovnaný a označený materiál nastříhat podle daných oblastí na zkušební vzorky. K tomu bylo zapotřebí použít tabulové nůžky MS2504 viz Obr. 24. Materiál byl nastříhán podle oblastí na zkušební vzorky a náležitě popsán, jak lze vidět na Obr. 25. Tím byly zkušební vzorky připraveny k použití při statické zkoušce tahem.



*Obr. 24 Tabulové nůžky MS2504*



*Obr. 25 Nastříhané zkušební vzorky*

### 3.2.2 Vlastní měření

Zjištění mechanických vlastností materiálů EN 1.4301 a EN 1.4509 tedy probíhalo pomocí statické zkoušky tahem provedené na trhacím stroji TIRA Test 2300 katedry KSP dle normy ČSN EN ISO 6892-1. U zkušebních vzorků byly ještě před vložením do čelistí trhacího stroje změřeny rozměry pomocí posuvného měřidla a úchylkoměru Mitutoyo viz Obr. 26 a Obr. 27. [19]



*Obr. 26 Posuvné měřidlo Mitutoyo*

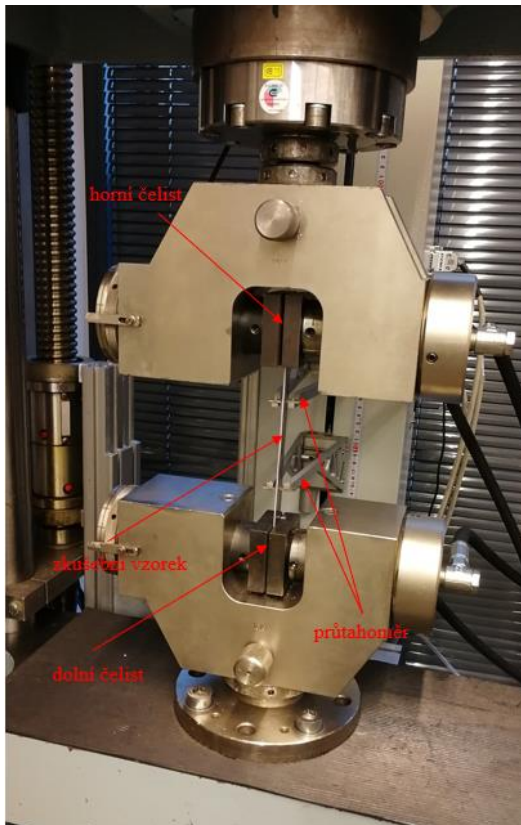


*Obr. 27 Měření úchylkoměrem Mitutoyo*

Po změření všech rozměrů zkušební vzorku, a jejich zadání do softwaru trhacího stroje, následovalo jeho upnutí do čelistí trhacího stroje. Nejprve došlo k upnutí do dolní čelisti stroje a následně se sevřela i vrchní čelist trhacího stroje. Při spuštění tahové zkoušky došlo k mírnému předpětí vzorku, pro jeho úplné narovnání v trhacím stroji. Následovalo



přiklopení průtahoměru ke zkušebnímu vzorku viz Obr. 28. Po přiklopení byl již vzorek zatěžován tažnou silou. Během zatěžování docházelo k postupnému prodlužování zkušebnímu vzorku až do dosažení meze pevnosti, kde došlo k prasknutí, jak lze vidět na Obr. 29. Následně byly obě části vzorku vyjmuty z čelistí trhacího stroje a čelisti vráceny do referenční polohy. Během měření byla softwarem stroje zaznamenávána tažná síla, kterou trhací stroj vyvinul, a dále prodloužení vzorku, které působením tažné síly nastalo.



**Obr. 28** Upnutí zkušebnímu vzorku



**Obr. 29** Přetržený zkušební vzorek

Tímto způsobem došlo ke změření všech vzorků materiálů EN 1.4301 a EN 1.4509. Pro každou ze tří oblastí z daných materiálů bylo provedeno 5 měření. Následně byla naměřená data vyhodnocena.

### 3.2.3 Vyhodnocení naměřených dat

Softwarem trhacího stroje byly vygenerovány protokoly o provedených statických zkouškách tahem. Software vypočítal výsledné tažnosti materiálu, modely pružnosti v tahu atd. Spolu s podmínkami, za jakých zkoušky probíhaly, je lze najít v přílohách č. 1-6. Jako další byla ze softwaru získána data o tažné síle a prodloužení zkoušeného vzorku. Ta byla použita na výpočet smluvního napětí  $R$ , poměrné deformace  $\epsilon$ , skutečného napětí  $\sigma$ , skutečné

deformace  $\varphi$  a skutečné plastické deformace  $\varphi_{\text{plast}}$ . Pro jejich výpočet byl použit software OriginPro 9.0, do kterého byly nadefinovány rovnice (1)-(5).

$$R = \frac{F}{S_0} = \frac{F}{a_0 * b_0} \quad (1)$$

kde značí:  $R$ .....smluvní napětí

$F$ .....tažná síla

$S_0$ .....plocha počátečního průřezu vzorku

$a_0$ .....tloušťka vzorku

$b_0$ .....šířka vzorku

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

kde značí:  $\varepsilon$ .....poměrná deformace

$\Delta L$ ...prodloužení vzorku

$L_0$ ...počáteční délka vzorku

$$\sigma = R * (1 + \varepsilon) \quad (3)$$

kde značí:  $\sigma$ .....skutečné napětí

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4)$$

kde značí:  $\varphi$ .....skutečná deformace

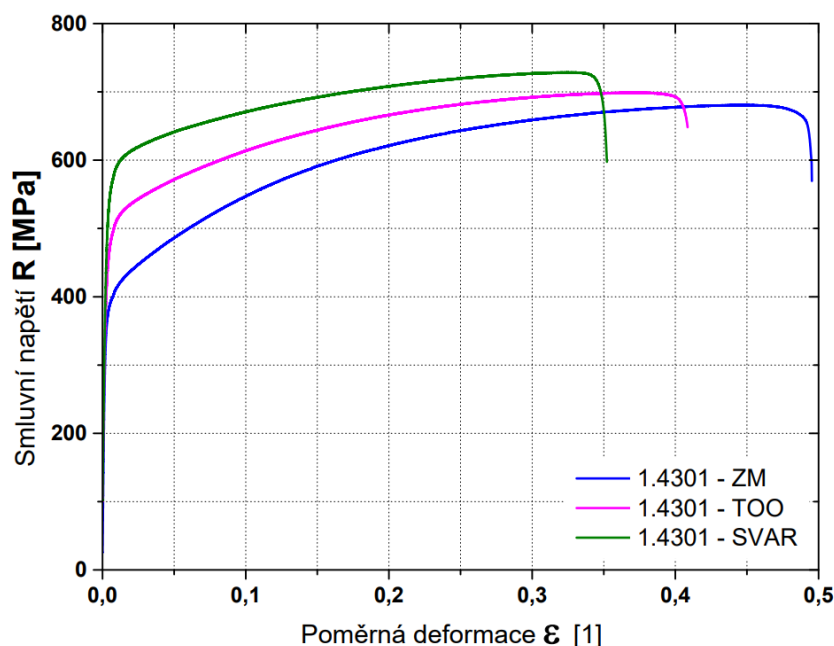
$$\varphi_{\text{plast}} = \varphi - \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

kde značí:  $\varphi_{\text{plast}}$ .....skutečná plastická deformace

$E$ .....modul pružnosti v tahu

Rovnice ( 1 )-( 5 ) byly aplikovány na všechny naměřené hodnoty u zkoušených vzorků. Výpočet probíhal stejně u vzorků z tepelně ovlivněné oblasti, základního materiálu i svaru obou materiálů.

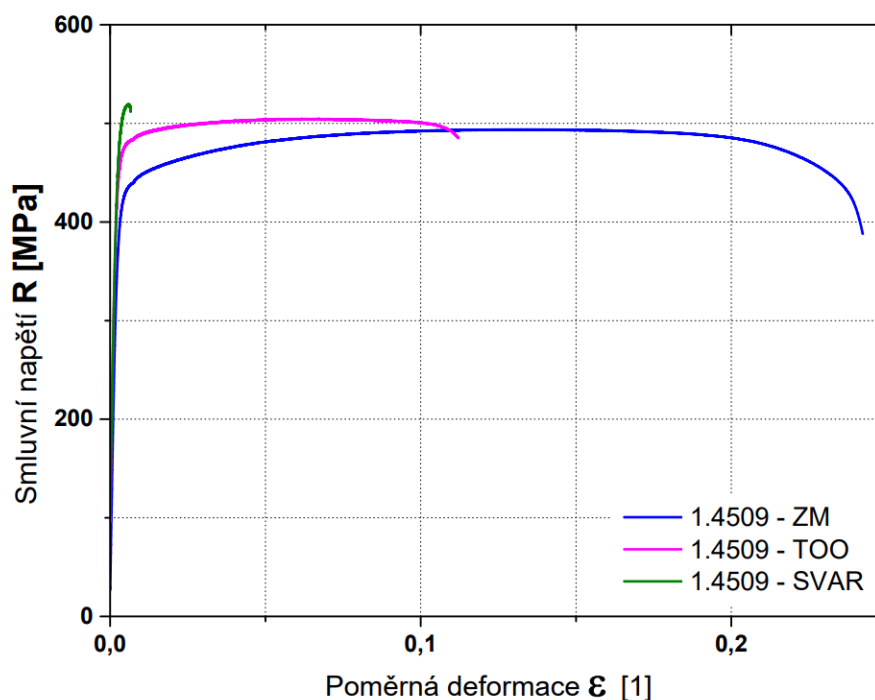
Tímto výpočtem byly získány potřebné hodnoty, které bylo nutné vypočítat pro sestavení grafů výsledných smluvních napětí R v závislosti na poměrné deformaci. Průběhy smluvního napětí v závislosti na poměrné deformaci materiálů EN 1.4301 a EN 1.4509 lze vidět na Obr. 30 a Obr. 31. Jejich mechanické vlastnosti lze nalézt v Tab. 1 a Tab. 2.



**Obr. 30** Graf závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci materiálu EN 1.4301

**Tab. 1** Naměřené mechanické vlastnosti materiálu EN 1.4301

Materiál EN 1.4301	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_g$ %	$A$ %	$E$ MPa
ZM	$377,84 \pm 1,27$	$680,64 \pm 2,73$	$43,93 \pm 0,64$	$48,83 \pm 0,71$	$171138 \pm 2084$
TOO	$463,48 \pm 6,56$	$697,87 \pm 2,79$	$36,22 \pm 0,34$	$39,99 \pm 0,90$	$157710 \pm 4760$
SVAR	$542,71 \pm 2,46$	$728,68 \pm 2,08$	$31,25 \pm 0,65$	$34,69 \pm 0,72$	$153126 \pm 3489$



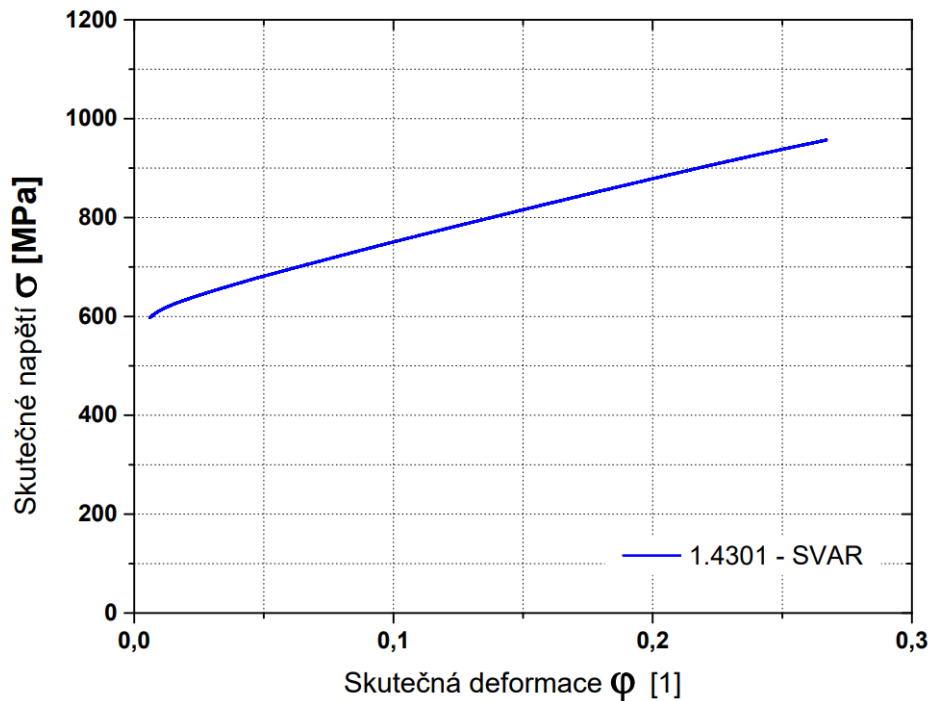
*Obr. 31 Graf závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci materiálu EN 1.4509*

*Tab. 2 Naměřené mechanické vlastnosti materiálu EN 1.4509*

Materiál EN 1.4509	$R_{p0.2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_g$ %	$A$ %	$E$ MPa
ZM	$425,72 \pm 4,53$	$495,68 \pm 3,50$	$12,41 \pm 0,40$	$24,52 \pm 1,10$	$164732 \pm 22468$
TOO	$471,58 \pm 7,88$	$506,08 \pm 6,18$	$6,17 \pm 0,46$	$9,45 \pm 2,42$	$183393 \pm 11712$
SVAR	$508,58 \pm 1,66$	$519,03 \pm 2,30$	$0,37 \pm 0,01$	$0,44 \pm 0,01$	$181278 \pm 3876$

### 3.2.4 Výpočet materiálových konstant

Pro nadefinování materiálových vlastností do numerické simulace bylo zapotřebí zjistit materiálové konstanty  $K$ ,  $n$  a  $\varphi_0$ . Jejich zjištění probíhalo pomocí aproximační rovnice Krupkowsky získané z knihovny softwaru PAM STAMP 2G viz (6). Nejprve bylo zapotřebí sestavit grafy závislostí skutečného napětí  $\sigma$  na skutečné deformaci  $\varphi$ . Následně byla naměřená data omezena od 1% poměrné deformace  $\varepsilon$  až do meze pevnosti  $R_m$  zkoušeného vzorku viz Obr. 32. Pro ukázkou výpočtu byl použit zkušební vzorek z oblasti svaru materiálu EN 1.4301.



**Obr. 32** Graf závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci materiálu EN 1.4301

Následně byla data aproximována podle rovnice Krupkowsky. Jelikož tuto rovnici (6) software OriginPro 9.0 neobsahuje, bylo ji nutné nadefinovat ručně.

$$\sigma = K * (\varphi + \varphi_0)^n \quad (6)$$

Kde značí:  $K$ ...modul monotónního zpevnění

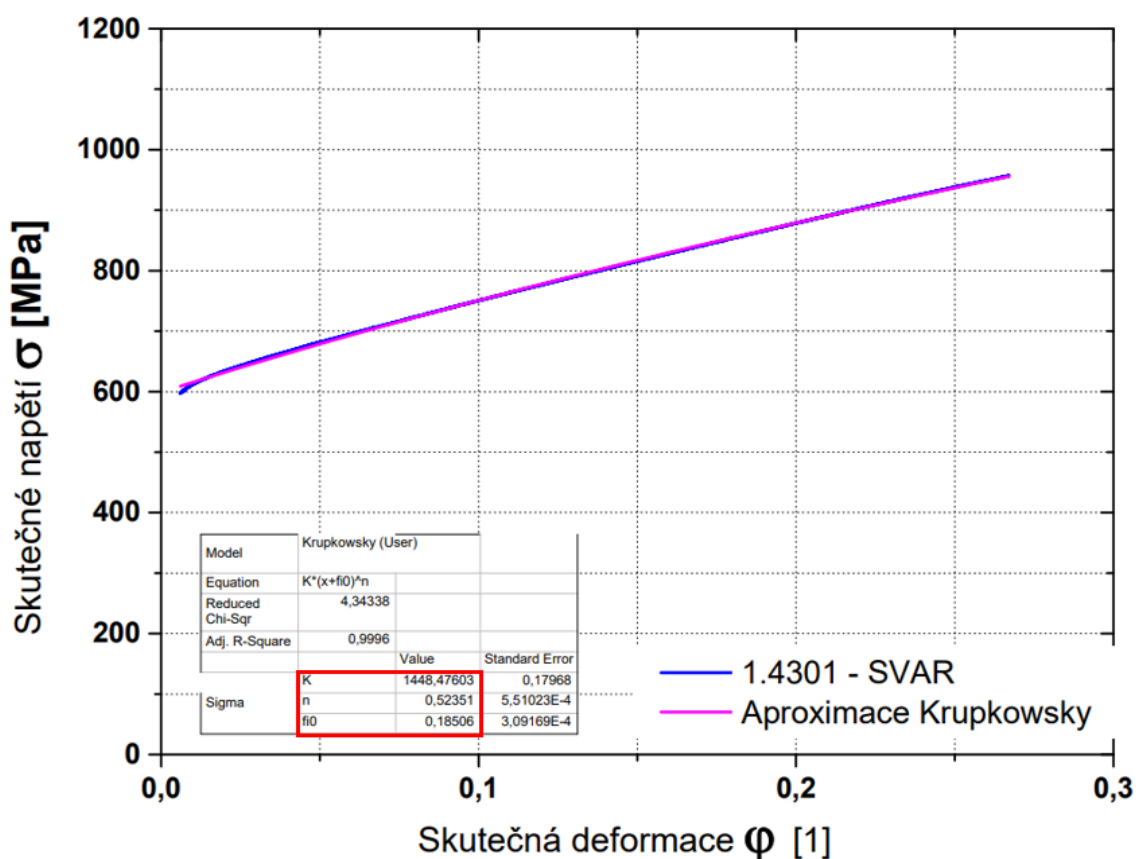
$\varphi_0$ ...offsetová deformace

$n$ ...exponent deformačního zpevnění

$\sigma$ ...skutečné napětí

$\varphi$ ...skutečná deformace

Touto aproximací byly zjištěny hledané materiálové konstanty  $K$ ,  $n$  a  $\varphi_0$ , jak je zobrazeno na Obr. 33.



Obr. 33 Aproximovaný graf závislosti skutečného napětí na skutečné deformaci materiálu EN 1.4301

Materiálové konstanty zkoušených materiálů EN 1.4301 a EN 1.4509 a jejich jednotlivých oblastí byly zprůměrovány vždy pro jednotlivou oblast (tepelně ovlivněnou oblast, základní materiál a oblast svaru) viz Tab. 3 a Tab. 4. V druhé části experimentu pak byly použity pro nadefinování materiálů trubek, ze kterých byla tvářena koncovka výfuku.

Tab. 3 Vypočítané konstanty materiálu EN 1.4301

Materiál EN 1.4301	K MPa	n 1	$\phi_0$ 1
ZM	1504 ± 2,04	0,50959 ± 2,2E-04	0,074755 ± 7,5E-05
TOO	1454 ± 5,3	0,505995 ± 3,2E-03	0,12941 ± 4,6E-03
SVAR	1446 ± 2,6	0,524045 ± 5,4E-04	0,18533 ± 2,8E-04

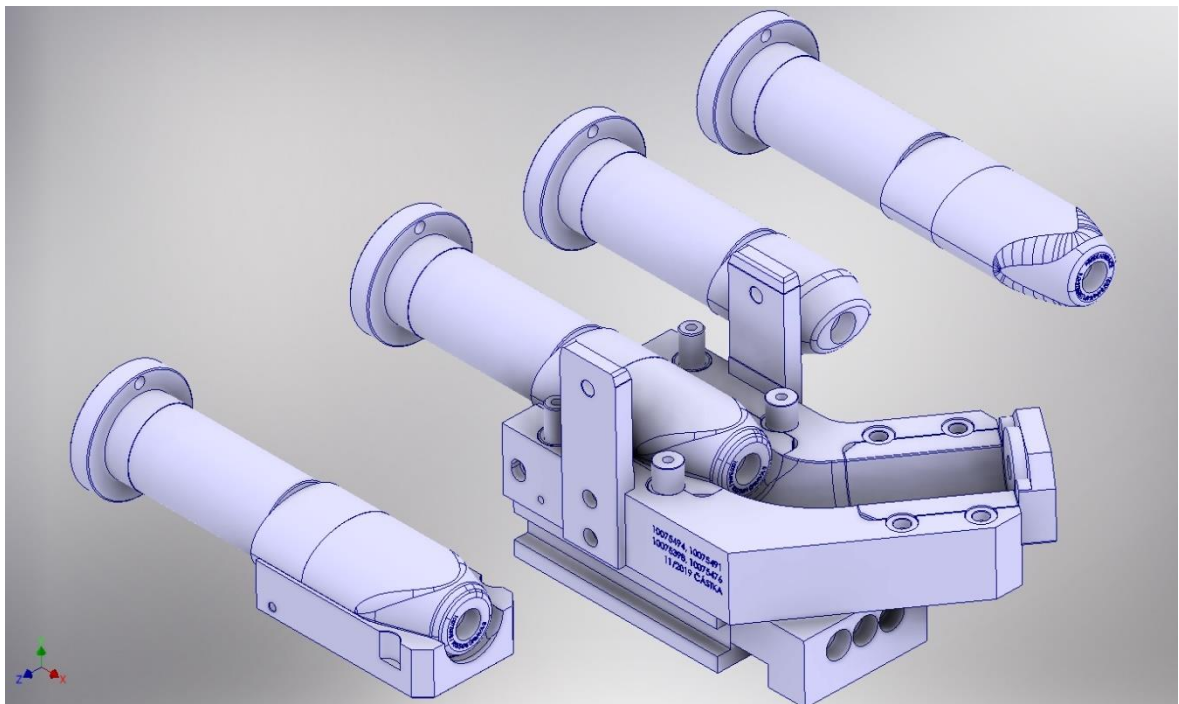


*Tab. 4 Vypočítané konstanty materiálu EN 1.4509*

Materiál EN 1.4509	K MPa	n 1	$\varphi_0$ 1
ZM	733 ± 5,9	0,14148 ± 4,2E-03	0,02399 ± 6,6E-04
TOO	627 ± 27	0,070275 ± 8,7E-03	0,016455 ± 5E-03
SVAR	651 ± 11,5	0,0377 ± 2,5E-03	1,00E-04

### 3.3 Příprava nástrojů pro simulaci

Pro druhou část experimentu, tj. numerickou simulaci, bylo zapotřebí vyseparovat funkční plochy 3D modelů nástrojů zaslané firmou BOSAL viz Obr. 34. Pro tento krok byl použit software Autodesk Inventor Professional 2021, který umožnil ze 3D modelů vyseparovat potřebné funkční plochy nástrojů použitých při tažení výfukové koncovky.

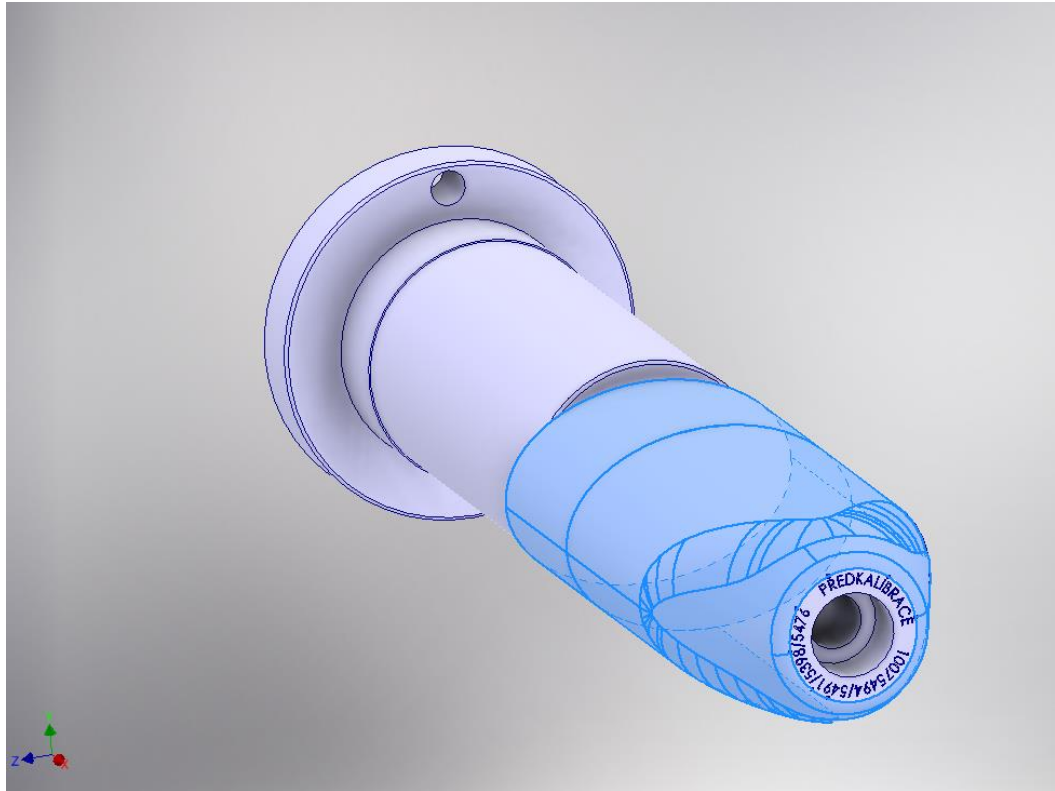


*Obr. 34 Ukázka 3D modelů nástrojů zaslaných firmou BOSAL*

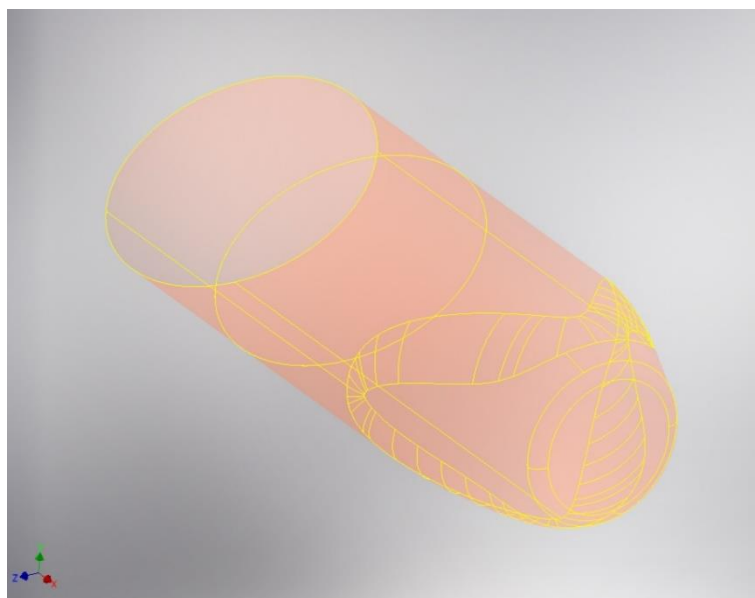
#### 3.3.1 Separace funkčních ploch nástrojů

Pro další postup bylo tedy zapotřebí vyseparovat ze zaslaných 3D modelů nástrojů funkční plochy. Funkční plochy nástrojů byly postupně označovány, jak lze vidět na Obr. 35. V dalším kroku byly z označených ploch nástrojů vytvořeny duté nástroje, tvořené pouze potřebnými funkčními plochami, viz Obr. 36. Takto upravené nástroje byly zapotřebí pro

simulaci ohybu výchozího polotovaru, rozšiřování a tváření do oválného tvaru. Následně došlo k jejich uložení ve formátu .igs, který lze importovat do softwaru PAM STAMP 2G. Takto připravené nástroje bylo možné využít pro nadefinování jejich pohybů při procesu tváření.



**Obr. 35** Ukázka separace funkčních ploch nástrojů



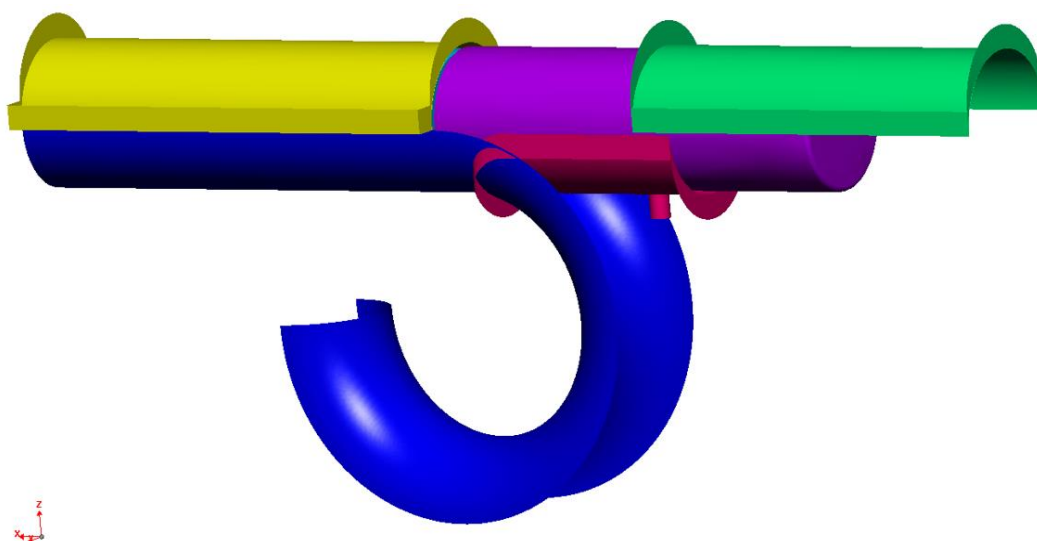
**Obr. 36** Tažník vytvořený separací ploch z původního nástroje

### 3.4 Numerická simulace

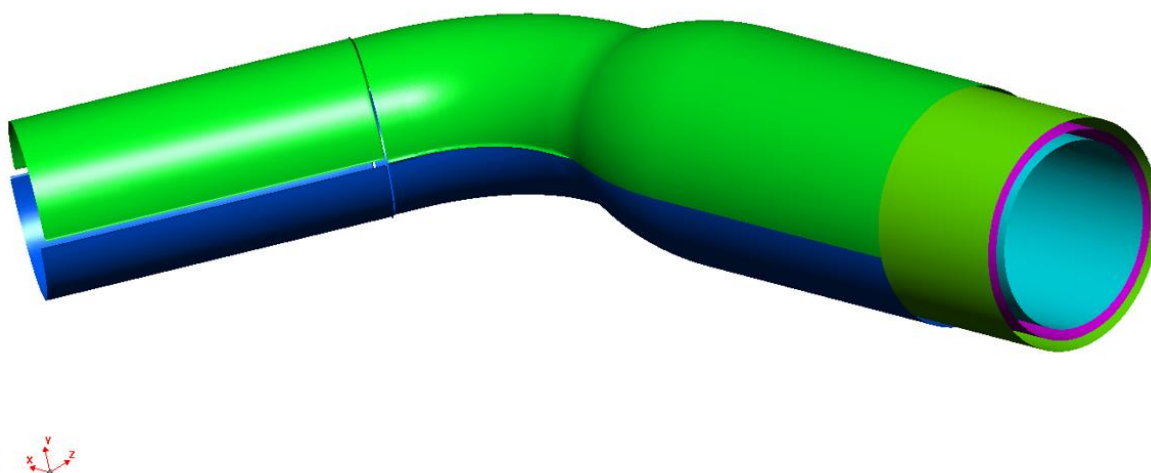
Druhou částí experimentu bylo sestavení numerické simulace. Jelikož bylo nutné nasimulovat proces tváření dvou materiálů, byly sestaveny 2 simulace, které se lišily pouze materiálem.

#### 3.4.1 Import nástrojů

Do softwaru PAM STAMP 2G byly naimportovány již připravené nástroje formátu .igs. Jednalo se nástroje pro ohyb, rozšíření a tváření oválného tvaru. Jednotlivé nástroje jsou zobrazeny na Obr. 37, Obr. 38 a Obr. 39.



*Obr. 37 Nástroje pro ohyb polotovaru*

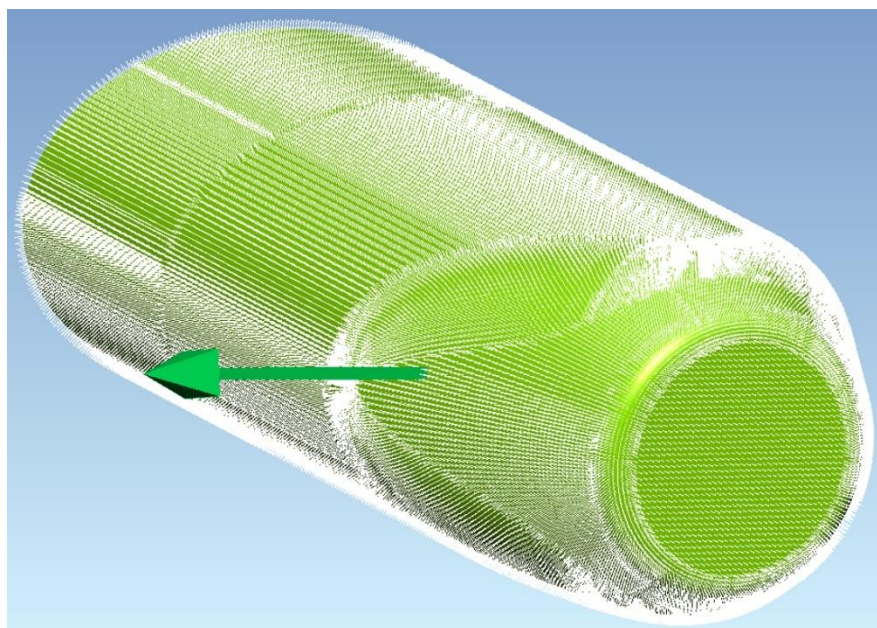


*Obr. 38 Nástroje pro rozšíření polotovaru*



*Obr. 39 Nástroje pro tváření polotovaru do oválu*

Jako další krok byla provedena orientace všech elementů nacházejících se na nástrojových plochách tak, aby jejich normály směřovaly do tvářeného materiálu viz Obr. 40. Tímto byly všechny nástroje připraveny pro nadefinování do jednotlivých kroků simulace.

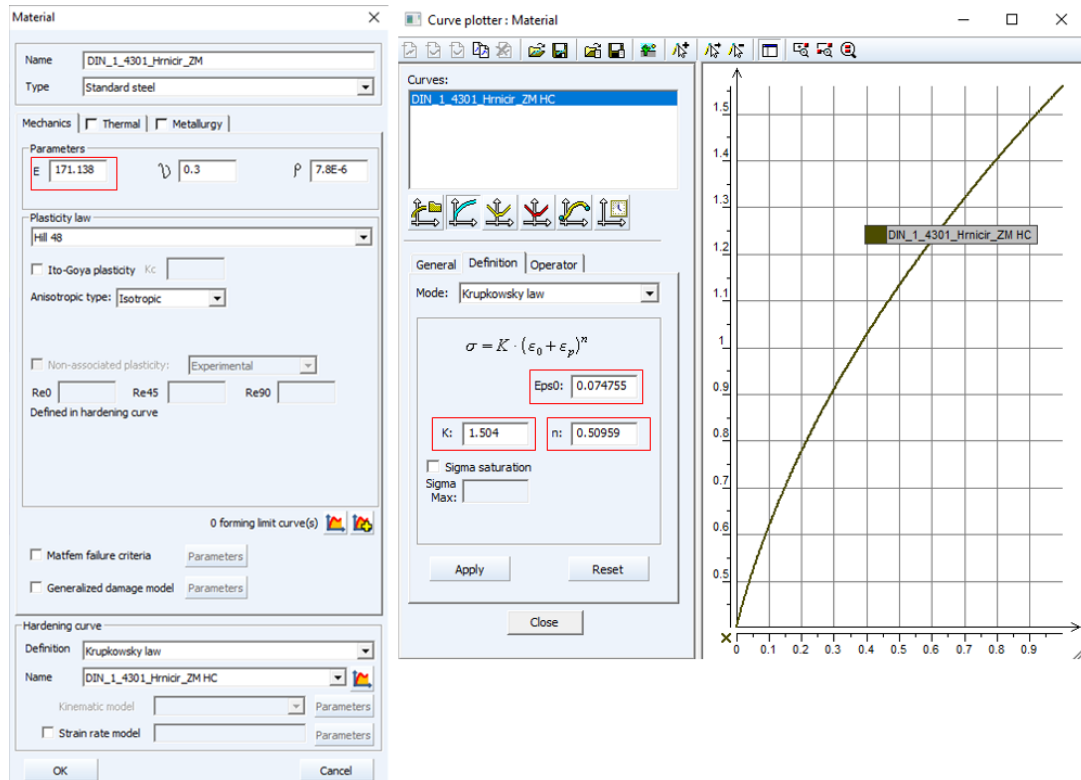


*Obr. 40 Ukázka orientace normál elementů tažníku*

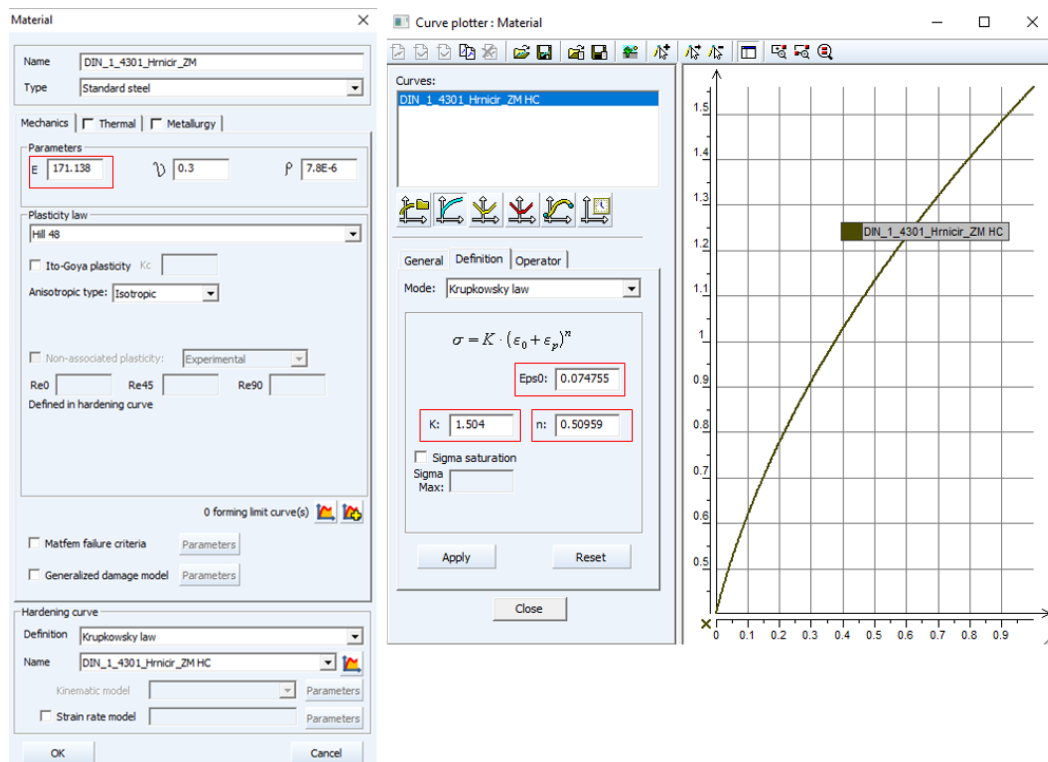
### **3.4.2 Nadefinování materiálů**

Jako další krok proběhlo nadefinování materiálů do softwaru. K tomu bylo zapotřebí použít již dříve spočítané materiálové konstanty  $K$ ,  $n$  a  $\varphi_0$ , jejichž výpočet byl řešen v kapitole 3.2.4 a modul pružnosti v tahu  $E$ , který byl blíže rozebírán v kapitole 3.2.3.

Software pracuje v jednotkách GPa, tudíž hodnotu  $K$  zadáváme v GPa. Postupně došlo k nadefinování obou materiálů EN 1.4301 a EN 1.4509, konkrétně jejich částí (TOO, SVAR, ZM). Názorná ukázka je zobrazena na oblastech ZM obou materiálů viz Obr. 41 a Obr. 42.



**Obr. 41** Nadefinování oblasti ZM materiálu EN 1.4301

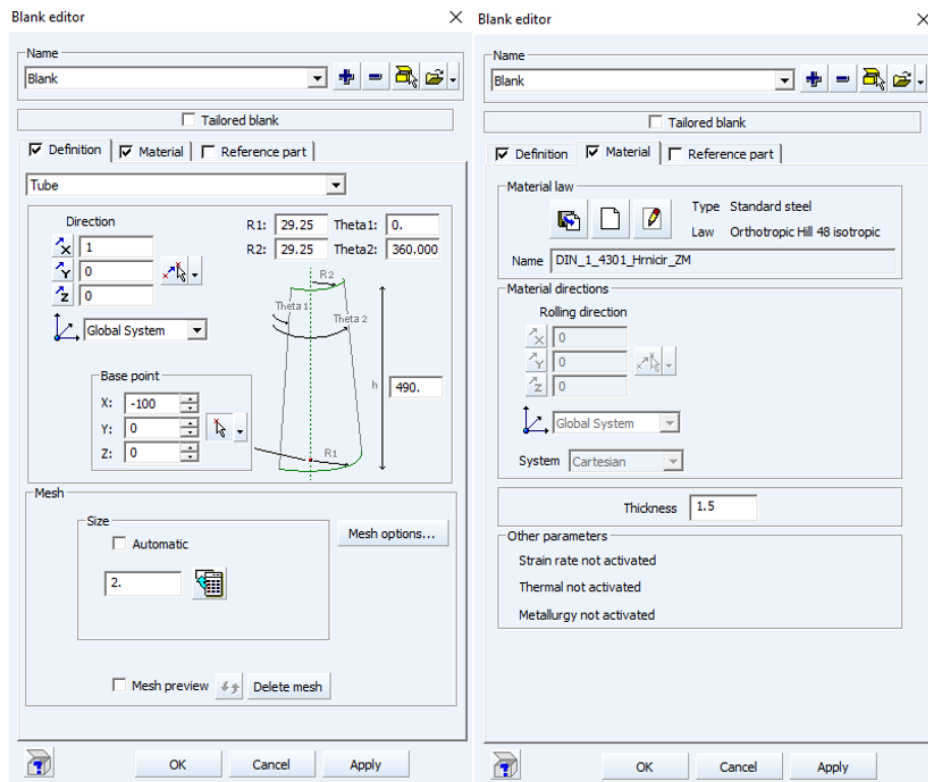


**Obr. 42** Nadefinování oblasti ZM materiálu EN 1.4509

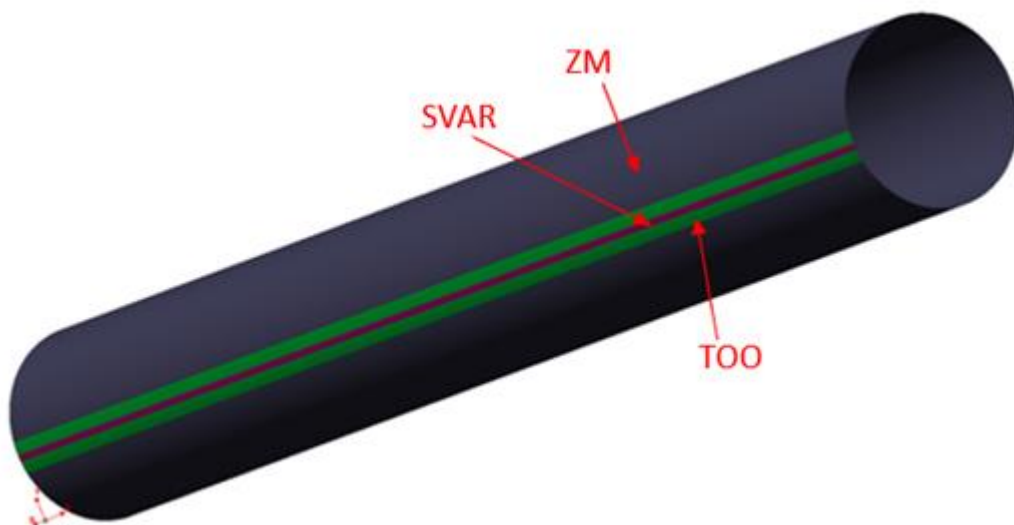


### 3.4.3 Vytvoření polotovaru

V dalším kroku numerické simulace bylo nutné vytvořit polotovar, tedy trubku, z které bude probíhat tváření výfukové koncovky. Byla nadefinována délka trubky, průměr i tloušťka stěny materiálu viz Obr. 43. Jelikož se trubka skládala ze třech oblastí, musel být polotovar rozdělen, a jednotlivým částem přiřazeny specifické mechanické vlastnosti, jak je zobrazeno na Obr. 44.

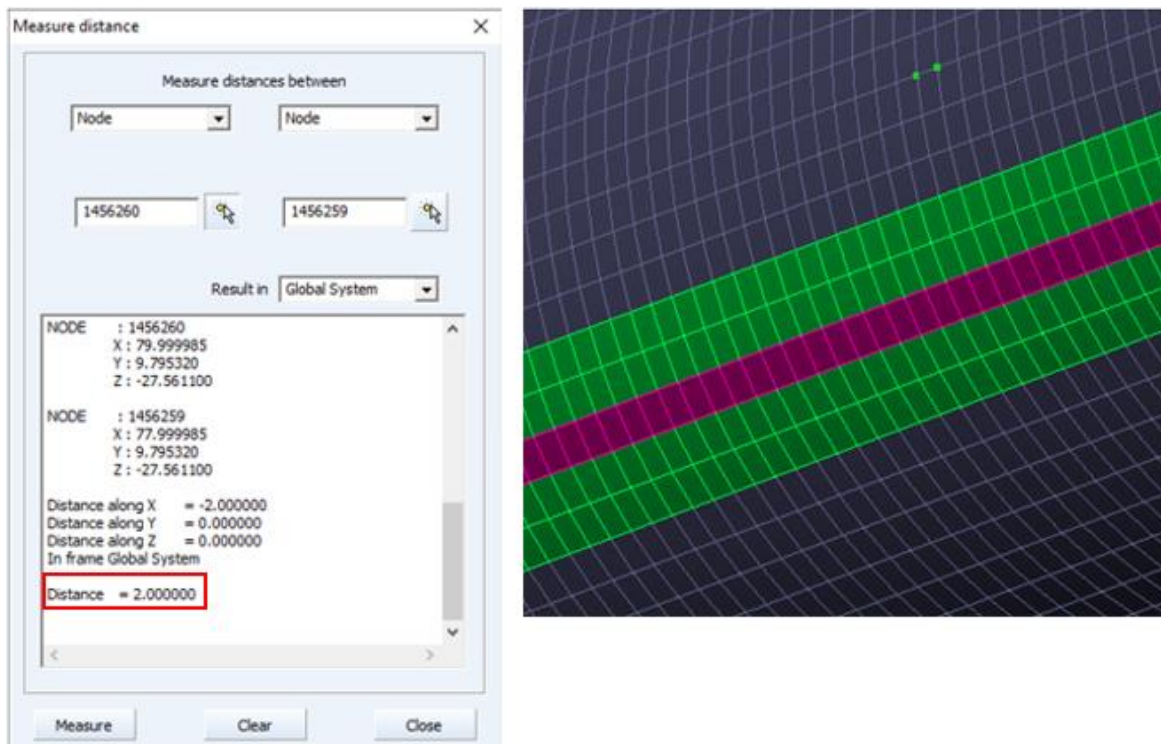


Obr. 43 Definování rozměrů polotovaru



Obr. 44 Rozdělení polotovaru do jednotlivých oblastí

Další podstatnou částí při vytváření polotovaru bylo nadefinování velikosti jednotlivých elementů konečno-prvkové sítě. Rozměr jednotlivých elementů byl zvolen 2 mm viz Obr. 45.



Obr. 45 Velikost elementů konečno-prvkové sítě polotovaru

### 3.4.4 Struktura procesu tažení

Celý proces tažení výfukové koncovky je tvořen několika kroky:

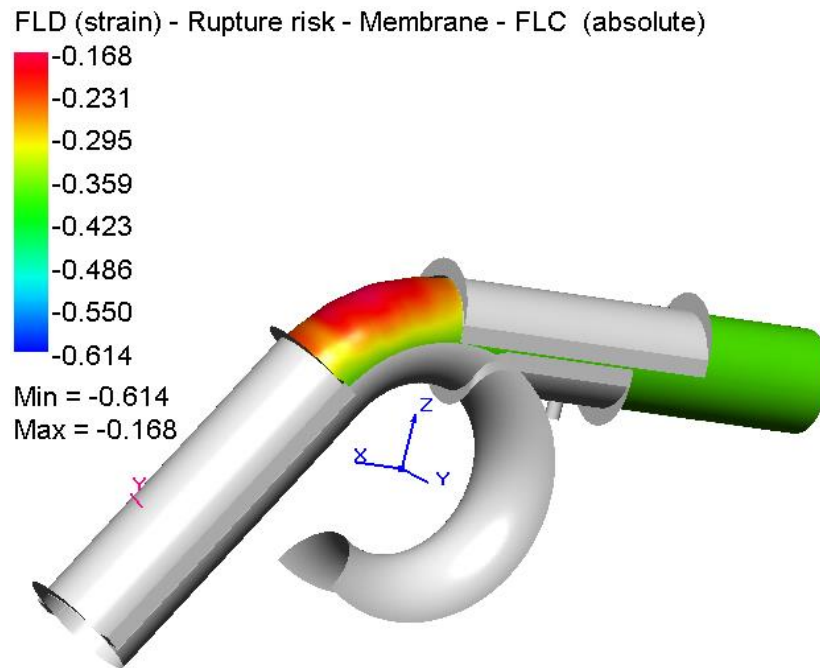
A) ohyb; B) přidržení; C) oříznutí; D) narovnání; E) rozšiřování 1. tah; F) rozšiřování 2. tah; G) rozšiřování 3. tah; H) přidržení; I) tváření 1. tah; J) tváření 2. tah; K) tváření 3. tah

V dalším kroku bylo tedy zapotřebí nadefinovat jednotlivé počáteční pozice pohybů nástrojů, aby byl celý proces totožný s reálným tažením výfukové koncovky. Pro názornou ukázkou simulace budou v další kapitole zobrazeny nejsignifikantnější kroky procesu, a to ohyb, rozšíření kruhového průřezu a tváření do oválného tvaru. Detailnější zobrazení simulace lze nalézt v přílohách č.7 až č.16.

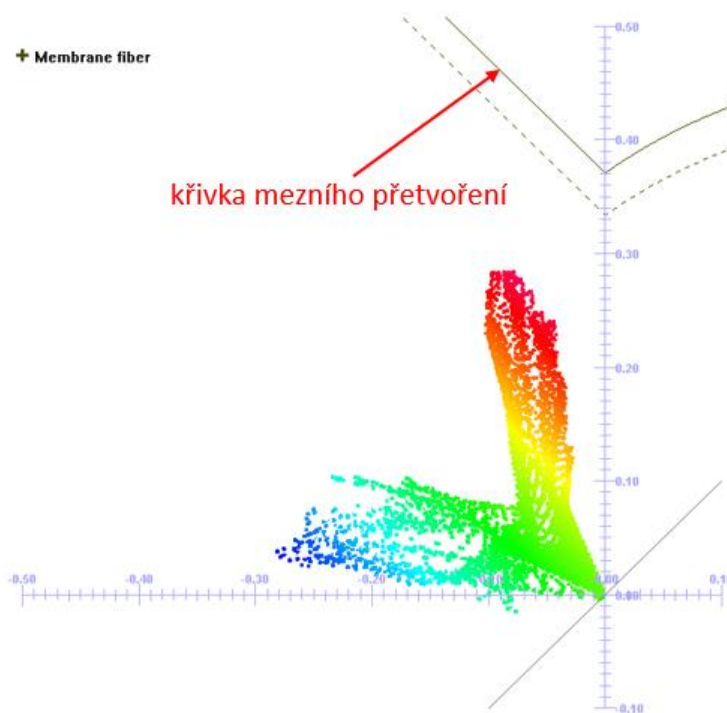
### 3.4.5 Průběh simulace materiálu EN 1.4301

Jako první proběhlo nasimulování průběhu tváření výfukové koncovky z materiálu EN 1.4301. Došlo k ohnutí polotovaru, jak je zobrazeno na Obr. 46. Během ohybu byla sledována deformace materiálu. Jelikož se hodnoty deformace pohybovaly v bezpečné

oblasti tváření, tj. pod křivkou mezního přetvoření, lze materiál takto ohnout bez rizika prasknutí viz Obr. 47.



*Obr. 46 Ohyb trubky z materiálu EN 1.4301*

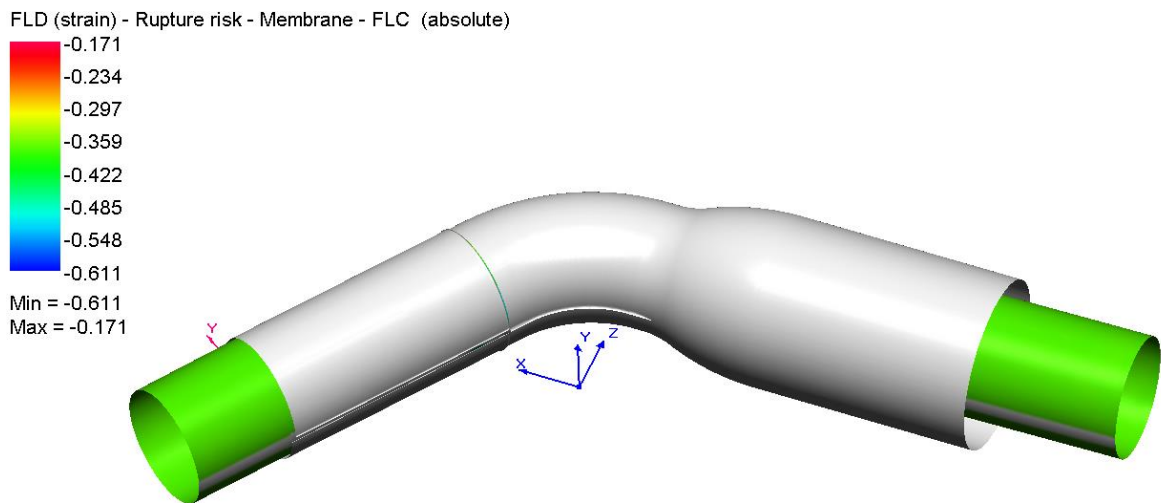


*Obr. 47 Křivka mezního přetvoření po ohybu materiálu EN 1.4301*

V dalším kroku tažení byl ohnutý polotovár vložen do formy pro rozšiřování kruhového průřezu viz Obr. 48, zkrácen na požadované rozměry a pomocným tažníkem

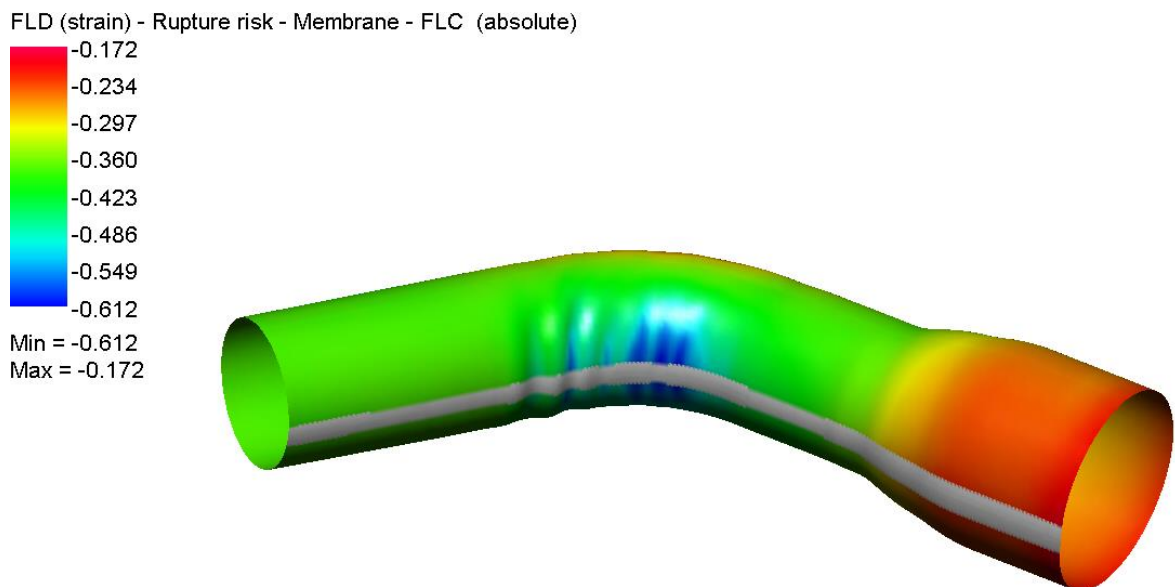


vycentrovány ve formě. Vycentrování pomocným tažníkem bylo nutné, kvůli odpružení polotovaru po ohybu.

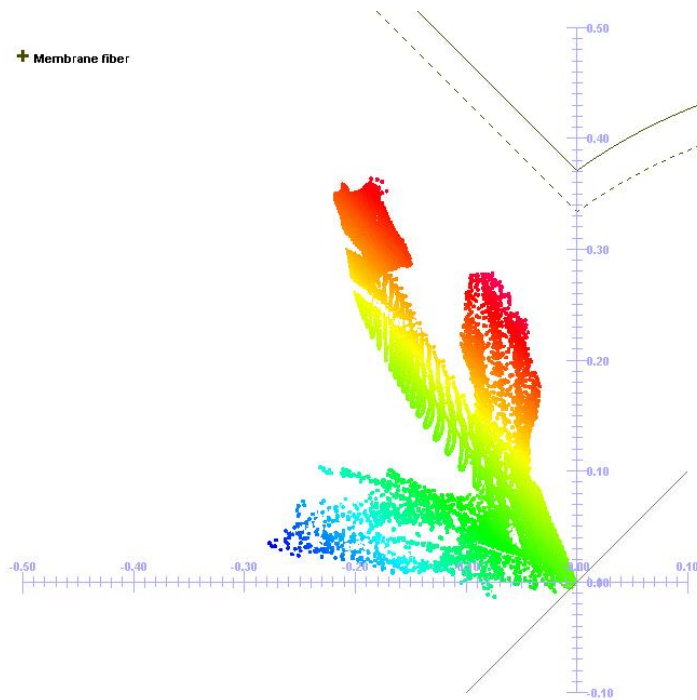


**Obr. 48** Vložení ohnutého polotovaru do formy pro rozšiřování

Následovalo postupné rozšiřování kruhového průřezu. Tato část procesu probíhala na tři tahy. Výslednou část simulace po třetím tahu rozšiřování, lze vidět na Obr. 49. Jako tomu bylo při ohybu, opět se hodnoty deformace držely pod křivkou mezního přetvoření, tudíž lze říct, že je možné polotovary takto rozšiřovat viz Obr. 50.



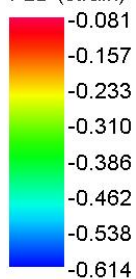
**Obr. 49** Rozšířený kruhový průřez po třetím tahu



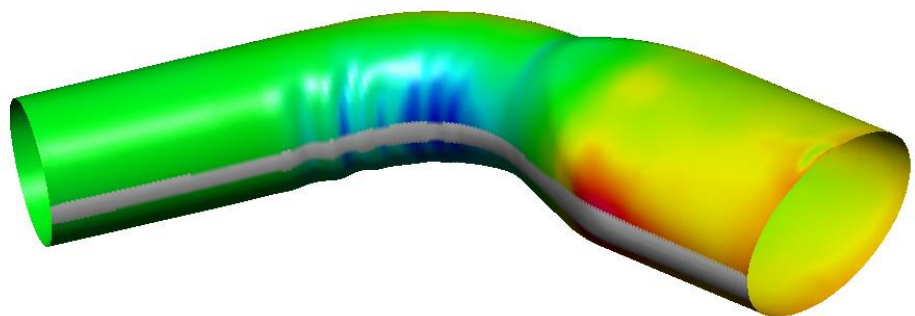
**Obr. 50** Křivka mezního přetvoření po třetím tahu rozšiřování kruhového průřezu

Jako poslední část tažení proběhlo tváření koncovky výfuku do oválného tvaru viz Obr. 51. Proces opět probíhal na tři tahy, jako tomu bylo u rozšiřování průřezu. Opět byla sledována deformace materiálu při tváření. Křivka mezního přetvoření nebyla překročena ani při tomto kroku simulace. Sice došlo k mírnému přiblížení k této křivce, ale ne k jejímu překročení, tudíž lze daný materiál takto tvářet bez rizika prasknutí, jak je zobrazeno na Obr. 52.

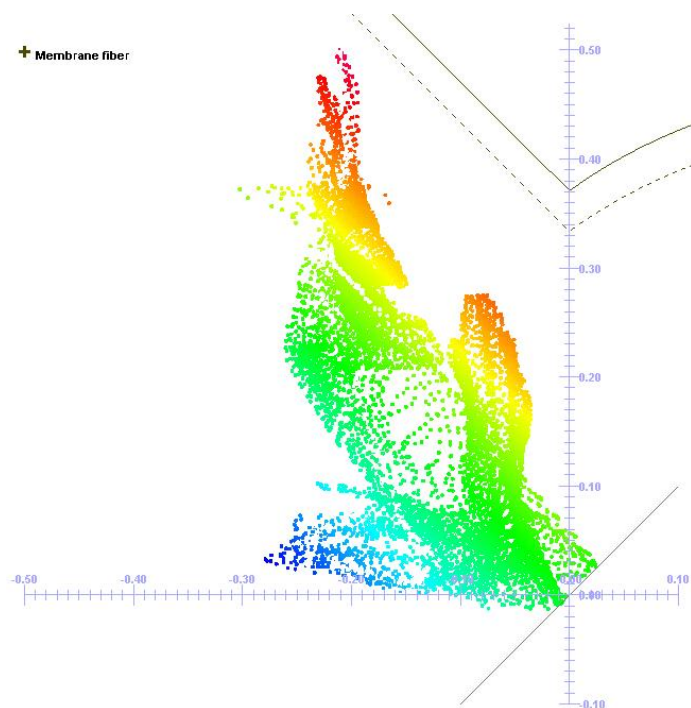
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



Min = -0.614  
Max = -0.081



**Obr. 51** Tváření do oválného tvaru po třetím tahu



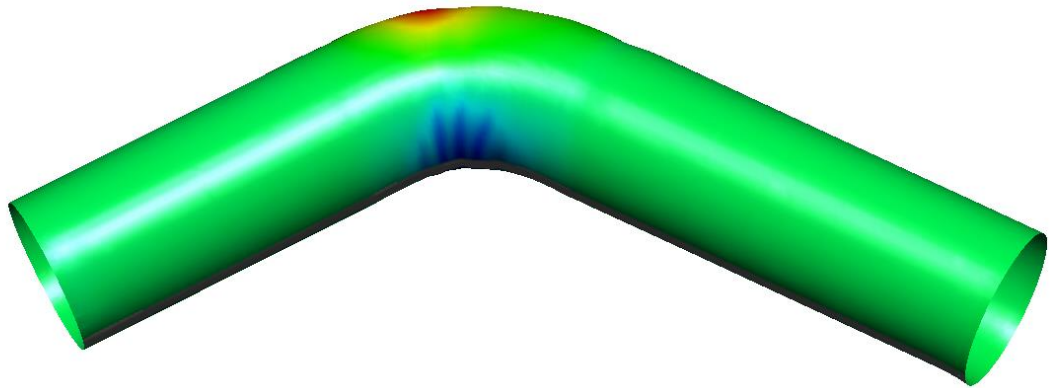
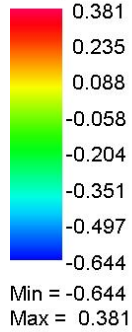
*Obr. 52 Křivka mezního přetvoření po třetím tahu tváření do oválného tvaru*

Po nasimulování průběhu tváření materiálu EN 1.4301 lze tedy soudit, že materiál lze použít pro daný typ výroby a nedojde k porušení výrobku.

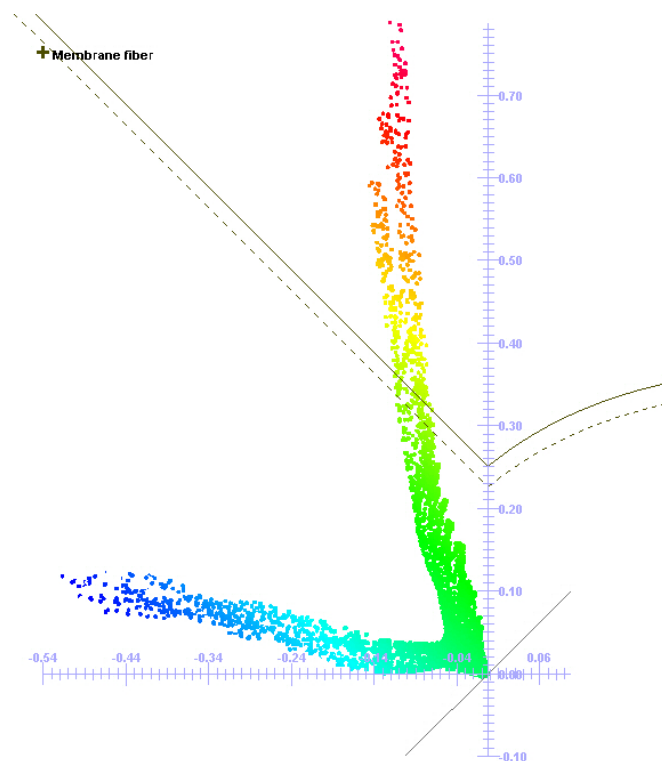
### **3.4.5 Průběh simulace materiálu EN 1.4509**

Druhým simulovaným materiálem byla již několikrát zmiňovaná feritická korozivzdorná ocel EN 1.4509. Jako tomu bylo u předchozí simulace, došlo nejprve k ohybu polotovaru, jak je zobrazeno na Obr. 53. Již při prvním kroku simulace můžeme sledovat úplně odlišné chování ohýbaného materiálu oproti materiálu EN 1.4301. Během ohybu deformace překonala výrazně křivku mezního přetvoření, a tím se celý proces ohybu ocitl mimo bezpečnou oblast tváření viz Obr. 54. Tento materiál tedy není schopen odolat ani prvotnímu ohybu. Pomineme-li, že materiál téměř s jistotou praskne již v první fázi tváření, můžeme pokračovat v simulaci, pro zjištění jeho chování při dalších krocích.

FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



*Obr. 53 Ohyb trubky z materiálu EN 1.4509*



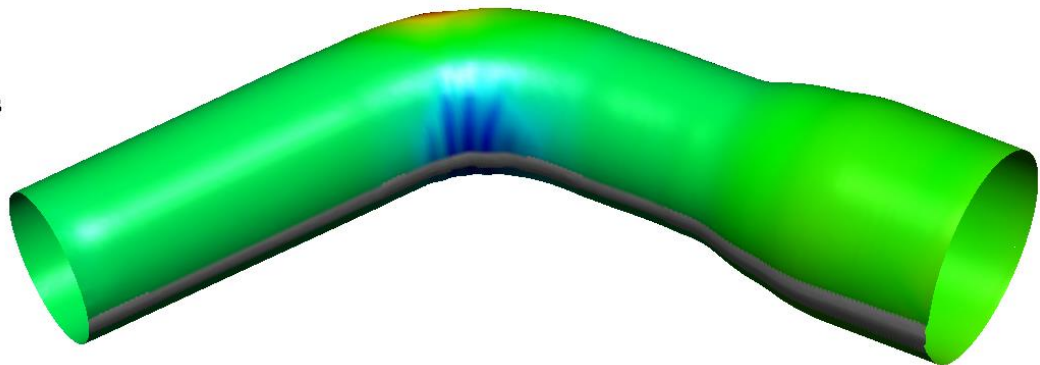
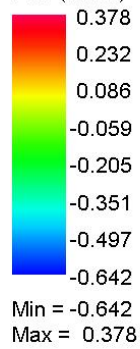
*Obr. 54 Křivka mezního přetvoření po ohybu materiálu EN 1.4509*

V dalším kroku byl opět ohnutý polotovár vložen do formy pro rozšiřování kruhového průřezu, zkrácen na požadované rozměry a pomocným tažníkem vycentrován ve formě. Tento krok byl totožný s předchozím simulovaným materiálem.

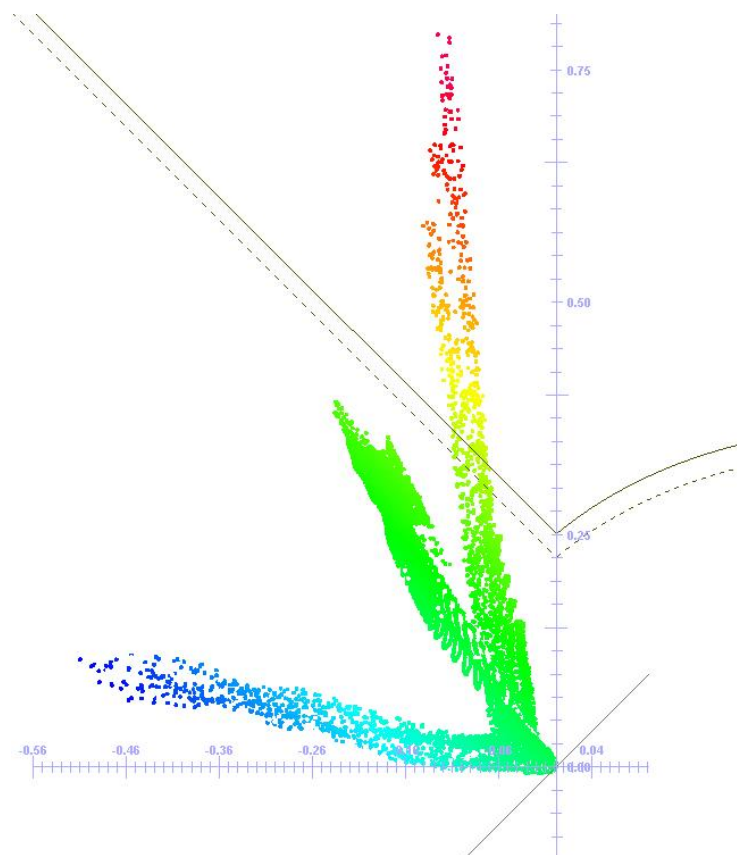
Opět následovalo jako při předchozí simulaci rozšiřování kruhového průřezu na tři tahy, z nichž poslední je zobrazen na Obr. 55. Znovu došlo k překročení křivky mezního

přetvoření, z čeho lze opět soudit, že by materiál tento typ tváření nemohl vydržet, a došlo by k porušení jeho integrity viz Obr. 56.

FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



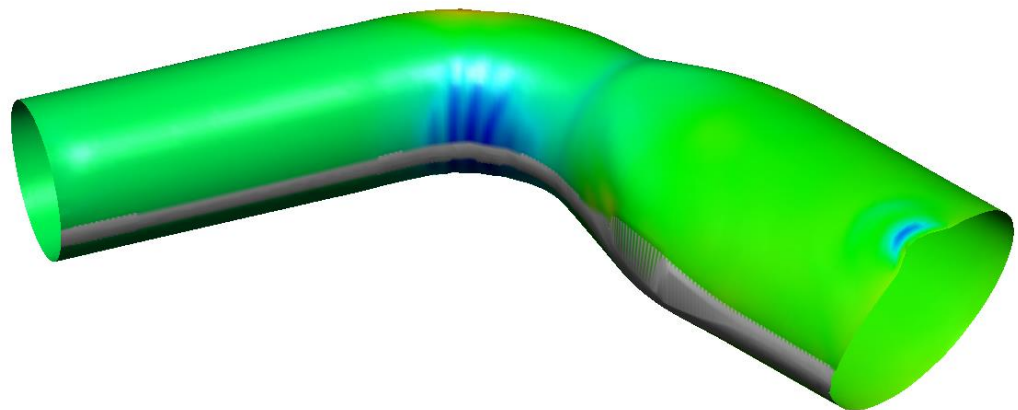
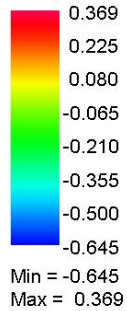
**Obr. 55** Rozšířený kruhový průřez po třetím tahu (EN 1.4509)



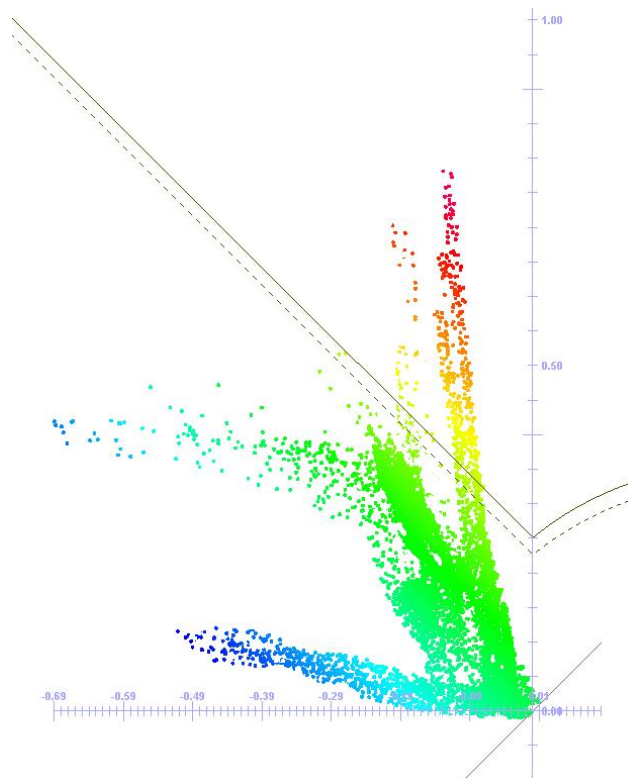
**Obr. 56** Křivka mezního přetvoření po třetím tahu rozšiřování kruhového průřezu (EN 1.4509)

Poslední částí simulace bylo opět tváření koncovky do oválného tvaru, které probíhalo na tři tahy viz Obr. 57. Jako v předchozích krocích byla výrazně překročena křivka mezního přetvoření, a tím se tváření ocitlo mimo bezpečnou oblast viz Obr. 58. Jelikož by simulovaný materiál nevydržel ani počáteční ohyb, lze s jistotou říct, že materiál EN 1.4509 je velice nevhodný pro tváření tohoto typu.

FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



**Obr. 57** Tváření do oválného tvaru po třetím tahu (EN 1.4509)



**Obr. 58** Křivka mezního přetvoření po třetím tahu tváření do oválného tvaru (EN 1.4509)

## 4. Diskuse

V první části experimentu byly nejprve připraveny zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem ze zaslaných materiálů. Následně bylo u obou materiálů provedeno zjištění mechanických vlastností s použitím již zmíněné statické zkoušky tahem. Již v této fázi experimentu se začaly projevovat zjevné rozdíly obou materiálů. Austenitická korozivzdorná ocel EN 1.4301 vykazovala tažnost přibližně necelých 50 % viz Tab. 1, zatímco feritická korozivzdorná ocel EN 1.4509 se pohybovala s hodnotami maximální tažnosti kolem 25 %, ovšem v oblasti svaru byla téměř nulová viz Tab. 2. Z toho bylo možné usoudit, že materiál EN 1.4509 bude obtížné tvářet, a tudíž nebude možné použít tento materiál jako náhradu za austenitickou ocel EN 1.4301. Tento úsudek bylo zapotřebí potvrdit nasimulováním procesu tažení výfukové koncovky pomocí softwaru PAM STAMP 2G.

V druhé části experimentu tedy byly provedeny numerické simulace tažení výfukové koncovky. Pro první simulaci byla aplikována austenitická korozivzdorná ocel EN 1.4301 a druhá simulace proběhla s feritickou korozivzdornou ocelí EN 1.4509.

První ze zmiňovaných materiálů prokázal, že jeho tažnost je velice vysoká již při mechanické zkoušce, tudíž se očekávalo, že simulace proběhne bez komplikací. Materiál během simulace nevykazoval žádné známky přetížení, a celý proces tváření se pohyboval v bezpečné oblasti pod křivkou mezního přetvoření. Materiál EN 1.4301 splnil očekávání, a je pro daný proces tažení velice vhodný. Na druhou stranu se ovšem pro výrobu výfukové koncovky nehodí. Materiál EN 1.4301 totiž není určen pro aplikaci v oblastech, kde je vystaven vysokým teplotním vlivům.

Druhým simulovaným materiálem byla feritická korozivzdorná ocel EN 1.4509. Už při zkoušce mechanických vlastností materiálu byla zjištěna nízká tažnost. Tento fakt se projevil již při prvním kroku simulace, a to ohybu polotovaru, kdy deformace materiálu překročila křivku mezního přetvoření. Touto skutečností se tváření ocitlo mimo bezpečnou oblast, tudíž by už při ohýbání došlo k porušení integrity materiálu, a tím i k prasknutí polotovaru. V dalších krocích simulace se opakoval stejný scénář. Simulace potvrdila očekávané chování materiálu a prokázala, že feritická ocel EN 1.4509 není vhodnou náhradou za austenitickou ocel EN 1.4301 vzhledem k charakteru tváření. Aplikace materiálu EN 1.4509 je sice vhodná do oblastí, kde je materiál vystaven vysokým teplotám, ale z hlediska své nízké tažnosti je pro tváření nevhodný. Využit by mohl být materiál EN 1.4509 na rovné úseky výfukových systémů, ne však pro složité tvářecí operace.



## 5. Závěr

Cílem bakalářské práce byla analýza deformace a tvarové stability výfukové koncovky, zhotovené z korozivzdorné austenitické oceli EN 1.4301 a korozivzdorné feritické oceli EN 1.4509. Bylo zjištěno několik podstatných informací, které lze využít při volbě materiálu pro daný proces tváření výfukové koncovky.

Používaný materiál EN 1.4301 sice vyniká svou tažností, ale z hlediska prostředí, kterému je výfuková koncovka vystavena, je nevhodný. Naopak druhý testovaný materiál EN 1.4509 je pro výrobu výfukových systémů v automobilovém průmyslu ideální z hlediska jeho odolnosti vůči vysokým teplotám. Mechanické zkoušení i následná simulace však potvrdila, že jeho aplikace na tváření takto složitých tvarů, je téměř nemožná. Využit může být pro výrobu rovných úseků výfukových systémů.

Dalším možným řešením tohoto problému je testování korozivzdorných materiálů, které jsou vhodné nejen v prostředí s vysokými teplotami, ale hlavně vykazují vyšší tažnost, než zkoušený materiál EN 1.4509.

V automobilovém průmyslu je používáno mnoho druhů korozivzdorných, žáruvzdorných a žárupevných ocelí, ale pro tento typ výfukové koncovky je nutné využít materiál, který bude vykazovat kombinaci jak vysoké tažnosti, tak vysoké odolnosti vůči vysokým teplotám. Jako jeden z možných materiálů pro výrobu tohoto typu výfukové koncovky, se jeví austenitická ocel EN 1.4818, která dosahuje tažnosti okolo 40 % a navíc je vhodná pro použití při teplotách až 1000 °C, nevýhodou však může být vyšší cena.



## Literatura

- [1] ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická, roč. 104, 1999, čís. spisu 471. ISBN 978-80-200-0671-4.
- [2] ČSN EN 10020. *Definice a rozdělení ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [3] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [4] ŠENBERGER, Jaroslav a Antonín ZÁDĚRA. *Studijní opory: Metalurgie oceli na odlitky* [online]. [vid. 2022-04-13]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2\\_10\\_2.html](http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_10_2.html)
- [5] *Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití* [online]. [vid. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
- [6] MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univerzita. 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [7] *Materials for Automotive Exhaust System* [online]. [vid. 2022-04-14]. Dostupné z: [https://www.ijrdet.com/files/Volume2Issue3/IJRDET\\_0314\\_12.pdf](https://www.ijrdet.com/files/Volume2Issue3/IJRDET_0314_12.pdf)
- [8] *JIS G4304 stainless steel* [online]. [vid. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://gangsteel.net/product/Stainless/JIS/G4304/2013/0103/SUS436L.html>
- [9] *METALCOR-Datasheet* [online]. [vid. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.metalcor.de/en/datenblatt/25/>
- [10] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 2. 1. díl*. Praha: Scientia, 2001. ISBN 978-80-7183-244-7.
- [11] SOLFRONK, Pavel. Technologie tažení. In: [online]. B.m. [vid. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/course/view.php?id=6973>
- [12] *Mold technology-Deep Drawing* [online]. [vid. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://mold-technology4all.blogspot.com/2011/08/deep-drawing.html>
- [13] LENFELD, Petr, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, a KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *Technologie II. 1. část (Tváření kovů)*. 2016. ISBN 978-80-7494-304-1.
- [14] NETO, D.M., M.C. OLIVEIRA, J.L. ALVES a L.F. MENEZES. Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation. *Materials & Design* [online]. 2014, 60, 368–379. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2014.04.008
- [15] SOLFRONK, Pavel. *Numerická podpora výroby výlisků z plechu*. B.m., 2012. Habilitační práce. b.n.
- [16] DAVIES, Geoff. *Materials for automobile bodies*. second edition. Amsterdam: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.

- [17] ŽABKA, Petr. Úvod do numerických simulací. In: [online]. B.m. [vid. 2022-04-21]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/folder/view.php?id=309778>
- [18] Statická zkouška tahem. In: [online]. B.m. [vid. 2022-05-06]. Dostupné z: [https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/274081/mod\\_resource/content/1/TKP\\_CV\\_02\\_SZT.pdf](https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/274081/mod_resource/content/1/TKP_CV_02_SZT.pdf)
- [19] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2021.

## Seznam příloh

- Příloha č.1** Protokol statické zkoušky tahem oblasti základního materiálu EN 1.4301
- Příloha č.2** Protokol statické zkoušky tahem tepelně ovlivněné oblasti materiálu EN 1.4301
- Příloha č.3** Protokol statické zkoušky tahem oblasti svaru materiálu EN 1.4301
- Příloha č.4** Protokol statické zkoušky tahem oblasti základního materiálu EN 1.4509
- Příloha č.5** Protokol statické zkoušky tahem tepelně ovlivněné oblasti materiálu EN 1.4509
- Příloha č.6** Protokol statické zkoušky tahem oblasti svaru materiálu EN 1.4509
- Příloha č.7** Ohyb polotovaru
- Příloha č.8** Uzavření formy a oříznutí na požadovaný rozměr
- Příloha č.9** Narovnání polotovaru ve formě
- Příloha č.10** První tah pro rozšíření kruhového průřezu
- Příloha č.11** Druhý tah pro rozšíření kruhového průřezu
- Příloha č.12** Třetí tah pro rozšíření kruhového průřezu
- Příloha č.13** Zmáčknutí rozšířeného konce polotovaru formou
- Příloha č.14** První tah pro tváření do oválného tvaru průřezu
- Příloha č.15** Druhý tah pro tváření do oválného tvaru průřezu
- Příloha č.16** Třetí tah pro tváření do oválného tvaru průřezu

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

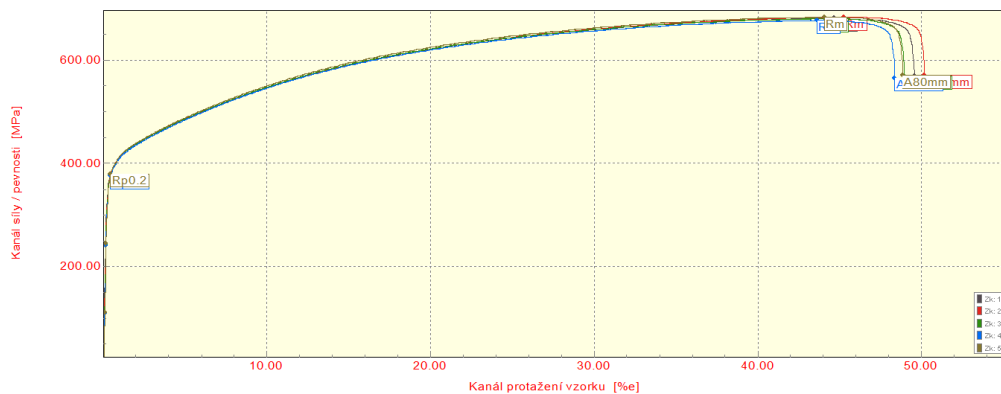
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : 1.4301 (označení dle EN)  
 Rozměry vzorku : [1,5 x 5] mm  
 Směr odebrání vzorku : Trubka  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 26.11.2021  
 Pozn. : ZM

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	377.57	680.76	44.28	49.22	169817
2	378.54	682.81	44.84	49.84	168199
3	377.62	680.08	43.73	48.61	171767
4	376.02	676.36	43.20	48.02	172936
5	379.44	683.16	43.62	48.49	172970

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	377.84	680.64	43.93	48.83	171138
Směrodatná odchylka	1.27	2.73	0.64	0.71	2084
Minimální hodnota	376.02	676.36	43.20	48.02	168199
Maximální hodnota	379.44	683.16	44.84	49.84	172970



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

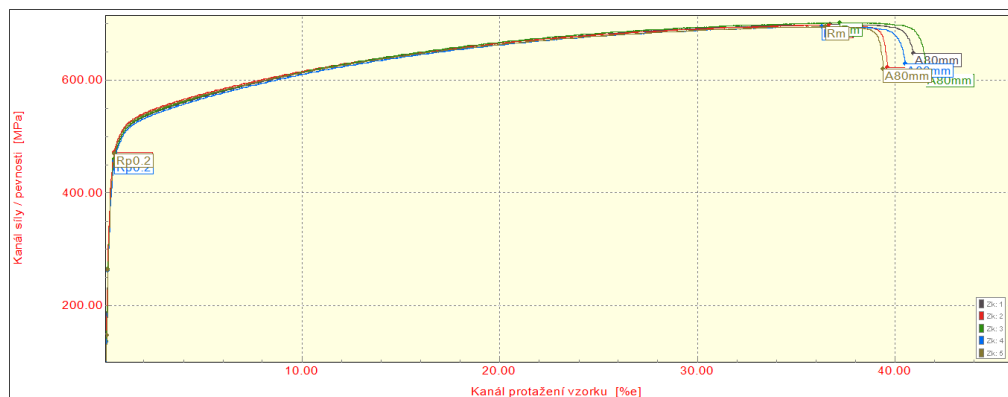
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : 1.4301 (označení dle EN)  
 Rozměry vzorku : [1,5 x 5] mm  
 Směr odebrání vzorku : Trubka  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 26.11.2021  
 Pozn. : TOO

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	459.01	699.07	36.27	40.50	154392
2	471.45	698.07	36.26	39.22	162646
3	460.06	701.79	36.72	41.17	153056
4	457.26	695.03	35.82	40.07	155419
5	469.64	695.40	36.03	38.98	163036

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	463.48	697.87	36.22	39.99	157710
Směrodatná odchylka	6.56	2.79	0.34	0.90	4760
Minimální hodnota	457.26	695.03	35.82	38.98	153056
Maximální hodnota	471.45	701.79	36.72	41.17	163036



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

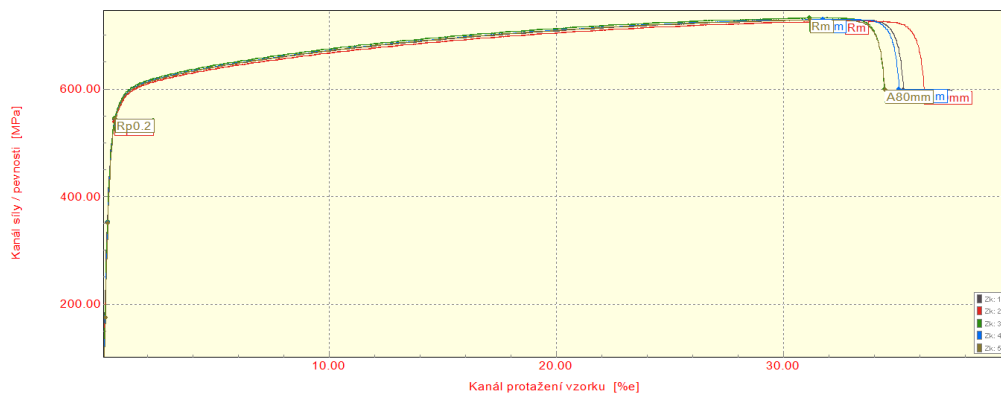
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : 1.4301 (označení dle EN)  
 Rozměry vzorku : [1,5 x 5] mm  
 Směr odebrání vzorku : Trubka  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 26.11.2021  
 Pozn. : SVAR

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	542.53	728.68	31.43	34.90	152168
2	538.94	725.84	32.24	35.79	147786
3	545.79	731.54	30.66	34.04	156585
4	543.16	729.39	31.24	34.68	153269
5	543.13	727.96	30.66	34.04	155820

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	542.71	728.68	31.25	34.69	153126
Směrodatná odchylka	2.46	2.08	0.65	0.72	3489
Minimální hodnota	538.94	725.84	30.66	34.04	147786
Maximální hodnota	545.79	731.54	32.24	35.79	156585



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

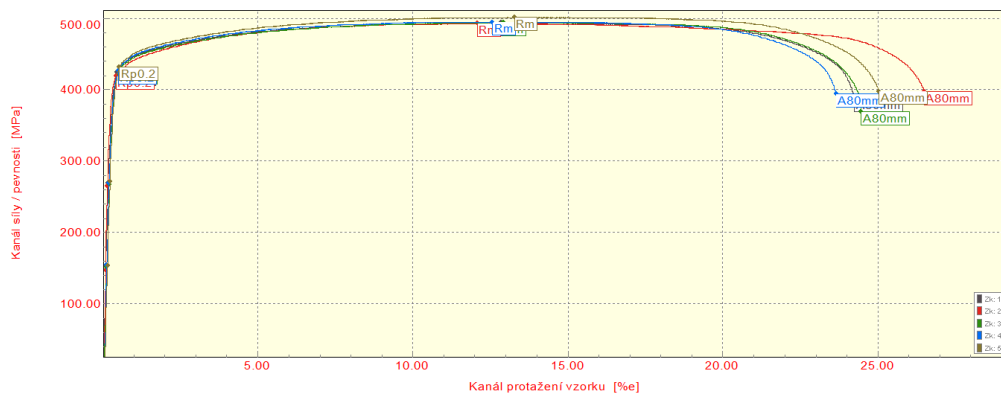
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : 1.4509 (označení dle EN)  
 Rozměry vzorku : [1,5 x 5] mm  
 Směr odebrání vzorku : Trubka  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 26.11.2021  
 Pozn. : ZM

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	424.87	493.87	12.55	24.01	159884
2	419.15	493.03	11.82	26.30	202847
3	425.79	494.38	12.57	24.20	149055
4	426.97	495.36	12.24	23.38	164375
5	431.79	501.75	12.89	24.72	147497

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	425.72	495.68	12.41	24.52	164732
Směrodatná odchylka	4.53	3.50	0.40	1.10	22468
Minimální hodnota	419.15	493.03	11.82	23.38	147497
Maximální hodnota	431.79	501.75	12.89	26.30	202847



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

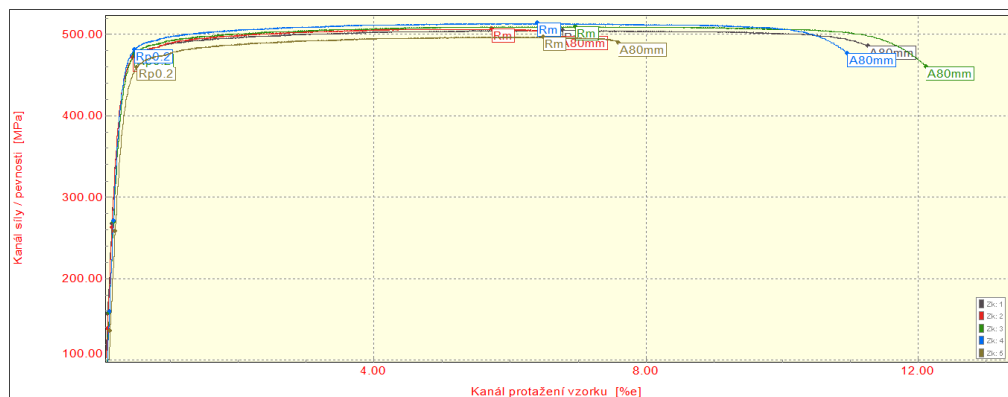
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : 1.4509 (označení dle EN)  
 Rozměry vzorku : [1,5 x 5] mm  
 Směr odebrání vzorku : Trubka  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 26.11.2021  
 Pozn. : TOO

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	471.66	504.69	6.49	11.00	182380
2	471.08	506.38	5.45	6.45	191416
3	475.51	509.40	6.66	11.84	179482
4	480.46	513.24	6.11	10.69	197063
5	459.19	496.68	6.14	7.26	166627

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	471.58	506.08	6.17	9.45	183394
Směrodatná odchylka	7.88	6.18	0.46	2.42	11712
Minimální hodnota	459.19	496.68	5.45	6.45	166627
Maximální hodnota	480.46	513.24	6.66	11.84	197063



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ



# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

## EN ISO 6892-1

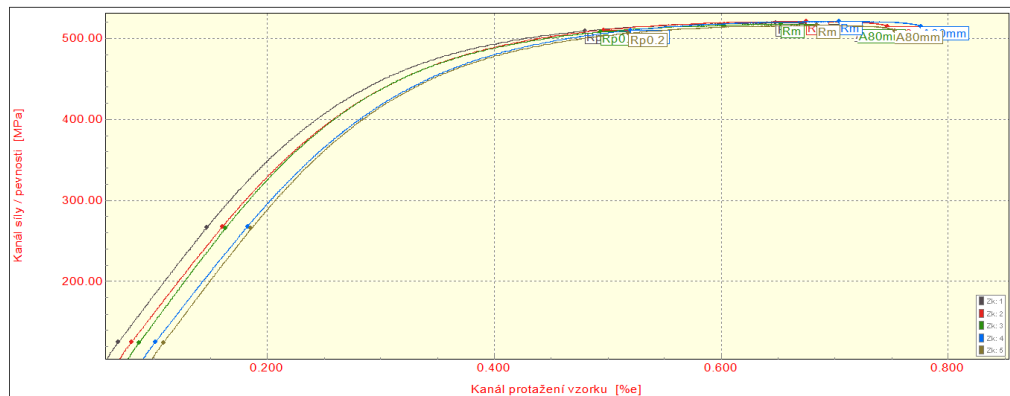
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : 1.4509 (označení dle EN)  
 Rozměry vzorku : [1,5 x 5] mm  
 Směr odebrání vzorku : Trubka  
 Teplota : RT  
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.  
 Vypracoval : Daniel Hrnčíř  
 Datum provedení testu : 26.11.2021  
 Pozn. : SVAR

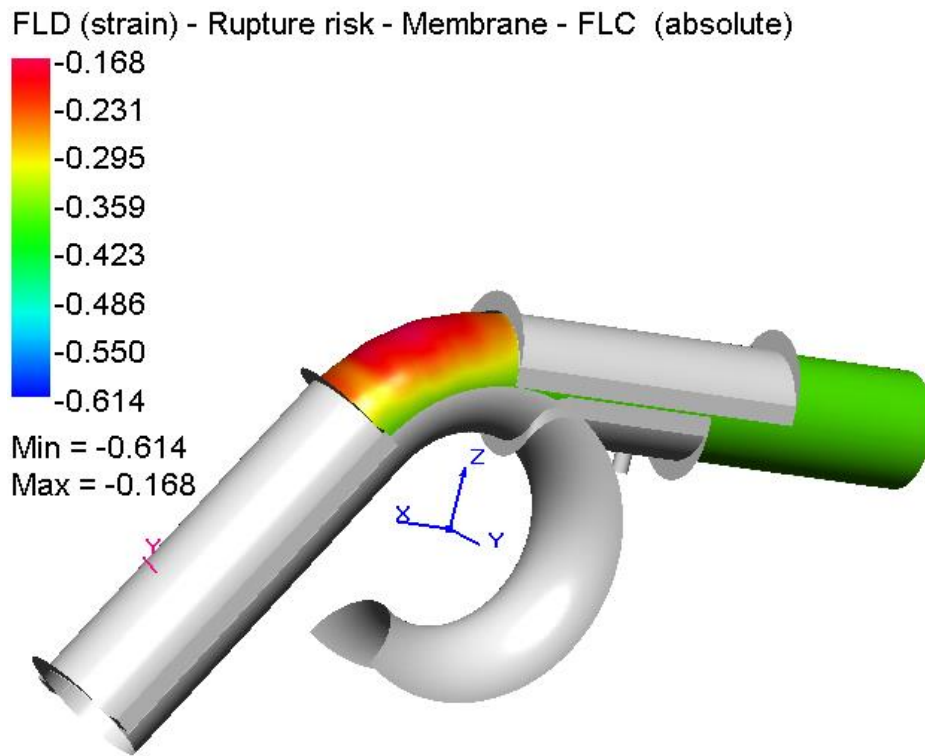
### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	509.07	519.22	0.36	0.44	182501
2	510.12	521.25	0.37	0.45	178635
3	507.75	517.21	0.35	0.43	186337
4	509.83	521.25	0.38	0.45	176345
5	506.11	516.20	0.36	0.43	182574

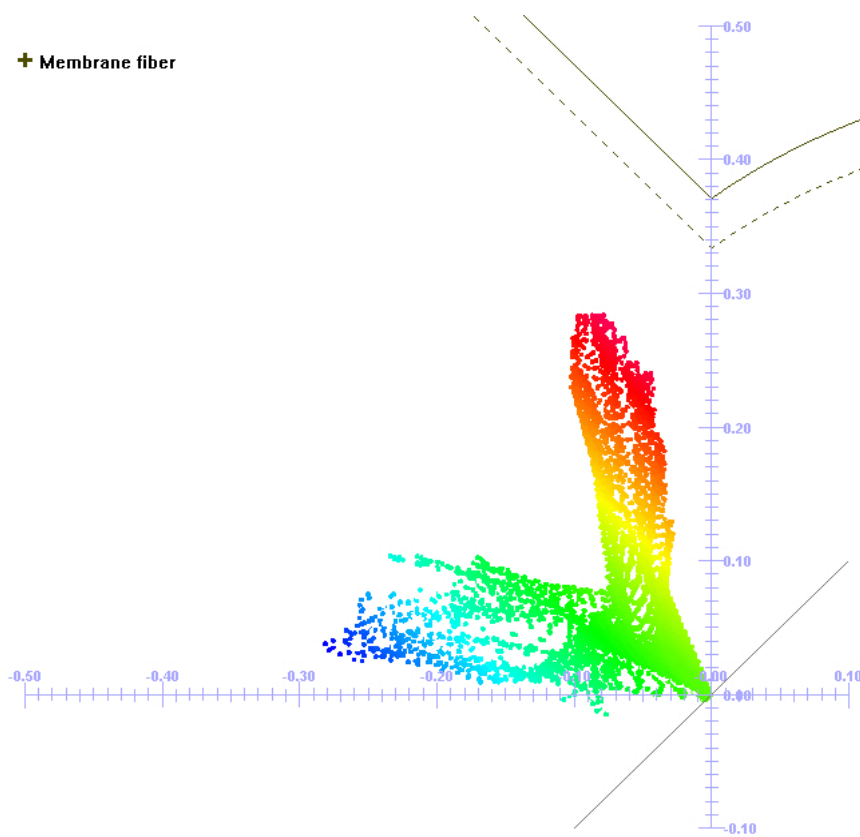
Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	508.58	519.03	0.37	0.44	181278
Směrodatná odchylka	1.66	2.30	0.01	0.01	3876
Minimální hodnota	506.11	516.20	0.35	0.43	176345
Maximální hodnota	510.12	521.25	0.38	0.45	186337



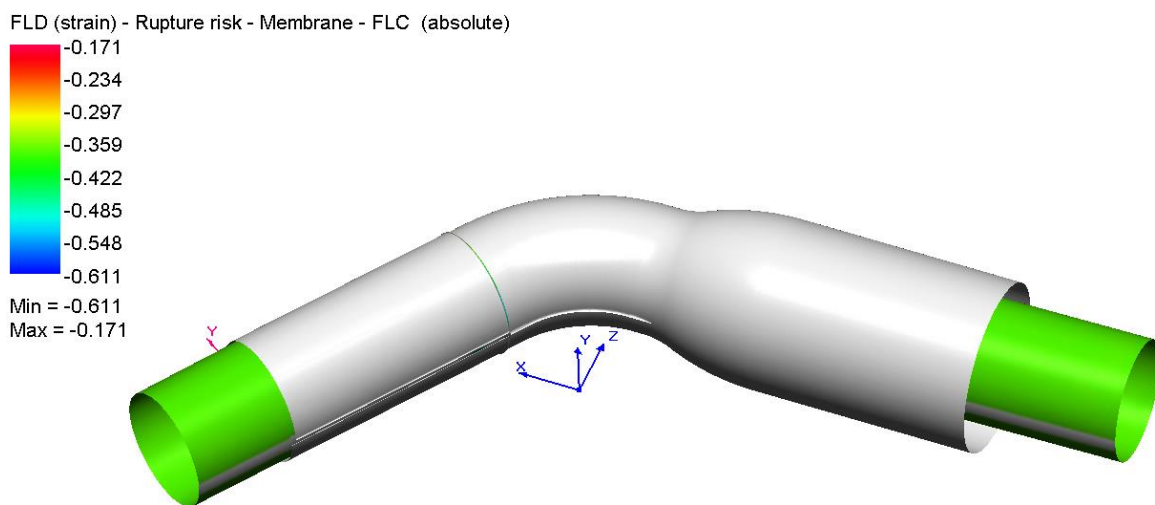
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
 Katedra strojírenské technologie  
 Oddělení tváření kovů a plastů  
 Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ



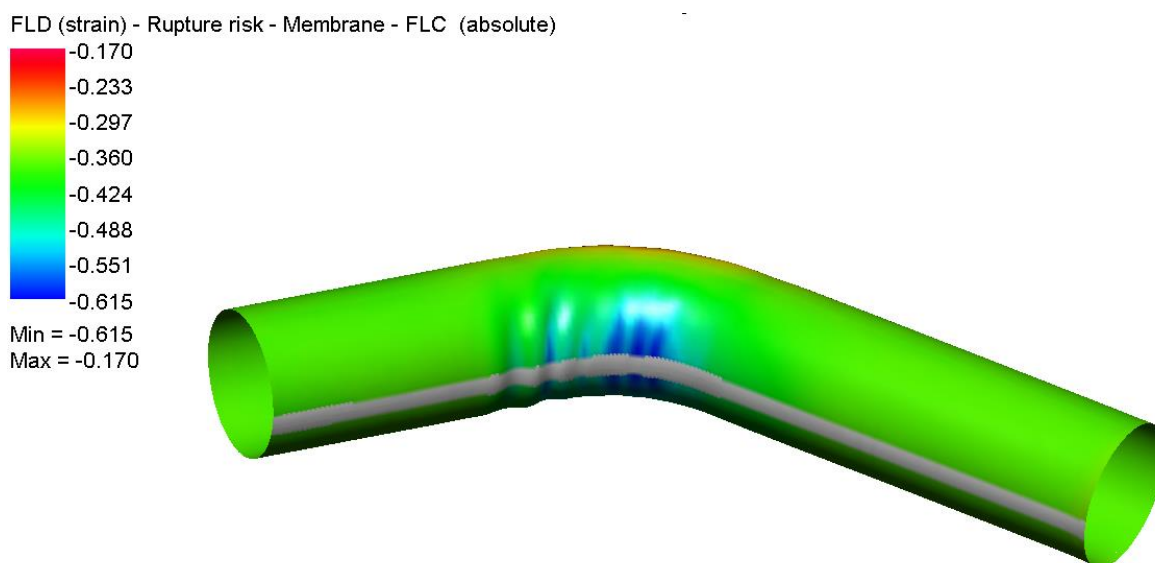
*Obr. 59 Simulace ohybu trubky z materiálu EN 1.4301*



*Obr. 60 Křivka mezního přetvoření po ohybu materiálu EN 1.4301*

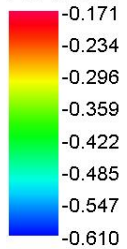


*Obr. 61 Simulace uzavření ohnutého polotovaru do formy*

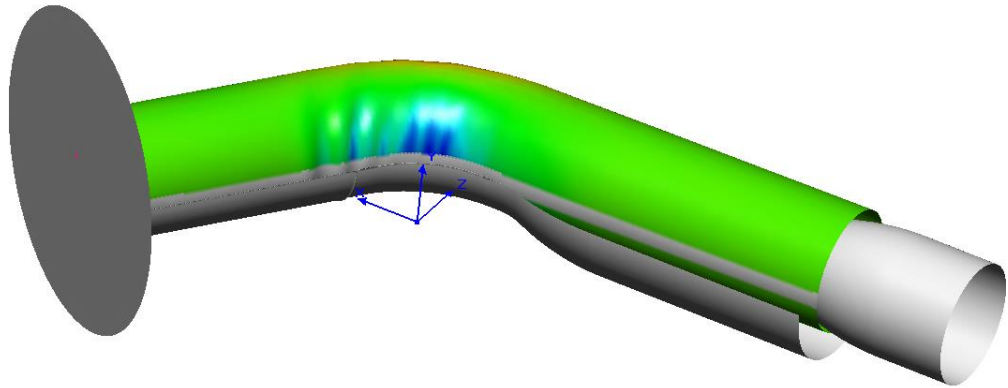


*Obr. 62 Oříznutí polotovaru na požadovaný rozměr*

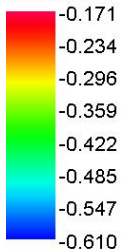
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



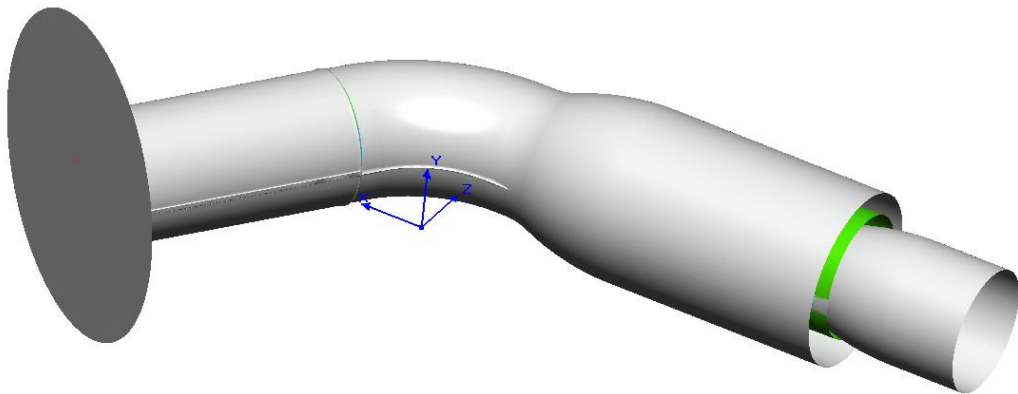
Min = -0.610  
Max = -0.171



FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)

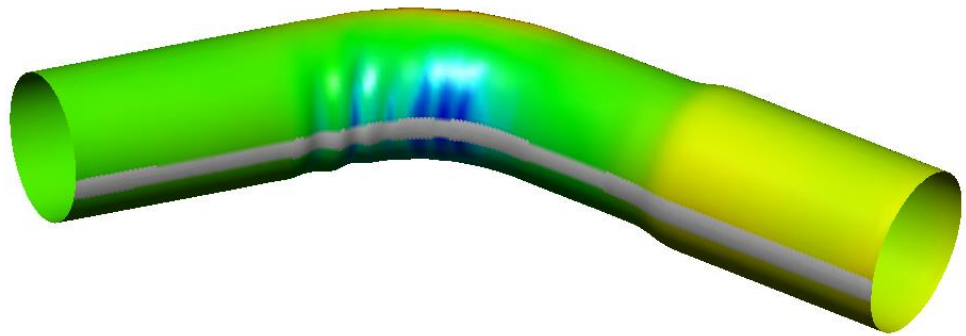
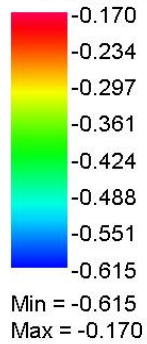


Min = -0.610  
Max = -0.171

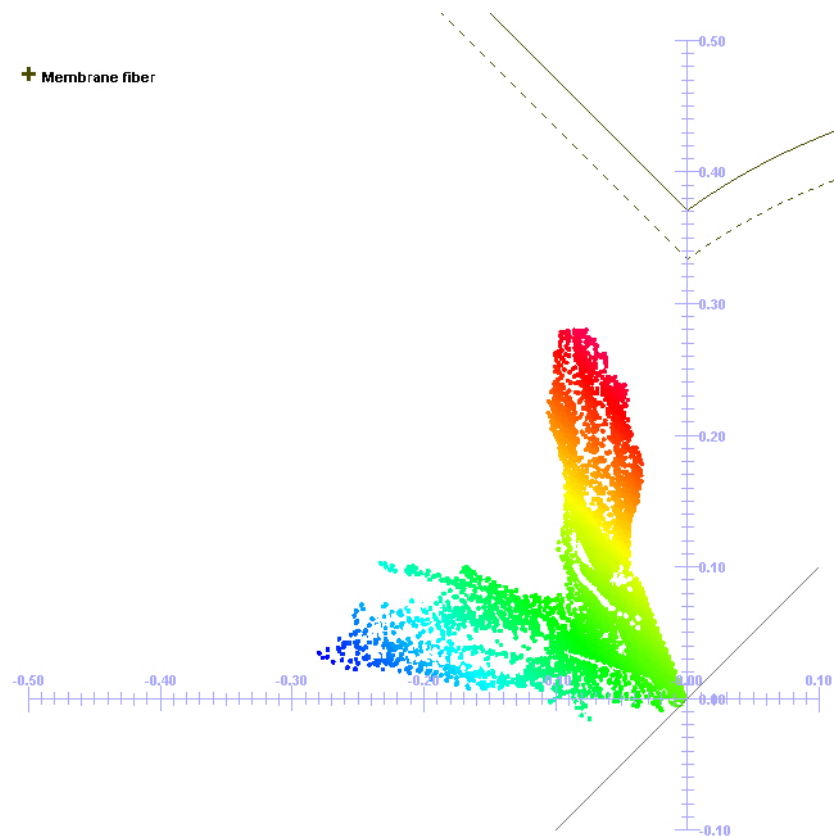


*Obr. 63 Narovnění polotovaru ve formě pomocným tažníkem*

FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)

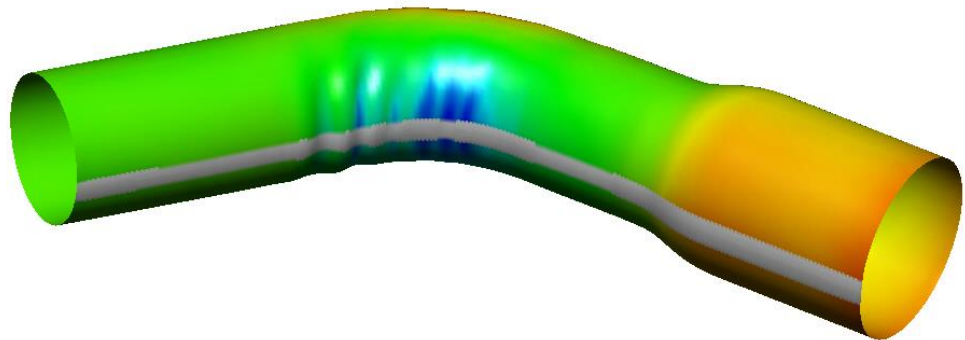
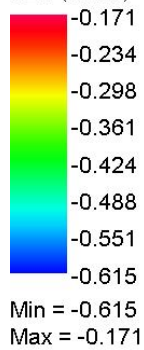


*Obr. 64 Simulace rozšíření kruhového průřezu trubky z materiálu EN 1.4301 (1.tah)*

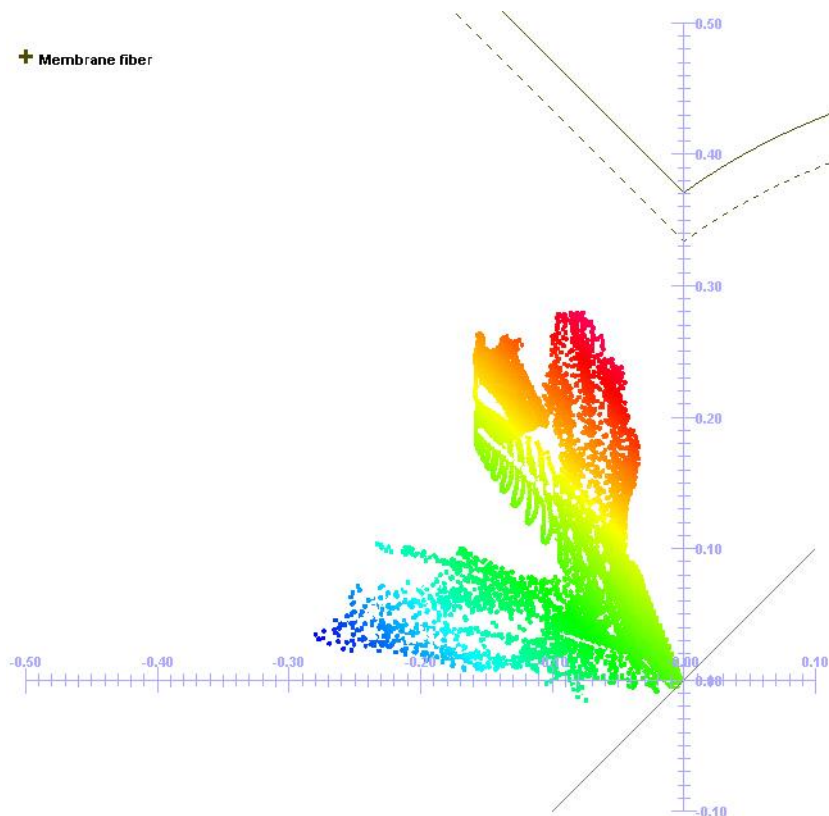


*Obr. 65 Křivka mezního přetvoření po prvním rozšiřovacím tahu*

FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)

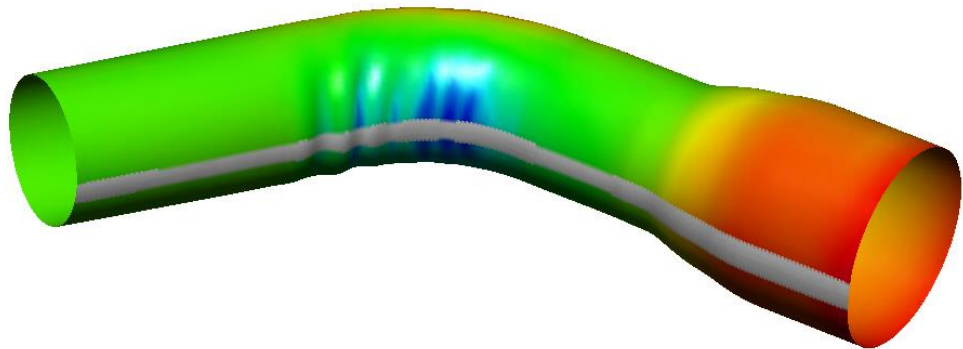
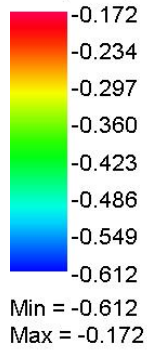


*Obr. 66 Simulace rozšíření kruhového průřezu trubky z materiálu EN 1.4301 (2.tah)*

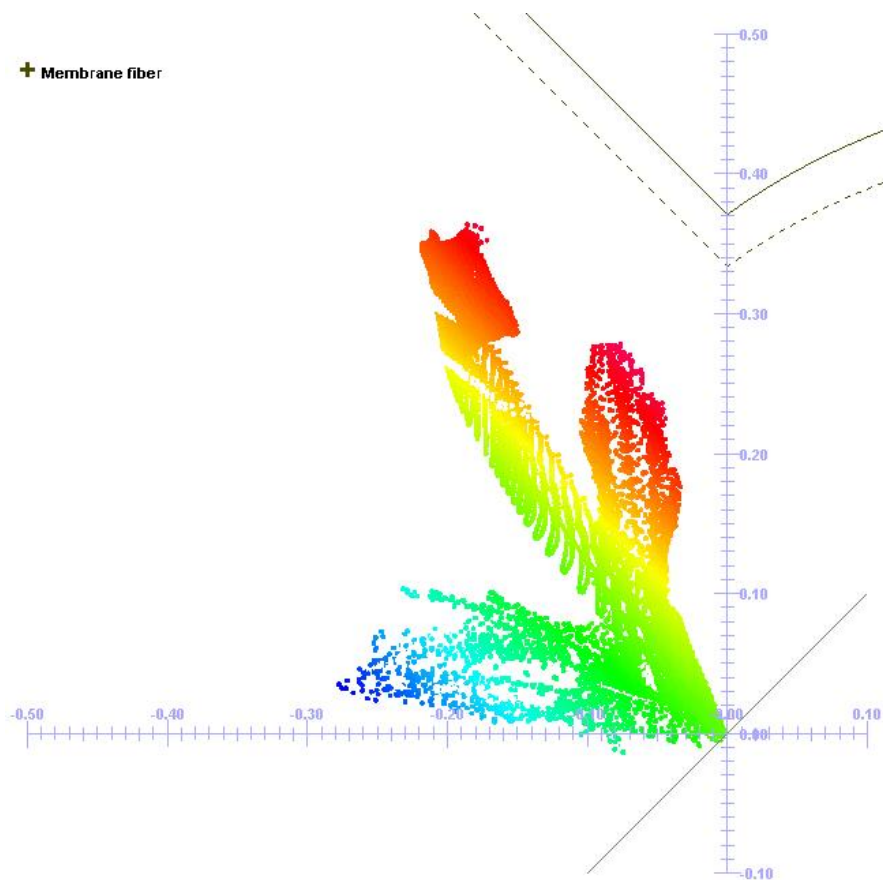


*Obr. 67 Křivka mezního přetvoření po druhém rozšiřovacím tahu*

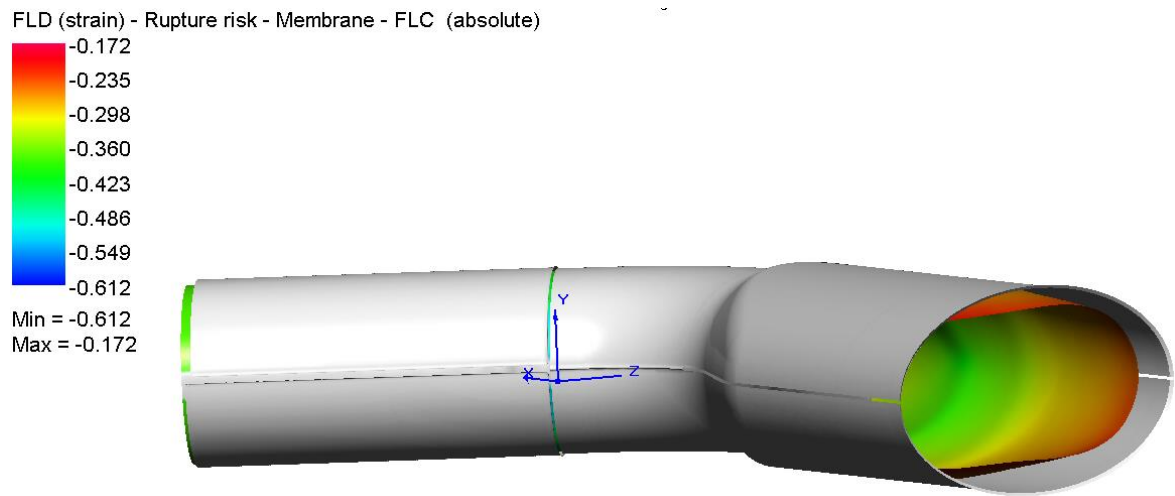
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



*Obr. 68 Simulace rozšíření kruhového průřezu trubky z materiálu EN 1.4301 (3.tah)*



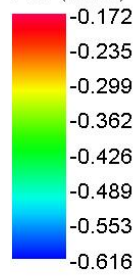
*Obr. 69 Křivka mezního přetvoření po třetím rozšiřovacím tahu*



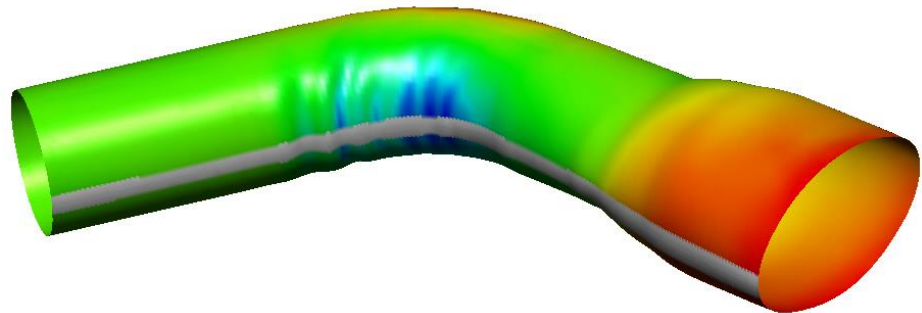
*Obr. 70 Simulace zmáčknutí tvářeného konce trubky do oválného tvaru*



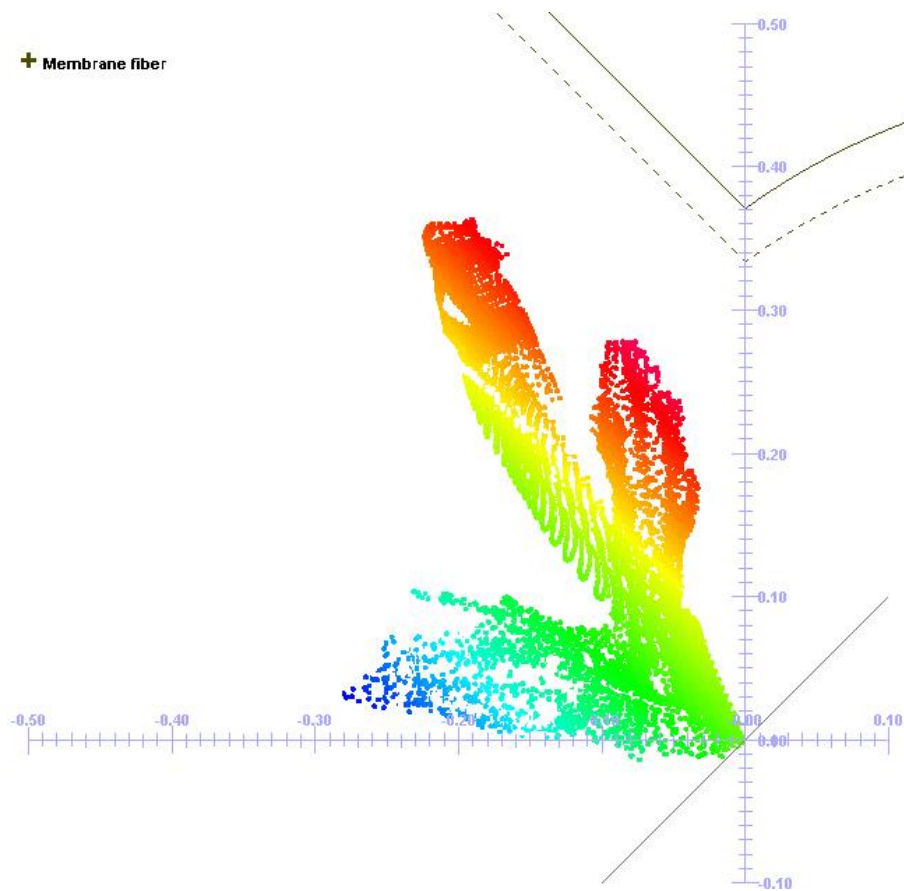
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



Min = -0.616  
Max = -0.172

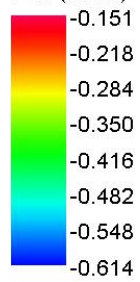


*Obr. 71 Simulace tváření oválného tvaru trubky z materiálu EN 1.4301 (1.tah)*

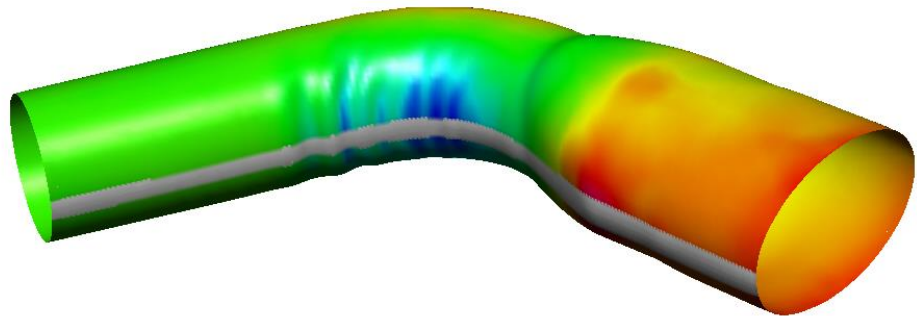


*Obr. 72 Křivka mezního přetvoření po prvním tváření do oválného tvaru*

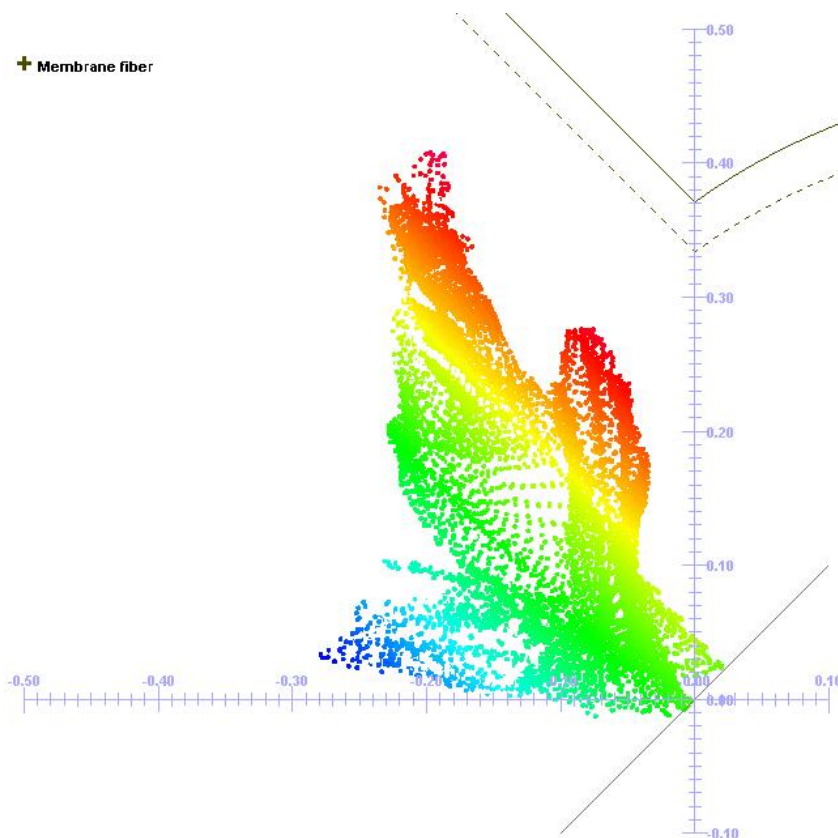
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



Min = -0.614  
Max = -0.151

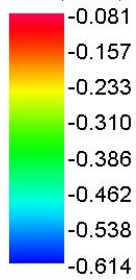


**Obr. 73** Simulace tváření oválného tvaru trubky z materiálu EN 1.4301 (2.tah)

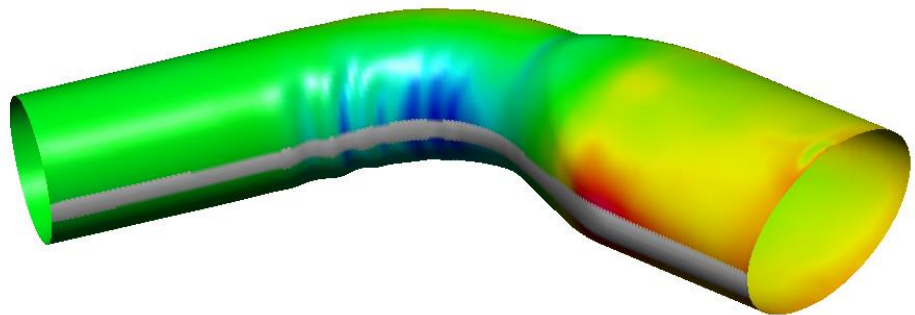


**Obr. 74** Křivka mezního přetvoření po druhém tváření do oválného tvaru

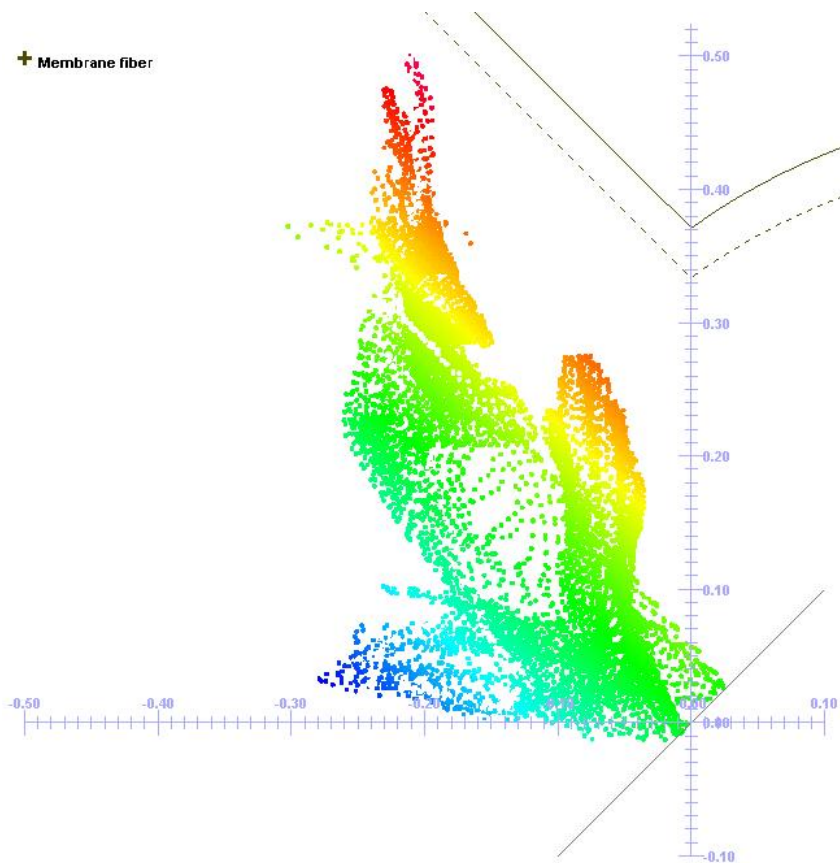
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC (absolute)



Min = -0.614  
Max = -0.081



*Obr. 75 Simulace tváření oválného tvaru trubky z materiálu EN 1.4301 (3.tah)*



*Obr. 76 Křivka mezního přetvoření po třetím tváření do oválného tvaru*