



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## VÝROBA DÍLCE HYDROFORMOVÁNÍM A JEJÍ OPTIMALIZACE

MANUFACTURING OF A COMPONENT BY USING HYDROFORMING TECHNOLOGY AND ITS  
OPTIMIZATION

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Harant

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Martin Harant</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Řiháček, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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

## Výroba dílce hydroformováním a její optimalizace

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o analýzu a optimalizaci geometrie lisovaného dílce tak, aby nedocházelo k nadměrnému ztenčování a praskání během jeho výroby. Daný dílec bude vyráběn metodou paralelního hydroformování. Předpokládá se využití počítačové podpory v podobě numerické simulace metodou konečných prvků.

### Cíle diplomové práce:

- teoretický rozbor problematiky,
- tvorba numerické simulace stávajícího stavu,
- verifikace numerické simulace experimentální cestou – hydroformováním,
- optimalizace geometrie na základě výsledků numerické simulace.

### Seznam doporučené literatury:

ASM INTERNATIONAL. Metals handbook volume 14: Forming and forging. 9. vyd. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1988. ISBN 978-0-871-70020-9.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

LEE, Huei-Huang. Finite element simulations with ANSYS workbench 14: theory, applications, case studies. Mission: SDC Publications, 2012, 602 s. ISBN 978-1-58503-725-4.

LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. United States: Cengage Learning, 2007, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.

MARCINIAK, Zdislaw, J. L. DUNCAN a S. J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

HARANT Martin: Výroba dílce hydroformováním a její optimalizace

---

Práce rieši analýzu a optimalizáciu geometrie výlisku vyrábaného technológiou paralelného hydroformovania. Polotovar tvorený dvomi plechmi z ocele DC01 je zvarovaný laserovým lúčom. Pri tvárnení môže dochádzať k nadmernému stenčovaniu a prasklinám dielca. Vyhodnotením mechanických skúšok je vytvorený materiálový model, ktorý je podkladom pre numerickú simuláciu v softvéri PAM-STAMP. Výstupom sú analýzy poskytujúce informácie o kritických miestach, tlaku pri ktorom dochádza k porušeniu, limitných pretvoreniach a odpružení materiálu. Správnosť numerickej simulácie je následne overená porovnaním s experimentálne získanými hodnotami. Porovnávacie kritéria sú tlak, pri ktorom dochádza k porušeniu a zmena hrúbky materiálu v niekoľkých miestach výlisku. Na základe výsledkov numerickej simulácie je potom vytvorená optimalizácia geometrie. Tá spočíva v upravení polomeru zaoblenia v mieste, kde dochádza k porušeniu dielca.

**Kľúčové slová:** ocel DC01, hydroformovanie, diagramy medznej tváriteľnosti, numerická simulácia, anizotropia, PAM-STAMP

## **ABSTRACT**

HARANT Martin: Manufacturing of a Component by Using Hydroforming Technology and Its Optimization

---

The project deals with analysis and optimization of the geometry of the stamped part produced by the pillow hydroforming. The blank consists of two sheets of steel DC01, which is welded by laser beam. The forming process can cause excessive thinning and cracking of the part. By evaluation of mechanical tests is created material model, which is the basis for numerical simulation created in software PAM-STAMP. The outputs are analysis which provide information about critical points, failure pressure, limiting deformations and prediction of springback. Validity of the numerical simulation is verified by comparison with the experimentally obtained data. The comparative criterions are the failure pressure and the material thickness at various locations. Based on the results of the numerical simulation, the optimization of the geometry is created. The optimization uses different values of radius at the crack point.

**Keywords:** DC01 steel, hydroforming, forming limit diagrams, numerical simulation, anisotropy, PAM-STAMP

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

HARANT, Martin. *Výroba dílce hydroformováním a její optimalizace*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117145>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 24.5.2019

.....

Bc. Martin Harant

## **POĎAKOVANIE**

Týmto ďakujem pánovi Ing. Janovi Řiháčkovi Ph.D. za cenné rady a ochotu pri vypracovávaní diplomovej práce. Taktiež Ing. Kamilovi Podanému Ph.D. za pomoc pri meraní údajov pre materiálový model. V neposlednej rade ďakujem rodine, priateľom a spolužiakom za podporu počas celého štúdia.

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu FSI-S-17-4344 „Vývoj technologickej výroby sendvičových priestorových panelů využitím laserového svařování a hydroformování“.

# OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Podakovanie

Obsah

Str.

<b>ÚVOD</b> .....	9
<b>1 ROZBOR ZADANIA</b> .....	10
<b>2 TECHNOLÓGIA HYDROFORMOVANIA</b> .....	11
<b>2.1 Hydroformovanie trubiek</b> .....	11
<b>2.2 Hydroformovanie plechov</b> .....	13
2.2.1 Hydroformovanie plechov lisovníkom .....	13
2.2.2 Hydroformovanie plechov lisovnicou .....	15
<b>3 TVÁRNITEĽNOSŤ V TECHNOLÓGII PLOŠNÉHO TVÁRNENIA</b> ....	18
<b>3.1 Diagramy medznej tvárniteľnosti</b> .....	19
<b>3.2 Zisťovanie FLC experimentálnou cestou</b> .....	20
<b>4 METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV</b> .....	24
<b>4.1 Voľba elementov konečnoprvkovej siete</b> .....	24
<b>4.2 Riešenie úloh s využitím MKP</b> .....	25
4.2.1 Implicitný algoritmus .....	26
4.2.2 Explicitný algoritmus .....	27
<b>4.3 Materiálový model</b> .....	28
<b>4.4 Použitie MKP a softvéry</b> .....	31
<b>5 EXPERIMENÁLNA ČASŤ</b> .....	33
<b>5.1 Materiálový model pre numerickú simuláciu</b> .....	34
5.1.1 Definovanie elastických a plastických vlastností .....	37
5.1.2 Predikcia FLC .....	38
<b>5.2 Numerická simulácia</b> .....	40
<b>5.3 Verifikácia numerickej simulácie – experiment</b> .....	44
<b>5.4 Optimalizácia geometrie</b> .....	50
<b>6 ZÁVERY</b> .....	58
Zoznam použitých zdrojov	
Zoznam použitých symbolov a skratiek	
Zoznam obrázkov	
Zoznam tabuliek	



## ÚVOD [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]

V dnešnej dobe je v sériovej výrobe vo veľkej miere využívané plošné tvárnenie. Medzi jeho hlavné ciele patrí minimalizácia nákladov, zníženie počtu operácií a optimalizácia hmotnosti, pevnosti a tuhosti výrobku. Týmto nárokom odpovedajú technológie, ktoré využívajú nepevné nástroje. Ide napríklad o tvárnenie kvapalinou tzv. hydroformovanie alebo tvárnenie elastomérom. Najmä hydroformovanie sa adaptovalo v rôznych odvetviach strojárskoho priemyslu (automobilový, letecký, vojenský...). V porovnaní s konvenčnými technológiami, umožňuje tvárnenie komplikovaných dielcov (obr. 1) pri nižšom počte technologických operácií, poklese zvraciacich operácií, dosiahnutí vyššej rozmerovej a tvarovej presnosti atď.

Technológia hydroformovania využíva pre dosiahnutie požadovaného tvaru výrobku tlak kvapaliny. Proces tvárnenia prebieha zvyčajne za studena, ale využíva sa aj tvárnenie za vyšších teplôt. V súčasnosti je vyvinutých niekoľko metód založených na tomto princípe, čím sa rozrastá oblasť použitia tejto technológie.

Návrh a optimalizácia výroby dielcov v plošnom tvárnení sa vo veľkej miere rieši numerickými metódami. Jednou z nich je aj metóda konečných prvkov. Tá pre získanie riešenia využíva diskretizáciu. To znamená, že namiesto riešenia problému celého telesa, sa riešia vzťahy pre získanie neznámych veličín jednotlivých elementov, ktoré tvoria teleso.

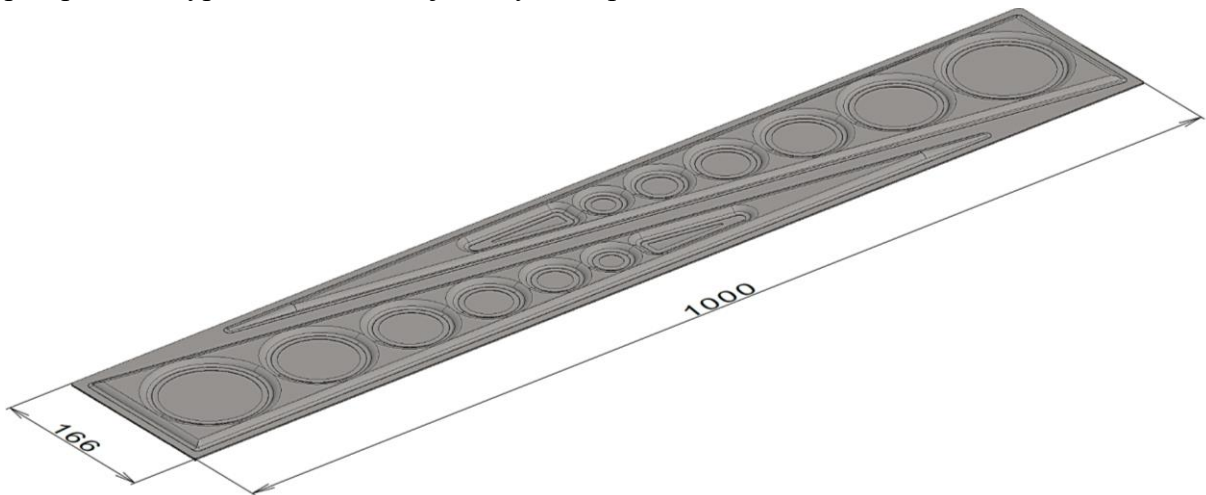


Obr. 1 Príklady dielcov vyrobených technológiou hydroformovania [4, 5, 6, 7]

## 1 ROZBOR ZADANIA [8, 9, 10]

Práca sa zaoberá analýzou a optimalizáciou geometrie dielca, ktorý je riešený v rámci vývoja výroby sendvičových panelov na Vysokom učení technickom v Brně. Sendvičové panely sú hybridné systémy. Základný koncept je tvorený vonkajšou vrstvou a jadrom. Vonkajšia vrstva býva vyrobená z kovových alebo nekovových materiálov, prípadne ich kombináciou. Jadro sendvičových panelov je navrhované tak, aby jeho hmotnosť bola čo najnižšia a súčasne poskytovalo vysokú pevnosť. Preto sa s výhodou používajú napr. penové jadrá a voštinové štruktúry. Nízka hmotnosť a veľmi dobré mechanické vlastnosti predurčujú aplikáciu sendvičových panelov v leteckom a stavebnom priemysle a tiež vo vojenskej technike.

Riešený dielec je vyrobený z dvoch plechov s odlišnou hrúbkou steny. Podkladový plech má hrúbku 1,5 mm, tvárnený 0,5 mm. Šírka panelu je 166 mm a dĺžka 1 000 mm, viď obr. 2. Tvarové prvky sú vyrezané pomocou laserového lúča. Plechy sú po obvode dielov a v miestach tvarových prvkov zvarené laserom. Po ukončení technológie tvárnenia sa predpokladá vyplnenie vzniknutej dutiny PUR penou.



Obr. 2 Riešený dielec

Vzhľadom ku cenovej dostupnosti a vyhovujúcim vlastnostiam je materiál dielca oceľ DC01 (ČSN 41 1321). Ide o nelegovanú oceľ vyrábanú valcovaním za studena. V závislosti na rozmeroch polotovaru je zaručene zvariteľná a používa sa pre tvárnenie za studena. Neukľudnené ocele sú náchylné ku starnutiu, čo má za následok pokles plastických vlastností. Preto je dôležité spracovanie materiálu v čo najkratšej dobe, ktorá je udávaná výrobcom. Chemické zloženie a mechanické vlastnosti ocele DC01 sú uvedené v tabuľke 1.

Tab. 1 Chemické zloženie a mechanické vlastnosti ukľudnenej ocele DC01 [10].

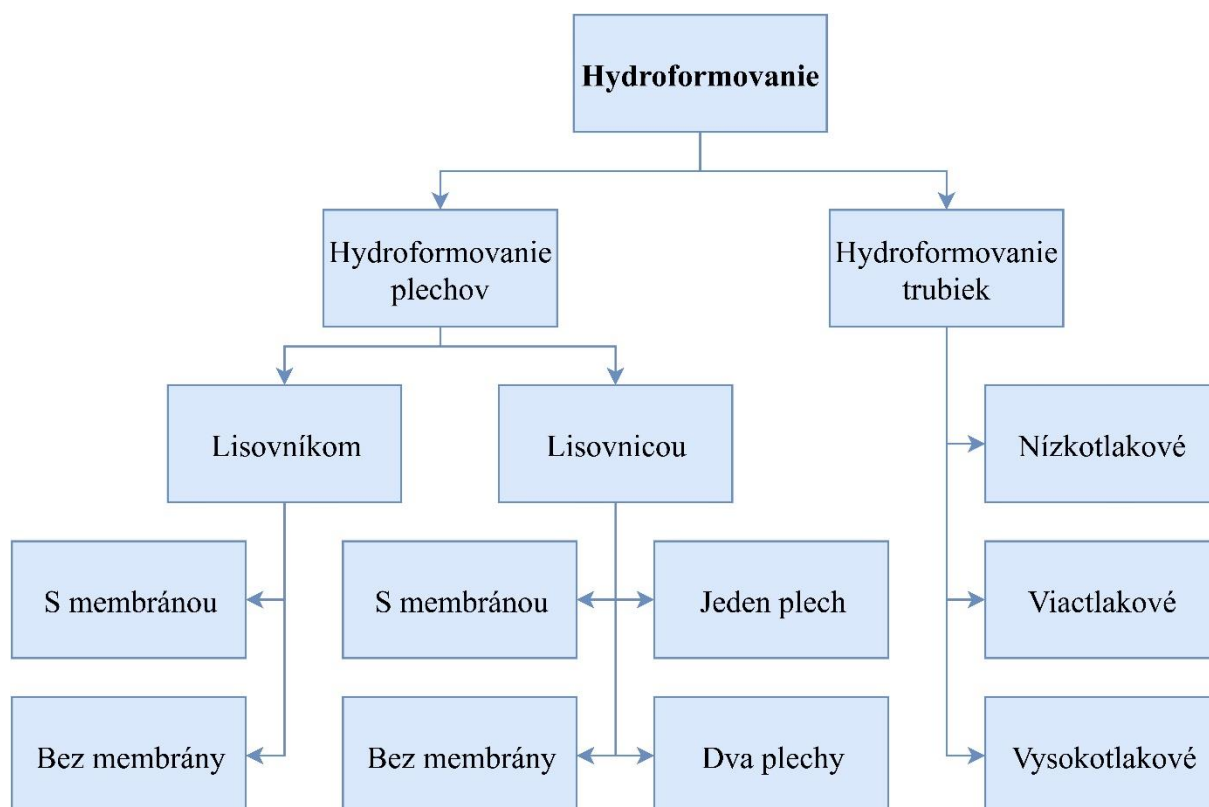
Chemické zloženie [hm. %]			
C	Mn	P	S
max. 0,12	max. 0,6	max. 0,045	max. 0,045
Mechanické vlastnosti			
R <sub>e</sub> [MPa]		R <sub>m</sub> [MPa]	
200 až 265		270 až 410	

S ohľadom na tvar riešeného dielca, jeho následné spracovanie a dostupné výrobné technológie, bude pri výrobe využité rezanie a zváranie pomocou laserového lúča s následným využitím tvárnenia hydroformovaním. Z toho dôvodu je literárna rešerš ďalej zameraná najmä na plošné tvárnenie s využitím technológie hydroformovania.

## 2 TECHNOLOGIA HYDROFORMOVANIA [11, 12, 13]

Hydroformovanie je nekonvenčná technológia plošného tvárnenia materiálov, ktorá využíva nepevný nástroj – kvapalinu. Tvárnenie prebieha obvykle lisovnicou, výnimočne sa tvárni aj bez nej, ide o tzv. voľné hydroformovanie. Požadovaného tvaru dielca sa dosahuje pôsobením tlaku média. Tlak pôsobiaci na materiál spôsobuje rovnomerné rozloženie pretvorenia. Vďaka tomu sa dajú tvárniť dielce s komplikovanou geometriou, ktoré dosahujú vysokej tvarovej a rozmerovej presnosti. Použitie hydroformovania umožňuje zníženie hrúbky materiálu, pri zachovaní dobrých pevnostných vlastností a tuhosti. Navyiac so sebou prináša úsporu nákladov na energie a v niektorých prípadoch aj zníženie výrobného času.

Technológie využívajúce princíp hydroformovania sa delia do dvoch skupín podľa polotovaru, ktorým môžu byť trubky alebo plechy. Toto rozdelenie je uvedené na obrázku 3.



Obr. 3 Rozdelenie metód hydroformovania [11]

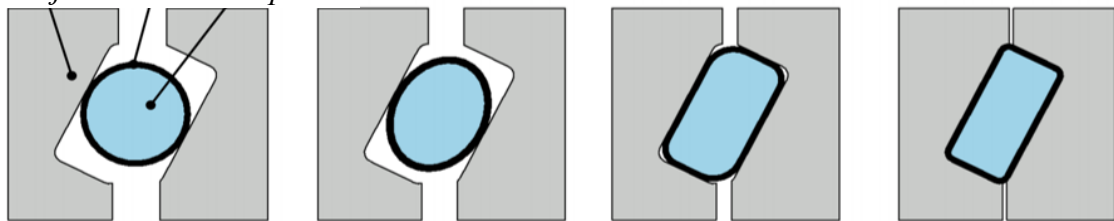
### 2.1 Hydroformovanie trubiek [2, 3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]

Technológia spočíva v tvárnení trubiek v dutine lisovnice tlakom, ktorý je vyvolaný kvapalinou, prípadne aj prídavnou silou. Východiskovým polotovarom bývajú zvarané alebo bezošvé trubky, kužeľovité dielce, duté profily apod. Zvaraním sa vyrábajú najmä oceľové polotovary. Bezošvé trubky sa získavajú prevažne pretláčaním a tento postup sa uplatňuje najmä u hliníku, medi a ich zliatin. Proces hydroformovania trubiek predchádza príprava materiálu. Tá zahŕňa delenie, ohýbanie, očistenie polotovaru, niekedy tiež rozširovanie alebo zužovanie prierezu a tepelné spracovanie. Podľa [17] je u materiálu požadovaná hodnota ťažnosti minimálne 15 %.

Tvárnenie trubiek kvapalinou sa realizuje viacerými metódami, ktoré sa odlišujú predovšetkým veľkosťou pôsobiaceho tlaku, viď obr. 3.

- Nízkotlakové hydroformovanie – princíp metódy je zobrazený na obr. 4. Polotovár je vložený medzi hornú a spodnú časť lisovnice. Jeden koniec trubky je zaslepený a druhým sa privedie kvapalina. Tlak v dutine trubky je zanedbateľný do okamihu kedy sa začne zatvárať forma. Funkcia kvapaliny je pritom podobná, ako pri ohýbaní trubiek s výplňou. Kvapalina zabraňuje zboreniu prierezu a taktiež zmene hrúbky steny polotovaru. Pri nízkotlakovom hydroformovaní dosahuje pracovný tlak hodnôt maximálne 83 MPa. Vzhľadom k tomu je potrebné dielce navrhovať tak, aby nedochádzalo k nadmernej deformácii prierezu pri zatváraní lisovnice.

Nástroj Trubka Kvapalina

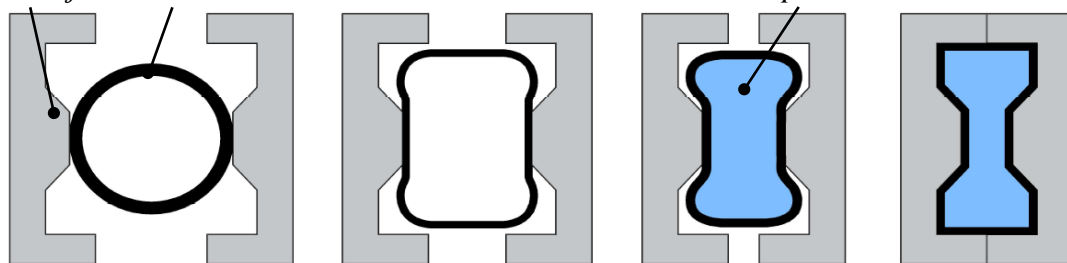


a) predvýrobná fáza      b) zatváranie lisovnice - tvárnenie      c) kalibrácia tvaru

Obr. 4 Princíp nízkotlakového hydroformovania [11]

- Viactlakové hydroformovanie – je variantom nízkotlakového hydroformovania. Po vložení polotovaru do nástroja, dochádza k jeho čiastočnému lisovaniu. V ďalšej fáze, sa dutina polotovaru plní kvapalinou, vid' obr. 5. Kvapalina pri tom pôsobí ako vystuženie a uľahčuje presun materiálu. Tlak vyvinutý na vnútornú stenu trubky počas zatvárania nástroja dosahuje hodnôt 35 až 70 MPa. Po uzavretí lisovnice sa jeho veľkosť zvyšuje na kalibračnú hodnotu, približne 69 až 173 MPa. Viactlakovým hydroformovaním je teda možné dosiahnuť lepších výsledkov aj pri nižších tlakoch.

Nástroj Trubka

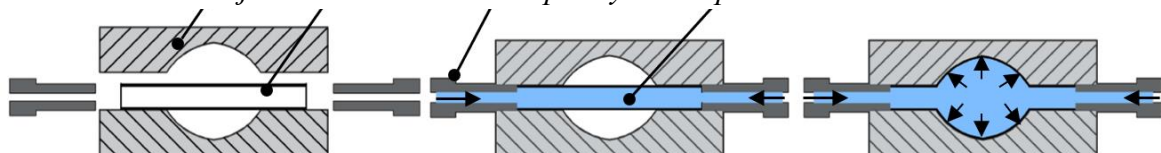


a) založenie polotovaru      b) zatváranie lisovnice      c) prívod kvapaliny      d) kalibrácia

Obr. 5 Princíp viactlakového hydroformovania [18]

- Vysokotlakové hydroformovanie – kvapalinou sa plní trubka až po zatvorení lisovnice, vid' obr. 6. Deformácie vznikajúce pri zatváraní nástroja sú odstránené v dôsledku vysokého tlaku, ktorý pri tejto metóde býva 83 až 414 MPa. Tým sa dosahuje vyšších pretvorení prierezu a je možné tvárniť tvarovo zložitejšie dielce. Proces je však náročnejší na prípravu polotovaru, je nutné mazanie a cena technológie je vyššia oproti nízkotlakovému hydroformovaniu. Typickým predstaviteľom dielcov vyrábaných touto metódou sú tvarovky typu T a Y.

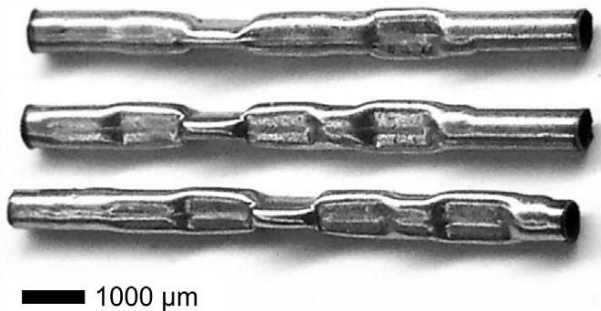
Nástroj Trubka Prívod kvapaliny Kvapalina



a) založenie polotovaru      b) prívod kvapaliny - tvárnenie

Obr. 6 Princíp vysokotlakového hydroformovania [19]

- Mikro-hydroformovanie – špeciálna metóda, ktorá umožňuje tvárnenie valcovaných alebo zváraných trubiek s min. vonkajším priemerom 0,2 mm a min. hrúbkou steny približne 0,03 mm (obr. 7). V porovnaní s „makro“ metódami sú pri tomto procese určité odlišnosti, napr. trenie má významný vplyv na veľkosť tvárniacej sily. Svoje uplatnenie nachádza najmä v medicíne a mikroelektronike.



Obr. 7 Komponenty vytvorené mikro-hydroformovaním [21]

Výhody a nevýhody procesu hydroformovania trubiek sú nasledujúce:

- + zníženie hmotnosti dielov,
- + nárast pevnosti a tuhosti,
- + výroba tvarovo zložitých dielov, bez nutnosti dodatočného zvárania,
- + vyššia rozmerová a tvarová presnosť,
- + možná integrácia operácii ako dierovanie a lemovanie,
- vyššia cena zariadenia a jeho zložitosť,
- potrebné know-how a skúsenosti.

Hydroformovanie trubiek nachádza uplatnenie v rôznych aplikáciách napr. asymetrické a krížové tvarovky potrubia, časti rámov bicyklov, nápravy automobilov, rámy motorov, diely sanitárnej techniky, diely špeciálnej techniky (letecký a vojenský priemysel).

## 2.2 Hydroformovanie plechov [12, 17, 18, 22]

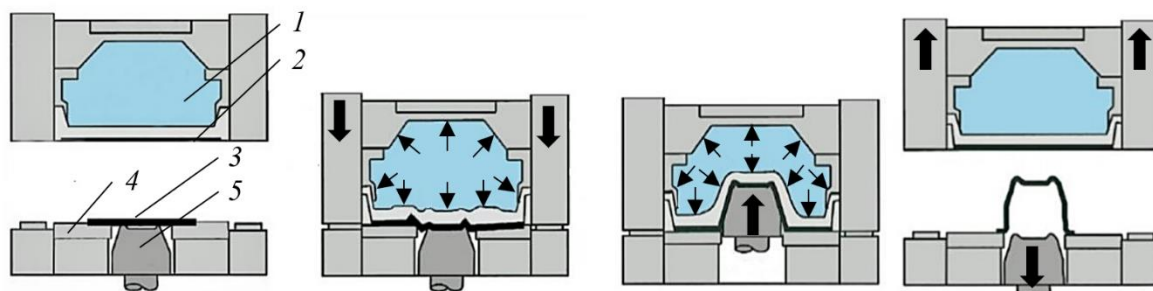
Východiskovým polotovarom pre druhú skupinu metód hydroformovania je plech. Tieto metódy sa ďalej rozdeľujú podľa toho, či dochádza ku formovaniu polotovaru pomocou pohyblivého nástroja – lisovníku alebo nepohyblivého – lisovnice. Pri tvárnení lisovníkom je polotovar nabaľovaný na lisovník, čím získava požadovaný tvar. K tomu dochádza pohybom lisovníku v uzavretej komore vyplnenej kvapalinou. V prípade tvárnenia v lisovnici sa výsledný tvar dielca získava len tlakom kvapaliny na polotovar. Tvárniace médium býva na vodnej báze s aditívami, ktoré pôsobia ako mazivá, sušiacie činidlá a činidlá chrániace materiál pred koróziou.

### 2.2.1 Hydroformovanie plechov lisovníkom [11, 12, 17, 23, 24, 25]

Technológia sa využíva pre zhotovenie dutých rotačných aj nerotačných nádob z plechu, ktoré majú spravidla prírubu. Zo všeobecného hľadiska sa dajú metódy hydroformovania plechu lisovníkom rozdeliť na tvárnenie s membránou alebo bez membrány.

- Hydroform – je jedným z predstaviteľov technológie hydroformovania plechov s membránou, vid' obr. 8. Hlavnou časťou zariadenia používaného pri tejto metóde je komora naplnená kvapalinou (1) a utesená pružnou membránou (2). Polotovar (3), na ktorom je nanosené mazivo sa umiestni na spodnú časť pridržovača (4). Komora sa následne spustí do pracovnej polohy a tlak v nej sa zvýši na prednastavenú hodnotu. Membrána pôsobí ako lisovnica a súčasne pridržiava plech. Vniknutím lisovníku (5) do komory dochádza k tomu, že sa naň nabaľuje polotovar spoločne s membránou. Po ukončení procesu tvárnenia je tlak kvapaliny uvoľnený a komora sa vracia do východiskovej polohy. Potom sa vráti do základnej polohy aj lisovník.

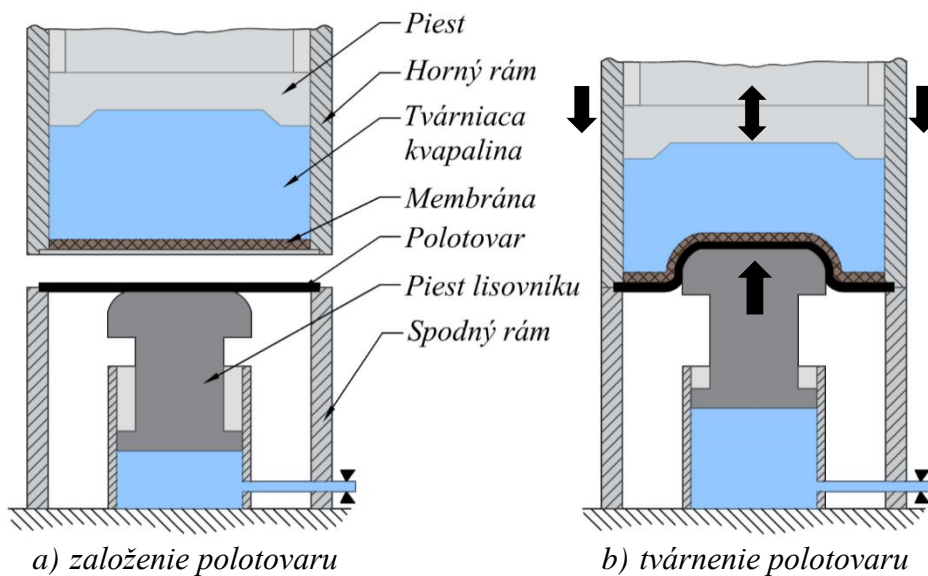




a) založenie polotovaru b) zovretie nástroja c) tvárnenie polotovaru d) odobranie dielca

Obr. 8 Princíp metódy Hydroform [24]

- ASEA – je modifikáciou metódy Hydroform. Bola vytvorená pre tvárnenie rozmernejších dielov. Používa sa v dvoch prevedeniach a to s membránou alebo bez. Princíp metódy s membránou je zrejmý z obr. 9. Polotovaru sa zakladá do spodného rámu stroja. K jeho upnutiu je použitý horný rám. Na komoru s kvapalinou, ktorá je v hornom ráme stroja pôsobí z vrchu piest. Zospodu je utesnená membránou. Po privedení kvapaliny do hydraulického valca pod piest lisovníku, dochádza k jeho pohybu. Piest komory s kvapalinou slúži pre vyvodenie kalibračného tlaku, čím sa získa vysoká tvarová a rozmerová presnosť tvárneného dielu. U varianty bez membrány je kvapalina do ťažnej komory napustená až po upnutí polotovaru medzi horný a spodný rám. Princíp je ďalej zhodný s prvým variantom tejto metódy.



a) založenie polotovaru

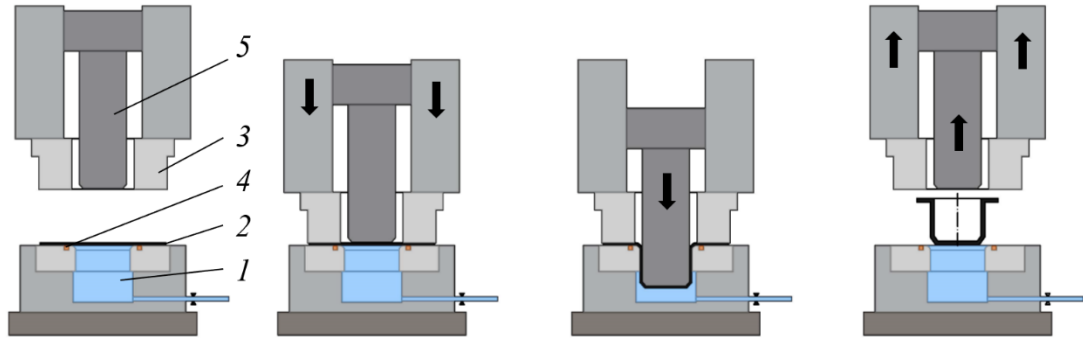
b) tvárnenie polotovaru

Obr. 9 Princíp metódy ASEA s membránou [23]

Technológie s membránou nachádzajú svoje uplatnenie skôr v malosériových výrobách, kvôli dlhším výrobným časom. Nevýhodou je aj nutnosť výmeny membrány v dôsledku jej opotrebenia. Naopak veľkou výhodou je vytvorenie rozmernejších dielov s väčšou hĺbkou.

- Hydromechanické ťahanie – je metóda hydroformovania plechov bez membrány. Rozdiel oproti variante využívajúcej membránu je v konštrukčnom riešení tvárniaceho zariadenia, čo je vidieť aj na obrázku 10. Hlavným prvkom je opäť ťažná komora (1) naplnená kvapalinou. Plechový polotovaru (2) je založený na zakladaciu rovinu ťažnej komory, pričom jeho povrch je v kontakte s kvapalinou. Po spustení pridržiavača (3) do dolnej polohy je zaistená tesnosť medzi polotovarom a komorou pomocou tesnenia (4). To je uložené v drážke vytvorenej v blízkosti ťažnej hrany. Po dosadnutí lisovníku (5) na plech a jeho vniknutí do komory, narastá tlak v kvapaline. Vďaka tomu sa plech nabaľuje na lisovník.

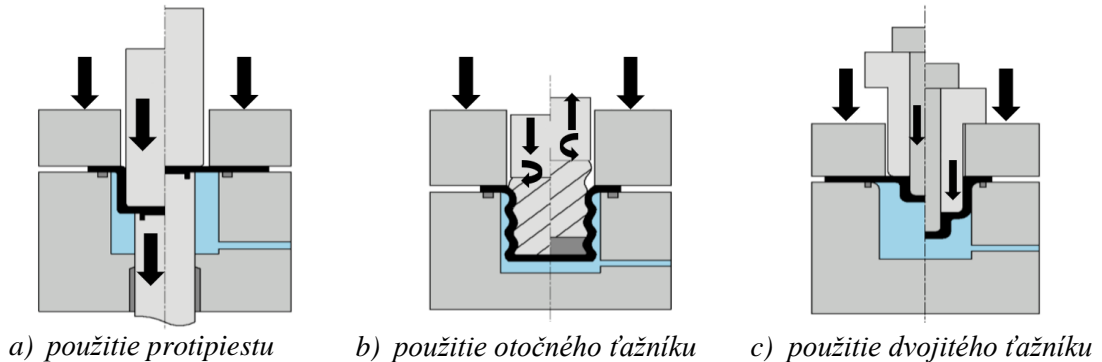
Udržovanie tlaku v komore na požadovanej hodnote, je docielené riadiacim a regulačným systémom zariadenia. Citlivé riadenie tlaku má význam predovšetkým pri tvárnení tenkých plechov.



a) založenie polotovaru b) zovretie nástroja c) tvárnenie polotovaru d) odoberanie dielca

Obr. 10 Princíp prostého hydromechanického ťahania [25]

V súčasnosti sa používa viac než dvadsať metód, ktoré pracujú na základe tejto technológie, napr. ťahanie s protipiestom (obr. 11a), ťahanie s otočným ťažníkom (obr. 11b), ťahanie odstupňovaných výtlačkov (obr. 11c).



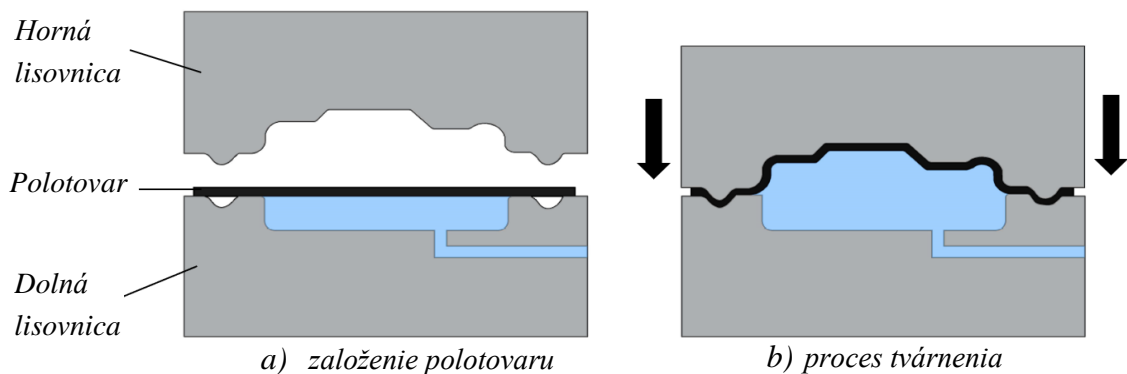
a) použitie protipiestu b) použitie otočného ťažníku c) použitie dvojitého ťažníku

Obr. 11 Metódy hydromechanického ťahania [11]

### 2.2.2 Hydroformovanie plechov lisovnicou [3, 11, 12, 17, 26, 27, 28, 29]

Plechový polotovaru je formovaný podľa tvaru lisovnice tlakom kvapaliny. Úlohu lisovníku teda preberá kvapalina. Kritériom pre rozdelenie metód hydroformovania lisovnicou je počet plechov – jeden alebo dva.

- Vypínanie plechu kvapalinou – angl. Hydro-stretch forming, princíp tejto metódy je znázornený na obrázku 12. Nástrojom je hydraulická tlaková komora a lisovnica, ktorá môže byť v hornej alebo dolnej pozícii. K tvárneniu polotovaru potom dochádza podľa negatívneho tvaru lisovnice.



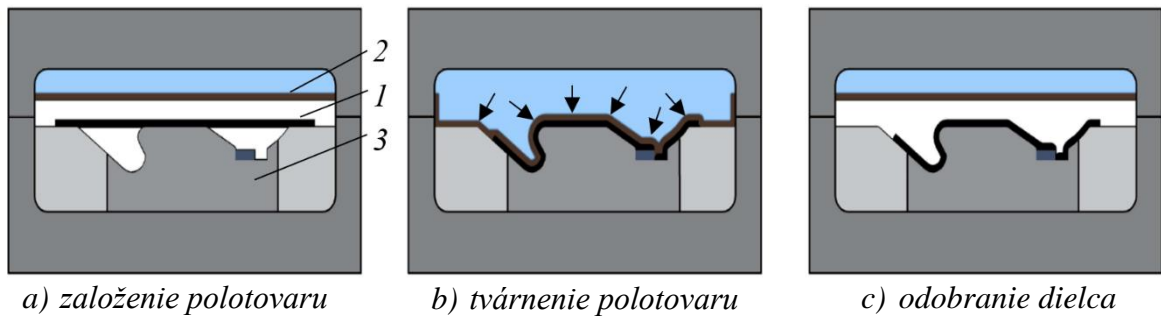
a) založenie polotovaru

b) proces tvárnenia

Obr. 12 Princíp vypínania plechu kvapalinou [12]

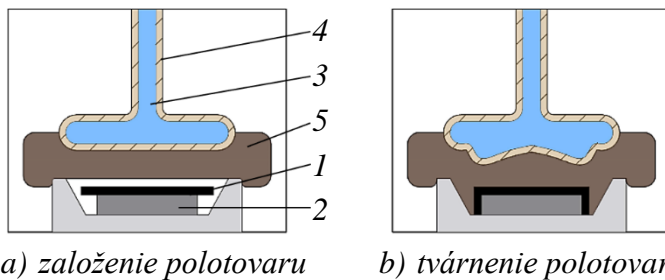
Vypínanie plechu kvapalinou je vhodné pre tvarovanie komplexných tvarov. To je jeden z dôvodov, prečo sa využíva pri výrobe povrchov vysokej kvality, tzv. Class A povrchy. Tie sú vyžadované v automobilovom priemysle, ale v súčasnosti sú časté aj pri spotrebnom tovare.

- Flexform – je metóda hydroformovania lisovnicou s membránou, princíp je zobrazený na obrázku 13. Polotovár (1) je uložený na pevnom nástroji. Plnením membrány (2) kvapalinou, dochádza k jej rozpínaniu, čím obaľuje lisovnicu (3), tvárni materiál a plní funkciu pridržiavača polotovaru. Lisovnica má tvar negatívu dielca a často býva delená, pre zjednodušenie odoberania hotového kusu. V jednom cykle je možné vyrobiť viacero menších alebo jeden veľký dieliec. S výhodou sa aplikuje pre výrobu rovnakých dielcov s rozdielnou hrúbkou polotovaru, prípadne aj z iného materiálu na jednom nástroji vďaka jednoduchej regulácii pôsobiaceho tlaku.



Obr. 13 Princíp metódy Flexform [26]

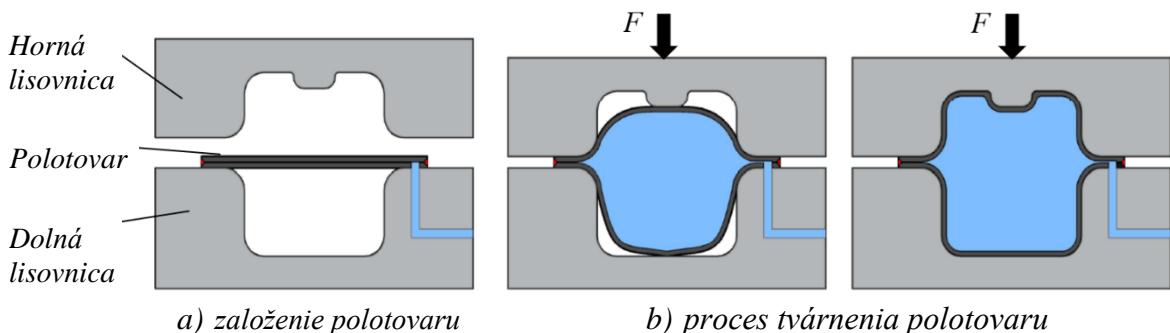
- Wheelon – niekedy tiež označovaná ako Verson-Wheelon, je ďalšou metódou, ktorá využíva membránu, vid' obr. 14. Metóda je založená na základoch tvárnenia pomocou elastoméru, tzv. Guerin proces. Svoje uplatnenie nachádza najmä pri výrobe plytkých dielcov v leteckom priemysle. Polotovár (1) je uložený na pevnej lisovnici (2).



Obr. 14 Princíp metódy Wheelon [27]

elastoméru, tzv. Guerin proces. Svoje uplatnenie nachádza najmä pri výrobe plytkých dielcov v leteckom priemysle. Polotovár (1) je uložený na pevnej lisovnici (2). Tlak kvapaliny (3) pôsobí na elastickú membránu (4), ktorá tlačí na gumovú vložku (5) formujúcu polotovár.

- Paralelné hydroformovanie – angl. Pillow hydroforming, je metóda používaná od 90-tych rokov, postavená na základoch hydroformovania trubiek. Polotovarom sú dva plechy, ktoré bývajú zvarené alebo je tesnosť medzi nimi docielená prítlačnou silou formy. Po vložení polotovaru medzi hornú a dolnú časť lisovnice sa tvárni tlakom kvapaliny (obr. 15).



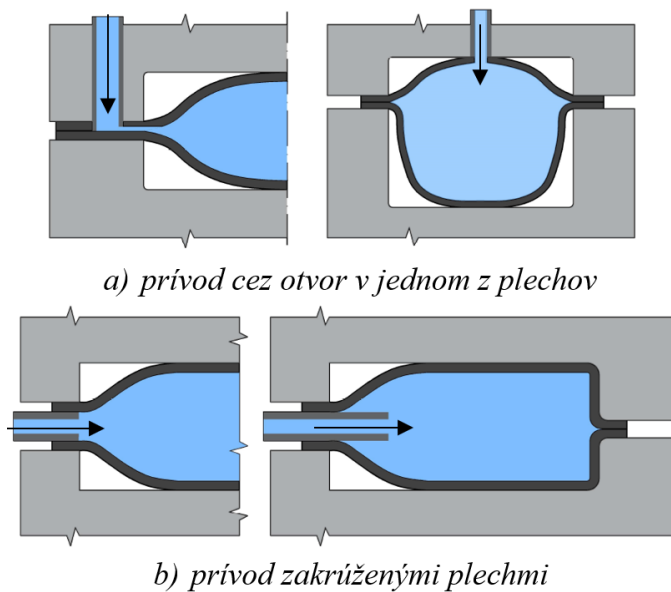
Obr. 15 Princíp paralelného hydroformovania [28]



Proces tvárnenia tvoria dve fázy. V prvej fáze sa materiál voľne deformuje v dutine formy. Pretvorenie je rovnomerné, takže sa minimalizuje vznik trhlín. Táto fáza je ukončená kontaktom polotovaru s lisovnicou. Druhá fáza predstavuje kalibráciu, pri ktorej je tlak tvárniaceho média vyšší. Nastavenie veľkosti tlaku je v závislosti na materiály polotovaru a geometrii hotového dielca.

Existuje niekoľko spôsobov, ktorými sa dostáva kvapalina medzi plechy. Prívod môže byť riešený otvorom v jednom z nich (obr. 16a) alebo pomocou zakrúžených plechov (obr. 16b). Tesnosť v mieste prívodu sa zabezpečuje napr. závitovým spojením.

Metóda je vhodná pre rozmerne, duté dielce komplikovaných tvarov. Takže svoje uplatnenie nachádza napr. v automobilovom priemysle pri výrobe konštrukčných prvkov ako sú nárazníky, nosníky, výfukový systém a palivové nádrže.



Obr. 16 Možnosti prívodu tvárniacej kvapaliny medzi plechy [29]

Hydroformovanie plechov je vhodné pre nízkouhlíkové ocele, ocele odolné voči korózii, vysokopevnostné ocele, hliníkové, horčíkové a titánové zliatiny apod. Pre väčšinu materiálov platí, že pokiaľ sú použiteľné pri konvenčných technológiách plošného tvárnenia sú vhodné aj pre hydroformovanie.

Výhody a nevýhody procesu hydroformovania plechových dielcov v porovnaní s konvenčnými technológiami sú nasledovné:

- + vyššie a rovnomernejšie rozloženie napätia po celom povrchu tvárneného plechu,
- + možné vytvorenie väčšej hĺbky dielu,
- + vyššia kvalita povrchu,
- + zníženie počtu operácií,
- + nižšie náklady na nástroje a kratší čas potrebný pre ich vývoj,
- dlhšie výrobné časy,
- väčšie polotovary zvyčajne vyžadujú vyššie hydraulické tlaky, to má za následok zvýšenie požiadavkou na zariadenie a teda aj nárast jeho ceny.

### 3. TVÁRNITEĽNOSŤ V TECHNOLOGII PLOŠNÉHO TVÁRNENIA

[1, 3, 11, 17, 30, 31, 32]

Všeobecne platí, že jedným z hlavných cieľov procesu výroby je produkovanie dielov bez väd. V technológii plošného tvárnenia sú defekty spôsobené predovšetkým obmedzenou tvárniteľnosťou resp. vyčerpaním zásoby plasticity. Tvárniteľnosť je schopnosť materiálu trvalo meniť tvar bez toho, aby došlo k jeho porušeniu za určitých termomechanických podmienok (napr. teplota, trenie, deformácia, rýchlosť deformácie).

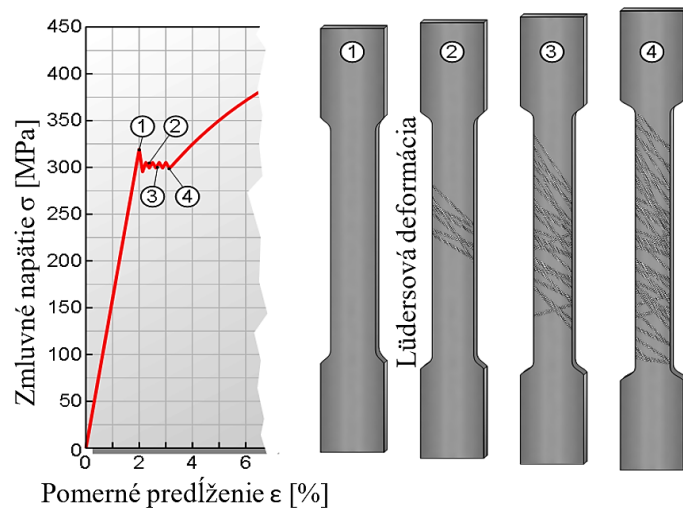
Vhodnosť materiálu pre plošné tvárnenie sa určuje ukazovateľmi a charakteristikami plasticity, z ktorých najväčší vplyv na použiteľnosť v plošnom tvárnení majú:

- pomer medze klzu a medze pevnosti – pre kovy s veľmi dobrými plastickými vlastnosťami je tento pomer  $\leq 0,65$ ,
- ťažnosť – tvárnosť materiálu sa zvyšuje s nárastom ťažnosti,
- kontrakcia – rovnako ako u predchádzajúcej deformačnej charakteristiky, aj u kontrakcie platí, že čím vyššia je hodnota kontrakcie, tým je materiál tvárnejší,
- pomerné a logaritmické pretvorenie – je dôležité najmä logaritmické pretvorenie do okamihu straty plastickej stability,
- súčiniteľ plastickej (normálovej) anizotropie,
- súčiniteľ plošnej anizotropie,
- exponent deformačného spevnenia – u materiálov s vynikajúcou plasticitou je tento exponent  $> 0,25$ , dobrá plasticita je definovaná hodnotou v intervale 0,215 až 0,25.

Tieto ukazovatele a charakteristiky sa zisťujú základnými mechanickými skúškami – skúškou ťahom alebo tvrdosti. Skúška ťahom sa robí podľa normy ČSN EN ISO 6892-1 (420310), navyše sa pre určenie niektorých ukazovateľov plasticity využívajú špeciálne upravené vzorky (napr. pre meranie exponentu deformačného spevnenia). Pokiaľ sa jedná o skúšku tvrdosti, využíva sa najčastejšie meranie podľa Vickersa. Je však možné použiť aj Rockwellovu metódu, prípadne pre hrubšie plechy meranie podľa Brinella. Skúškami tvrdosti sa získavajú informácie, ktoré poskytujú hrubý odhad o mechanických vlastnostiach materiálu.

Na výsledok procesu tvárnenia okrem materiálu polotovaru vplývajú aj ďalšie činitele ako geometria a rozmery polotovaru, geometria a materiál nástroja, rozhranie nástroj – polotovar (druh trenia, drsnosť povrchu apod.), parametre výrobného stroja, atď. Nesprávnym určením týchto parametrov môže dôjsť ku vzniku defektov, za ktoré sa v plošnom tvárnení považuje:

- vznik lokálnej deformácie (trhlina) – strata plastickej stability,
- zvlnenie stien – strata tvarovej stability,
- zmena geometrie, napr. odpruženie,
- znehodnotenie povrchu – Lüdersová deformácia (obr. 17), pomarančová štruktúra,
- u tenkostenných plechov lokálne vydutie.



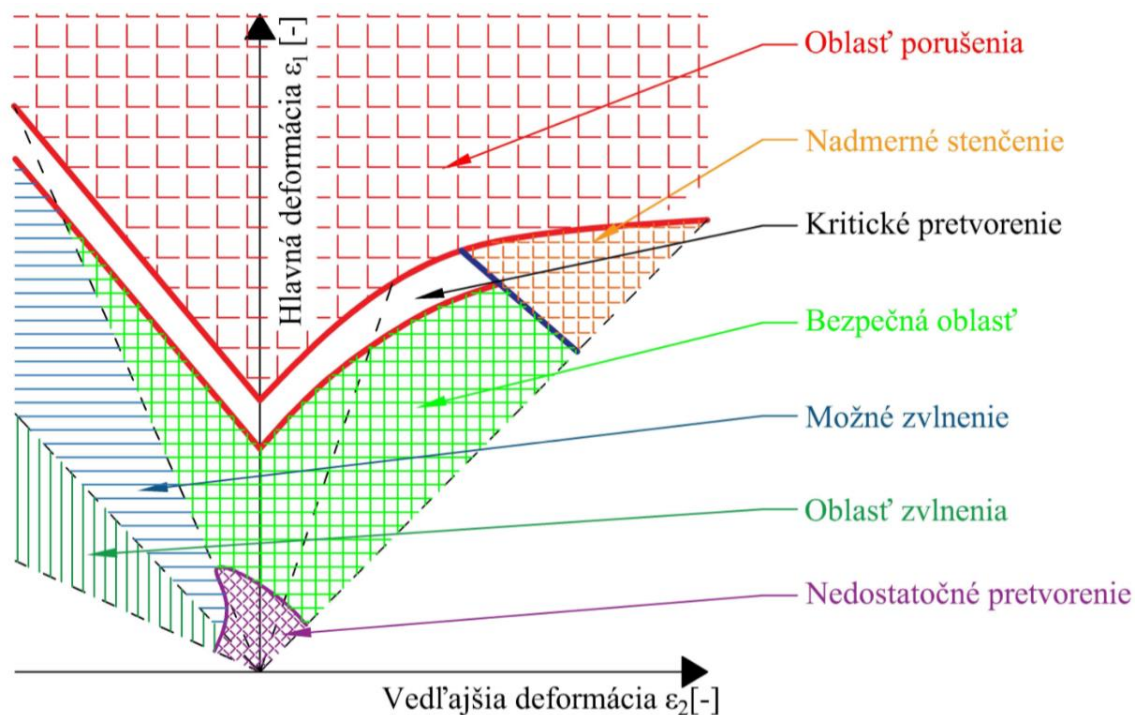
Obr. 17 Vznik Lüdersovej deformácie pri ťahovej skúške [32]

### 3.1 Diagramy medznej tváriteľnosti [3, 11, 17, 33, 34, 35]

V priemysle sa limity plošného tvárnenia stanovujú pomocou ukazovateľov a charakteristík plasticity, ktoré sú uvedené v predošlej kapitole. Okrem toho sú však vo veľkej miere využívané tzv. diagramy medznej tváriteľnosti (FLD z angl. Forming Limit Diagram).

Najznámejším z FLD je diagram podľa Keelera a Goodwina (K-G diagram), zobrazený na obr. 18. Na jeho vertikálnej osi sú nanesené hodnoty hlavných (najväčších) logaritmických pretvorení  $\varphi_1$ , prípadne pomerných pretvorení  $\varepsilon_1$ . Horizontálna os predstavuje vedľajšie logaritmické deformácie  $\varphi_2$ , resp. pomerné deformácie  $\varepsilon_2$ , ktoré sú v kolmom smere voči hlavnému pretvoreniu. Diagram sa skladá z dvoch kvadrantov. Keeler definoval kvadrant ťah – ťah (pre  $\varphi_2 > 0$ ). Druhý kvadrant ťah – tlak (pre  $\varphi_2 < 0$ ), bol popísaný Goodwinom.

Vyznačené krivky medznej tváriteľnosti (FLC z angl. Forming Limit Curve) na obrázku 18, predstavujú limitné hodnoty logaritmických resp. pomerných pretvorení  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ , resp.  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$ . Takto je diagram rozdelený na oblasť bezpečných pretvorení – pod krivkou a oblasť kritických pretvorení – nad krivkou. Odsadením tejto hranice z hľadiska bezpečnosti (v literatúre [34] sa uvádza 10 %) vzniká oblasť kritického pretvorenia.



Obr. 18 Schematické zobrazenie K-G diagramu medznej tváriteľnosti [34]

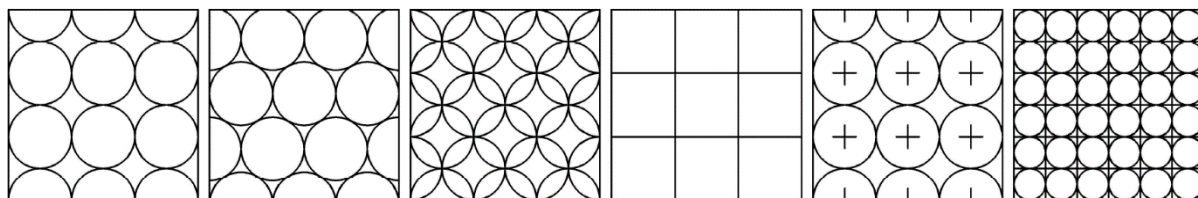
Analýza vzniku defektov sa robí pre známe hodnoty pretvorení na výrobku, ktoré sú vynesené do K-G diagramu. Takto je možné určiť okrem straty plastickej stability aj defekty typu zvlnenia steny alebo stenčenia (obr. 18). Vyhodnotením analýzy je potom možné eliminovať vznik týchto väd napr. zmenou geometrie nástroja, tlaku pridržovača atď.

Poloha kriviek K-G diagramu závisí na viacerých faktoroch, predovšetkým na druhu materiálu. Ďalšími významnými činiteľmi, ktoré ovplyvňujú polohu kriviek sú exponent deformačného spevnenia, hrúbka tvárneného materiálu, teplota a ďalšie. S narastajúcou hodnotou exponentu deformačného spevnenia dochádza k posunu kriviek v kladnom smere hlavného pretvorenia. Rovnaký vplyv je možné pozorovať aj v prípade nárastu hrúbky materiálu. Naopak nehomogenity a vady materiálu spôsobujú posun krivky k nižším hodnotám hlavného pretvorenia. Z uvedeného vyplýva, že K-G diagramy platia len pre konkrétny materiál, tvárniacu teplotu a hrúbku polotovaru.

Pre zisťovanie FLC sa môže aplikovať teoretický (výpočtový) prístup, ktorý vychádza z hodnôt počiatočnej hrúbky plechu, exponentu deformačného spevnenia a ďalších parametrov. Často sa ale využíva aj experimentálne určenie.

### 3.2 Zisťovanie FLC experimentálnou cestou [3, 11, 17, 33, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]

Experimentálny prístup je popísaný v normách ČSN EN ISO 12004-1 a ČSN EN ISO 12004-2. Tvorba FLC touto cestou vychádza z predpokladu, že k porušeniu materiálu dôjde v mieste s najväčším stenčením steny plechu, kde vzniká lokálna deformácia – zaškrcovanie. K určeniu tohoto miesta sa využíva najčastejšie metóda pretvorenia siete, ktorá okrem analýzy deformácií poskytuje aj predstavu o materiálovom toku, ohnisku plastickej deformácie, oblastiach s náročnými podmienkami deformácie a jej nerovnostiach a vplyve trenia na proces tvárnenia. Princíp metódy spočíva v pozorovaní pretvorení prvkov na povrchu skúšobnej vzorky. Nanášanie prvkov sa robí sieťotlačou, leptaním, rysovaním, fotograficky apod. Použitá technika sa volí tak, aby neovplyvnila výsledky experimentu napr. vytvorením vrubu alebo nízkou presnosťou. Deformačné siete sú tvorené pravidelnými obrazcami, čo je zobrazené aj na obrázku 19.



Obr. 19 Príklady bežne používaných deformačných sietí [17]

Deformovaním vzorky dochádza k pretvoreniu nanesej siete. Pritom môžu nastať dva prípady (obr. 20). V prvom prípade sú obe zložky pretvorenia kladné. Druhý prípad predstavuje stav pretvorenia, kedy hlavná deformácia je kladná a vedľajšia deformácia je záporná. Tieto napäťové stavy charakterizujú kvadranty Keeler-Godwinovho diagramu.

Kruhovú sieť deformedanej vzorky transformujú na elipsy. Hlavná os elipsy leží v smere maximálnej deformácie, ktorá sa pre logaritmický tvar vypočíta podľa vzťahu (3.1).

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d},$$

kde:  $\varphi_1$  – maximálna (hlavná) logaritmická deformácia [-],

$l_1$  – dĺžka hlavnej osi elipsy [mm],

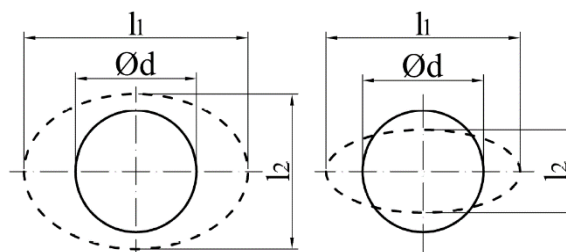
$d$  – počiatočný priemer prvku siete [mm].

Vedľajšia os charakterizuje smer vedľajšej deformácie. Výpočet logaritmickéj vedľajšej deformácie je potom daný touto formuláciou:

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d},$$

kde:  $\varphi_2$  – vedľajšia logaritmická deformácia [-],

$l_2$  – dĺžka vedľajšej osi elipsy [mm].



Obr. 20 Pretvorenie kruhových elementov pri metóde pretvorenia siete [3]

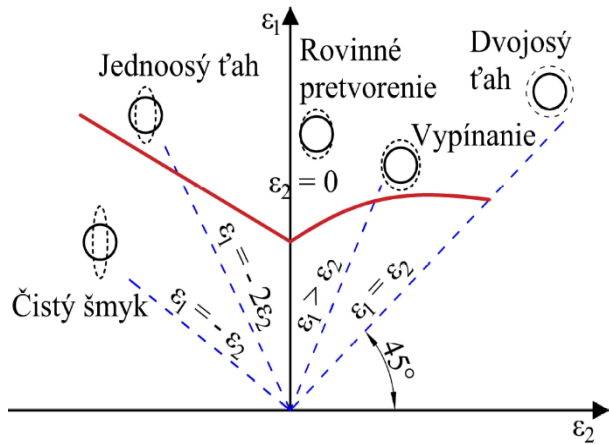
Deformácia v smere hrúbky  $\varphi_3$  je vypočítaná zo zákona zachovania objemu podľa (3.3).

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2, \quad (3.3)$$

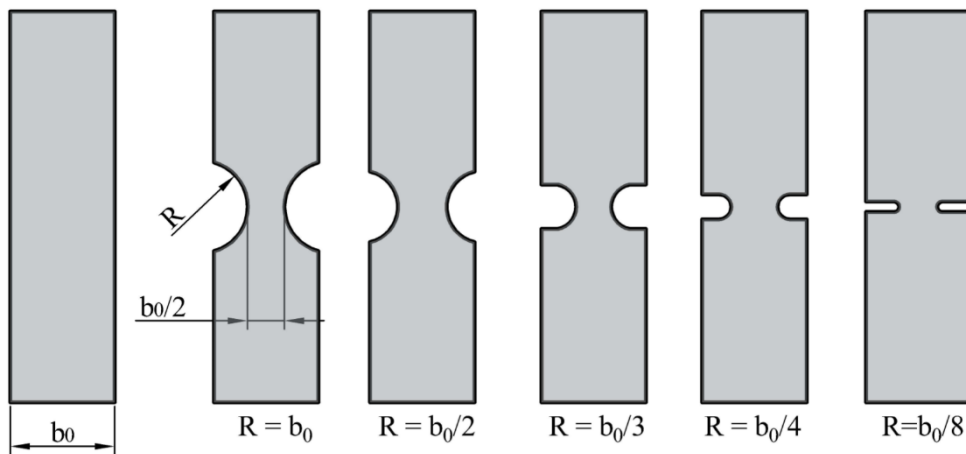
kde:  $\varphi_3$  – logaritmická deformácia v smere hrúbky skúšobnej vzorky [-].

K-G diagram zahŕňa viacero deformačných schém, čím vznikajú rôzne transformácie prvkov siete, vid' obr. 21. Aby sa získali kompletne informácie, vychádza sa zo základných materiálových skúšok, ktoré vyžadujú rôzne tvary skúšobných telies. Ďalej budú popísané vybrané metódy skúšania materiálov.

- Ťahová skúška – je používaná pre určenie mechanických vlastností materiálu a tiež FLC. Testovaná vzorka je pri experimente zaťažovaná do okamihu porušenia. Aby boli získané informácie pre širšiu oblasť FLC, je potrebné zmeniť geometriu skúšobného telesa (obr. 22), čím sa dosiahnu rôzne napät'ové stavy a teda aj deformačné stopy. Výhodou skúšky je jednoduchosť, čo sa týka samotného merania a vyhodnocovania, ale aj strojného vybavenia (možné použiť univerzálne stroje). Obmedzenie naopak spočíva v tom, že je takto popísaný len Goodwinov kvadrant K-G diagramu,  $\varphi_2 < 0$ .

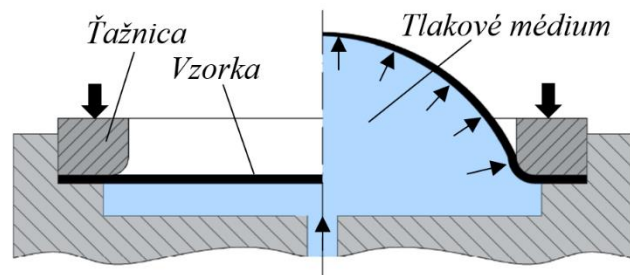


Obr. 21 Schematické zobrazenie K-G diagramu s deformačnými stopami [35]



Obr. 22 Geometria vzoriek pre určovanie FLC ťahovou skúškou [33]

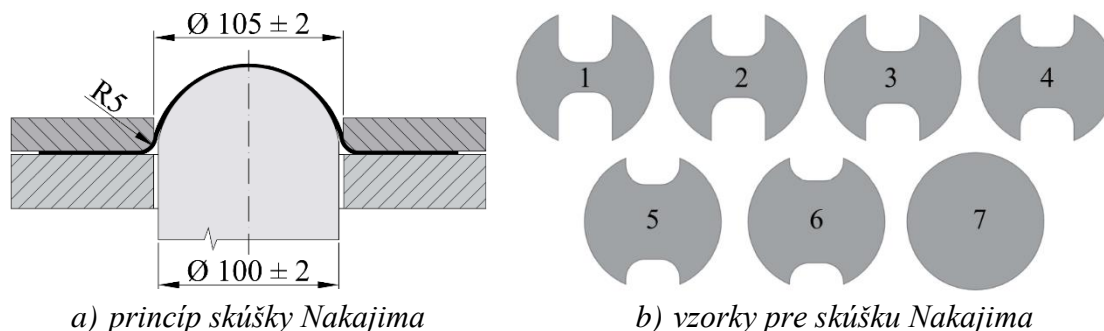
- Hydraulická skúška – princíp skúšky je zobrazený na obr. 23. Vzorka je upnutá po okraji pomocou pridržovača, ktorý súčasne zaisťuje tesnosť. Zvyšovaním tlaku kvapaliny sa vzorka vydúva až do porušenia. Pokrytie širšej oblasti limitnej krivky sa robí napr. zmenou geometrie ťažnice, pôvodný kruhový tvar sa mení na eliptický. Výhoda metódy spočíva v tom, že vzorka nie je v kontakte s nástrojom, čím sa eliminuje vplyv trenia. Hydraulická skúška sa používa pre získanie Keelerovho kvadrantu K-G diagramu.



Obr. 23 Princíp hydraulickej skúšky [38]



- Skúška podľa Nakajimy – patrí k najpoužívanejším skúškam v tejto oblasti a je popísaná v norme ČSN EN ISO 12004-2. Princíp je založený na deformovaní vzoriek upnutých pomocou pridržovača, pôsobením pologul'ového ťažníku do vzniku trhliny, vid' obr. 24a. Minimalizovanie vplyvu trenia je docielené použitím vhodného maziva. Tribologický systém je volený tak, aby ku porušeniu dochádzalo, čo najbližšie vrcholu ťažníku. Na rozdiel od predošlých skúšok umožňuje Nakajima test stanovenie FLC v celom rozsahu. Zmena tvaru vzorky pre pokrytie kladných aj záporných hodnôt je zobrazená na obr. 24b (vzorky 1 až 7 sa využívajú pre popis limitnej krivky K-G diagramu zľava doprava). Výhoda skúšky spočíva v jednoduchosti nástroja a tiež testovaných telies. Počas experimentu však môže dôjsť ku zvlneniu výťažku.

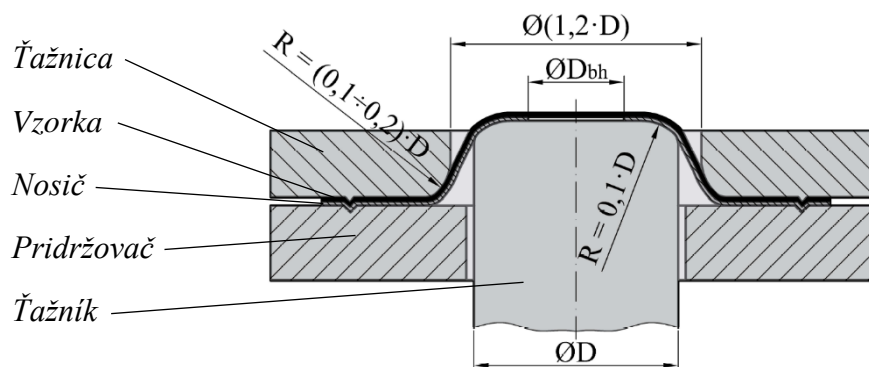


a) princíp skúšky Nakajima

b) vzorky pre skúšku Nakajima

Obr. 24 Skúška podľa Nakajimy [39]

- Skúška podľa Marciniaka – metóda je popísaná v norme ČSN EN ISO 12004-2. Uloženie skúšobného telesa pri teste je riešené nosičom s otvorom o priemere  $D_{bh}$  (zvyčajne 32 až 34 mm), ktorý zabezpečuje lom v požadovanom mieste a homogénnu deformáciu. Nosič musí byť vyrobený z materiálu s minimálne rovnakou ťažnosťou ako vzorka, aby počas experimentu nedošlo k jeho porušeniu skôr ako u vzorky. Tiež je možné použiť viac nosičov. Upnutie nosiča je riešené maticou a pridržovačom (obr. 25). Pretváranie vzorky je docielené pôsobením valcového ťažníku s plochým čelom s priemerom  $D = 100 \pm 25$  mm. Mazivo sa môže nanášať len v miestach medzi nosičom a ťažníkom. Skúška poskytuje celý priebeh FLC pri vhodnej úprave vzoriek, prípadne aj ťažníku.



Obr. 25 Skúška podľa Marciniaka [41]

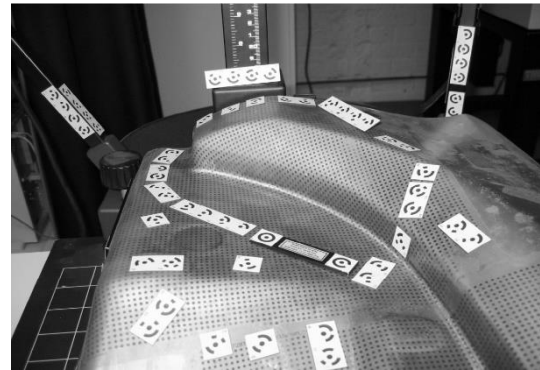
Po vykonaní skúšky resp. skúšok nasleduje zisťovanie pretvorenia prvkov deformačnej siete, vynášaného do K-G diagramu. K tomu sa používajú viaceré metódy, ktoré poskytujú rôznu presnosť nameraných výsledkov. Tieto metódy sa následne aplikujú aj pre zistenie hlavných a vedľajších pretvorení pri analýze reálnych dielcov. Okrem toho je pre zistenie týchto pretvorení možné použiť metódu konečných prvkov.

Jednou z najjednoduchších metód je meranie priehľadnými páskami. Tie majú vyznačené hodnoty hlavného a vedľajšieho pretvorenia a prikladajú sa priamo k skúmanému povrchu.

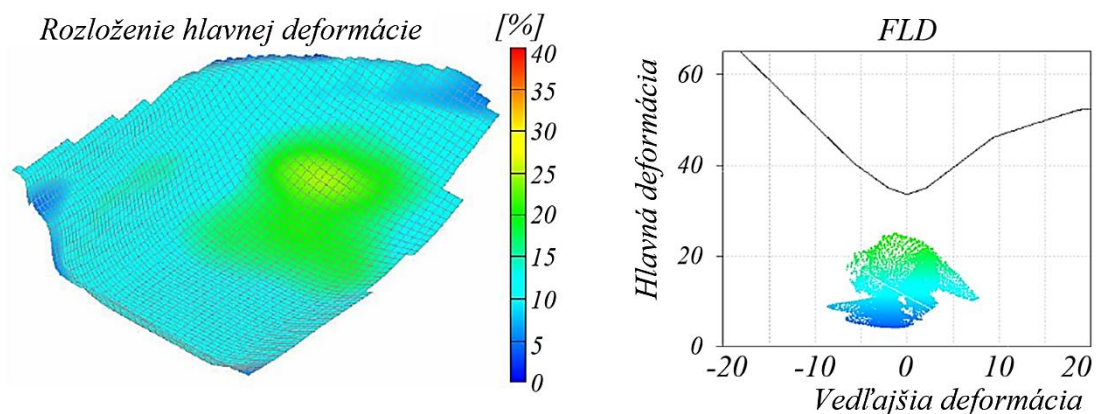
Výhodou metódy je, že pásiky veľmi dobre kopírujú aj zakrivené plochy. Na druhej strane stojí významný nedostatok, ktorým je nízka presnosť.

V dnešnej dobe prevláda meranie deformácií optickými systémami, ktoré poskytujú vysokú presnosť a šetia čas. Do tejto skupiny meracích systémov patria napr. ARGUS a ARAMIS od spoločnosti GOM.

- ARGUS – je používaný pre analýzu procesov plošného tvárnenia, obzvlášť v automobilovom priemysle. Meranie vychádza napríklad z metódy pretvorenia siete, kedy je na povrch vzorky nanosená deformačná sieť. Stred prvkov siete je referenčným bodom, ktorý sa zaznamenáva digitálnym CCD fotoaparátom z rôznych pohľadov. Sklon fotoaparátu a jeho poloha sú zistené špeciálnymi značkami (obr. 26). Fotogrametické algoritmy využívajú získané obrazy pre určenie súradníc bodov v priestore. Následne sa porovnáva nová geometria s pôvodnou. Výsledky poskytujú informácie o stenčení steny v dôsledku tvárnenia, detekovanie kritických miest, FLD a ďalšie. Obrázok 27 zobrazuje výsledky merania, po analýze a optimalizácii dielca pomocou systému ARGUS.



Obr. 26 Príklad rozloženia orientačných značiek – ARGUS [44]



Obr. 27 Výstup z merania systémom ARGUS [42]

- ARAMIS – rovnako ako ARGUS, je vhodný pre meranie deformácií, rozmerných (v rádoch metrov) aj menších dielov (v rádoch milimetrov), nezávisle na skúmanom materiály. Rozdielny je princíp, na ktorom tento systém pracuje. Oproti predošlým metódam nie je potrebné vytvárať deformačnú sieť. Na povrchu materiálu sa nástrekom vytvorí kontrastný vzor, ktorý sa pri zaťažení deformuje spoločne s analyzovaným telesom. Toto je snímané dvomi kamerami s definovanou polohou a natočením voči sebe (obr. 28). Následným spracovaním snímok sú získané polohy súradníc bodov na povrchu telesa. Snímkovanie prebieha v počte niekoľko tisíc obrazov za sekundu, čo umožňuje zobrazenie všetkých deformačných stavov telesa počas záznamu.



Obr. 28 Merací systém ARAMIS [43]

## 4. METÓDA KONEČNÝCH PRVKOV [1, 30, 46]

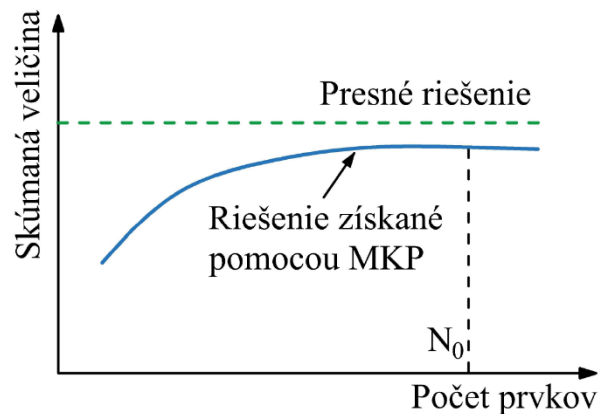
Požiadavky na úsporu nákladov a času sú hlavnými dôvodmi, prečo sa pri riešení tvárniacich procesov čoraz viac využíva výpočtový prístup. Metódy založené na tomto prístupe sa delia na analytické a numerické. Analytické metódy poskytujú presné riešenie. Ich princíp spočíva v hľadaní závislosti, ktorá popisuje vzťah medzi vstupnými a výstupnými parametrami. Problém pri aplikovaní analytických metód spočíva vo výpočte diferenciálnych rovníc. Vzhľadom ku geometrii telesa, pôsobiacemu zaťaženiu a materiálovým vlastnostiam, nemusia byť vždy riešiteľné. To je dôvod, prečo sa použitie obmedzuje na riešenie jednoduchých úloh. Reálne procesy sú oveľa zložitejšie, a tu svoje uplatnenie nachádzajú numerické metódy. K ich rozvoju prispel vývoj výpočtovej techniky. Na rozdiel od analytických metód je riešenie ovplyvnené numerickou chybou. Presnosť je ale pre väčšinu oblastí použitia dostatočujúca.

Jednou z najpoužívanejších numerických metód je metóda konečných prvkov (MKP), angl. Finite Element Method. Základnou myšlienkou MKP je tzv. diskretizácia. Tento pojem je možné chápať dvomi spôsobmi. Prvý význam popisuje proces, pri ktorom sa rozdelí kontinuum na konečný počet geometricky jednoduchých dielov. Druhý význam je spojený s riešením úlohy po častiach. To znamená, že namiesto riešenia problému celého telesa naraz, sa formulujú vzťahy pre výpočet neznámych parametrov jednotlivých elementov.

### 4.1 Voľba elementov konečnoprvkovej siete [1, 46, 47, 48, 49]

MKP spočíva v rozdelení telesa na menšie elementy tzv. konečné prvky. Ich spojením prostredníctvom spoločných rozhraní sa vytvára konečnoprvková sieť, ktorá je definovaná nasledujúcimi parametrami:

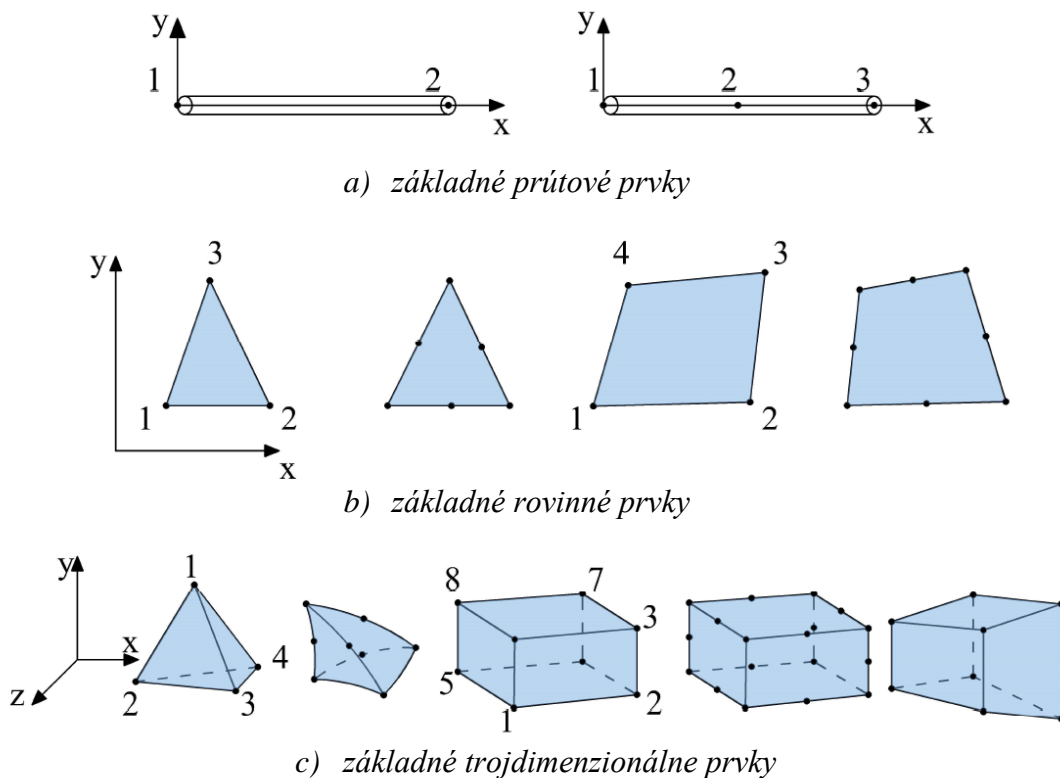
- veľkosť prvkov – prvky musia byť dostatočne malé, aby poskytli požadovanú presnosť výsledkov. S tým však súvisí zvýšenie výpočtovej náročnosti metódy.
- počet prvkov – s rastúcim počtom prvkov, narastá presnosť riešenia. Táto závislosť ale platí len do určitého okamihu. Každá úloha má totiž optimálny počet elementov, po ktorého prekročení nedochádza k ďalšiemu zvyšovaniu presnosti, vid' obr. 29.



Obr. 29 Závislosť presnosti riešenia na počte prvkov [49]

- typy prvkov – závisia predovšetkým na geometrii analyzovaného telesa. Programy využívajúce MKP, poskytujú niekoľko typov prvkov, ktoré je možné rozdeliť z viacerých hľadísk. Najčastejšie sa uvádza rozdelenie podľa dimenzie prvku:
  - jednodimenzionálne prvky (obr. 30a) – tzv. prútové prvky, používajú sa pre reprezentáciu nosníkov a rámových konštrukcií.
  - dvojdimenzionálne prvky (obr. 30b) – nachádzajú využitie pri riešení rovinných úloh. Jedná sa o trojuholníkové, štvoruholníkové ale aj viacstranové prvky. Priestorové telesá, ktorých rozmer v jednom smere (spravidla hrúbka) je oproti ostatným rozmerom malý, je možné modelovať škrupinovými, tzv. shell prvkami.
  - trojdimenzionálne prvky (obr. 30c) – sú nevyhnutné v prípade komplikovanejších úloh, najmä v prípade viacošej napätosti. Bežne používané sú troj-, štvor-, alebo šesťstenné telesá.





Obr. 30 Základné typy jedno, dvoj a trojdimenzionálnych elementov [47]

Prvky sú okrem dimenzie charakterizované počtom uzlov. Ide o body, v ktorých sa hľadajú neznáme parametre riešenia. Je teda zrejmé, že počet uzlov ovplyvňuje kvalitu získaných výsledkov a tiež výpočtovú náročnosť. Z tohoto hľadiska sa prvky delia na:

- lineárne – prvky majú uzly len na koncoch resp. v rohoch, sú popísané lineárnymi funkciami,
- kvadratické – prvky majú navyše uzly aj v strede hrán. Tieto prvky sú popísané kvadratickými funkciami.

## 4.2 Riešenie úloh s využitím MKP [1, 11, 46, 48]

Riešenie úloh pomocou MKP spočíva v hľadaní odozvy sledovaného systému v závislosti na okolitých podmienkach. Odozva je popísaná hodnotami, ktoré boli získané na základe vykonanej analýzy. Ak sa jedná o aplikáciu MKP v oblasti tvárnenia, využíva sa predovšetkým napätovo-deformačná prípadne teplotná analýza. Pri napätovo-deformačnej analýze sú hľadanými veličinami:

- zložky posuvov ( $u, v, w$ ),
- zložky pretvorenia ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ ),
- zložky napätí ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_x, \tau_y, \tau_z$ ).

Získanie všetkých 15 neznámych, je podmienené vyriešením 15 rovníc. Jedná sa o rovnice rovnováhy, deformačné a fyzikálne rovnice. Systém rovníc musí byť navyše doplnený o okrajové podmienky, ktoré musia byť splnené na hranici riešenej oblasti. Vzhľadom k výpočtovej náročnosti prebieha riešenie postupne, dosadzovaním a elimináciou neznámych veličín. Výsledok je potom popísaný skupinou nezávislých, neznámych parametrov (obsahujú len jeden typ neznámych napr. zložky napätí, posuvov, apod.), ktoré charakterizujú prístup k riešeniu danej úlohy. Základné prístupy sú napätový, deformačný a rýchlostný, možná je aj ich kombinácia. Tieto prístupy sa okrem toho delia podľa matematickej formulácie problému na diferenciálne a variačné. Prvá formulácia popisuje problém sústavou diferenciálnych

rovníc. Variačná formulácia spočíva v hľadaní riešenia problému ako stav, v ktorom energia analyzovaného telesa dosahuje extrémnu hodnotu.

V praxi je najčastejšie využívaný deformačný prístup, v ktorom vystupujú ako neznáme parametre posuvy. Výpočet v tomto prípade vychádza z tzv. Lagrangeovho variačného princípu, ktorý podľa [48] hovorí nasledovné „zo všetkých v úlohe definovaných funkcií posuvov, ktoré musia vyhovovať geometrickým okrajovým podmienkam a podmienkam spojitosti telesa, sa uskutočňujú len tie, pre ktoré dosahuje potenciálna energia stacionárnej hodnoty, čiže svojho minima“.

Typy úloh MKP závisia na celi problematiky. Z časového hľadiska sú úlohy delené na statické a dynamické. U dynamických modelov sa uvažuje so zotrvačnými účinkami ako napr. gravitačné zrýchlenie. Ďalej sa rozlišujú úlohy na základe linearity na lineárne a nelineárne. Nelinearita riešeného problému, býva dôsledkom geometrickej a materiálovej nelinearity a tiež kontaktom telies.

Aplikovaním Lagrangeovho variačného princípu na riešený problém a jeho úpravou je odvodená základná rovnica MKP:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}, \quad (4.1)$$

kde:  $\mathbf{K}$  – celková (globálna) matica tuhosti,  
 $\mathbf{U}$  – celková matica deformačných parametrov (neznáme),  
 $\mathbf{F}$  – celková matica zaťažení.

Tento vzťah platí pre lineárne, statické úlohy a predstavuje maticový zápis sústavy lineárnych algebrických rovníc. Tvar základnej rovnice MKP sa mení podľa spomínaných typov úloh. Pre statické nelineárne úlohy platí nelineárna závislosť. To je dôsledkom toho, že celková matica tuhosti  $\mathbf{K}$  je funkciou posuvov. Nelinearity riešeného problému spôsobujú, že spoľahlivosť úlohy je nižšia oproti statickým lineárnym úlohám. Výpočet je zložitejší, keďže vedie na opakované riešenie sústavy rovníc. Základný predpis MKP pre tieto úlohy má nasledujúci tvar:

$$\mathbf{K}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}. \quad (4.2)$$

U dynamických úloh sú hľadané veličiny funkciou času. Tvar základnej rovnice sa mení podľa toho, či je alebo nie je zahrnutý vplyv tlmenia sústavy. Pre dynamickú rovnicu bez tlmenia platí vzťah (4.3).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t), \quad (4.3)$$

kde:  $\mathbf{M}$  – celková matica hmotnosti,  
 $\ddot{\mathbf{U}}$  – celková matica zrýchlení.

Zahrnutie tlmenia je problematické, pretože sa na ňom podieľa viacero faktorov (materiál, konštrukcia, prostredie). Jeho vplyv v pohybovej rovnici predstavuje matica  $\mathbf{C}$ . Základný predpis pre dynamické úlohy s tlmením je potom daný vzťahom (4.4).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t), \quad (4.4)$$

kde:  $\mathbf{C}$  – celková matica tlmenia,  
 $\dot{\mathbf{U}}$  – celková matica rýchlosti.

Dynamické úlohy sú riešené implicitným alebo explicitným algoritmom. Tieto pojmy súvisia so spôsobom časovej integrácie rovníc (4.3) a (4.4).

#### 4.2.1 Implicitný algoritmus [11, 48, 50]

Implicitný algoritmus vychádza zo známeho riešenia v čase  $t_i$ , pri výpočte riešenia v časovom okamihu  $t_{i+1}$ . Tým sa získajú neznáme parametre, ktoré v prípade deformačného prístupu predstavujú maticu posuvov  $\mathbf{U}_{i+1}$ .

Pre prípad dynamickej úlohy bez tlmenia má pohybová rovnica v čase  $t_{i+1}$  tvar:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_{i+1} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{F}_{i+1}. \quad (4.5)$$

Dĺžka časového kroku, je daná vzťahom:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i. \quad (4.6)$$

Hľadané rýchlosti a zrýchlenia sú vyjadrené výrazmi (4.7) a (4.8).

$$\dot{\mathbf{U}}_{i+1} = \frac{(\mathbf{U}_{i+1} - \mathbf{U}_i)}{\Delta t}, \quad (4.7)$$

$$\ddot{\mathbf{U}}_{i+1} = \frac{(\dot{\mathbf{U}}_{i+1} - \dot{\mathbf{U}}_i)}{\Delta t}. \quad (4.8)$$

Zrýchlenie je potom možné s využitím vzťahu (4.7) formulovať posuvmi:

$$\ddot{\mathbf{U}}_{i+1} = \frac{\mathbf{U}_{i+1} - 2 \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{U}_{i-1}}{\Delta t^2}. \quad (4.9)$$

Po dosadení vzťahu (4.9) do (4.5) a úprave je získaná sústava rovníc, pre určenie neznámych posuvov v tvare:

$$\left( \mathbf{K} + \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \right) \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \frac{\mathbf{F}_{i+1} + \mathbf{M} \cdot (2 \cdot \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{i-1})}{\Delta t^2}. \quad (4.10)$$

Ľavá strana vzťahu (4.10) predstavuje súčin dynamickej matice tuhosti  $\hat{\mathbf{K}}$  a neznámych posuvov. Pravá strana je označovaná ako dynamickejšia matica zaťaženia  $\hat{\mathbf{F}}$ . Potom sa získa sústava, ktorá formálne predstavuje statický problém:

$$\hat{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \hat{\mathbf{F}}. \quad (4.11)$$

Ak sa zanedbajú zotrvačné sily, je možné vylúčiť zo vzťahu (4.10) maticu hmotností  $\mathbf{M}$ . Tým pádom problém prejde do riešenia statickej úlohy. To je dôvod, prečo sa o implicitnom algoritme hovorí aj pri riešení statických úloh.

V niektorých prípadoch riešenie jednotlivých časových krokov vyžaduje opakovane počítať (4.11), čo zvyšuje výpočtovú náročnosť. U implicitného algoritmu platí, že riešenie je stabilné bez ohľadu na zvolenú dĺžku časového kroku  $\Delta t$ . Preto sa využívajú čo najdlhšie časové kroky, pričom treba zohľadniť klesajúcu presnosť. Výpočet potom prebieha podľa prírastkovo-iteračného algoritmu modifikovanej Newton-Raphsonovej metódy. Použitie implicitného algoritmu sa obmedzuje predovšetkým na statické deje, prípadne pomalšie dynamické deje s menšou mierou nelinearity.

#### 4.2.2 Explicitný algoritmus [11, 48, 50]

Explicitný algoritmus bude taktiež aplikovaný na pohybovú rovnicu (4.3). V tomto prípade je ale matica posuvov riešená pre časový okamih  $t_i$ . To vyplýva z metódy centrálnych diferencií, ktorá je použitá pre aproximáciu matice zrýchlení. Východiskový tvar pohybovej rovnice je nasledujúci:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i. \quad (4.12)$$

Zrýchlenie je formulované vzťahom (4.13).

$$\ddot{\mathbf{U}}_{i+1} = \frac{\mathbf{U}_{i+1} - 2 \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{U}_{i-1}}{\Delta t^2}. \quad (4.13)$$

Po dosadení (4.13) do (4.12) a úprave je získaný vzťah (4.14) pre výpočet neznámych posuvov.

$$\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{F}_i - \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{M} \cdot \frac{2 \cdot \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{i-1}}{\Delta t^2}. \quad (4.14)$$

Z (4.14) je zrejmé, že pre výpočet matice posuvov v časovom okamihu  $t_{i+1}$  sa vychádza z pohybovej rovnice predošlého časového okamihu.

Algoritmus je vhodný pre simuláciu rýchlych dynamických dejov. Problémy nenastávajú ani pri výraznej nelinearite problému, ktorá býva s týmito dejmi často spojená. Obzvlášť veľkou výhodou je výpočtová rýchlosť algoritmu.

Použitie pre statické úlohy, so zanedbaním zotrvačných účinkov a vynechaním matice hmotnosti  $\mathbf{M}$  sa algoritmus stáva nepoužiteľným. Problém nastáva aj pri stabilite algoritmu – je podmienene stabilný. Stabilný výsledok je podmienený tým, že časová dĺžka kroku je dostatočne malá. K tomu sa využíva porovnanie s kritickou hodnotou, ktorá závisí na hustote siete a rýchlosti šírenia zvuku.

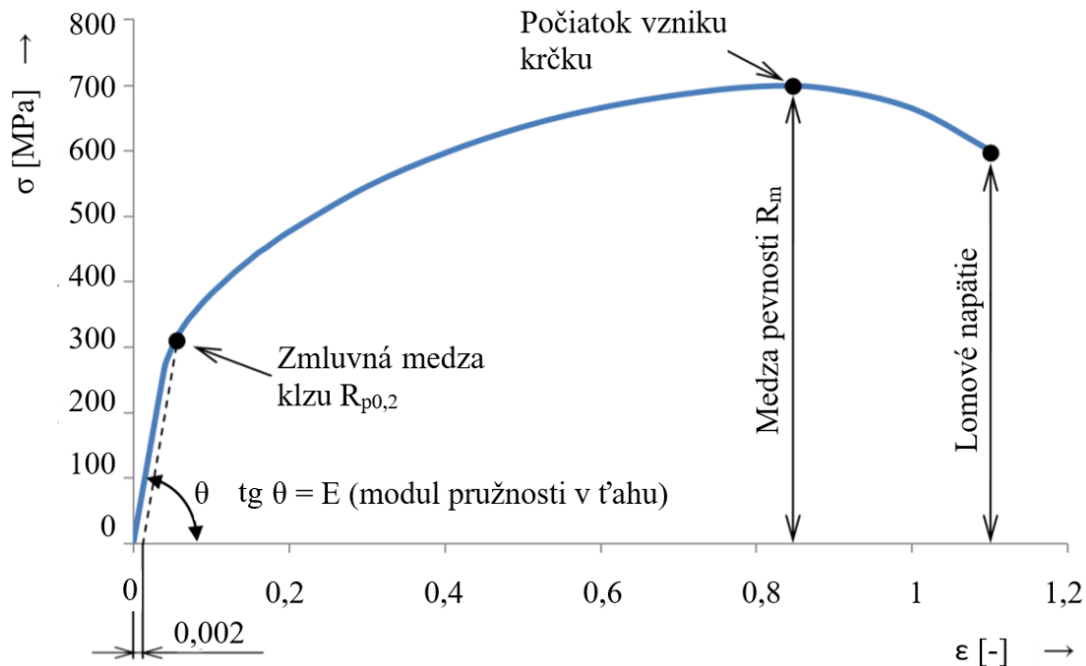
### 4.3 Materiálový model [1, 11, 17, 30, 32, 46, 51, 52]

Definovanie materiálového modelu sa v softvéroch MKP robí v rámci tzv. preprocessingu. Okrem toho táto fáza zahŕňa aj prípravu geometrického modelu, modelu zaťažovania, definovanie okrajových podmienok apod. Potrebné dáta pre materiálový model sa získavajú výpočtovými metódami alebo experimentálne. Jedným z ukazovateľov chovania materiálu pri zaťažení sú mechanické vlastnosti. Vzhľadom k tomu, sa v prípade experimentálneho určenia využívajú mechanické skúšky, najčastejšie skúška ťahom.

Ťahová skúška spočíva v zaťažovaní vzorky jednoosou napätosťou, zvyčajne do okamihu lomu. Počas skúšky sa zaznamenáva sila, pôsobiaca v ose vzorky a predĺženie. Namerané hodnoty sa následne spracujú, čím sa získa:

- zmluvný diagram napätie – deformácia ( $\sigma - \epsilon$ ),
- skutočný diagram napätie – deformácia ( $\bar{\sigma} - \varphi$ ).

Zmluvný diagram (obr. 31) predstavuje závislosť zmluvného napätia na pomernom predĺžení. Vyhodnotením tejto závislosti sa získavajú zmluvné napätové a deformačné charakteristiky. Z napätových sa jedná o medzu klzu  $R_e$ , resp. zmluvnú medzu klzu  $R_{p0,2}$  a medzu pevnosti  $R_m$ . Medzi deformačné charakteristiky patrí ťažnosť  $A$ , zúženie  $Z$  a ďalšie. Lineárna časť na začiatku zmluvnej závislosti je popísaná Hookovým zákonom. Smernicou tejto priamky je modul pružnosti v ťahu  $E$ .



Obr. 31 Zmluvná závislosť napätie – deformácia [46]

Počas ťahovej skúšky dochádza k zmenšovaniu prierezu vzorky. Keďže zmluvné napätie je vzťahované na počiatkový prierez, je zmluvný diagram vhodný len pre malé deformácie.

V simuláciách MKP sa používa skutočný diagram napätie – deformácia. Ide o závislosť skutočného napätia na tzv. logaritmickú deformáciu. Toto napätie je dané podielom sily ku okamžitému prierezu. Diagram sa ale väčšinou vykresľuje na základe hodnôt pomerného predĺženia a zmluvného napätia pomocou prepočtových vzťahov (4.15) a (4.16).

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon), \quad (4.15)$$

kde:  $\varphi$  – logaritmická deformácia [-],

$\varepsilon$  – pomerná deformácia [-].

$$\bar{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon), \quad (4.16)$$

kde:  $\bar{\sigma}$  – skutočné napätie [MPa],

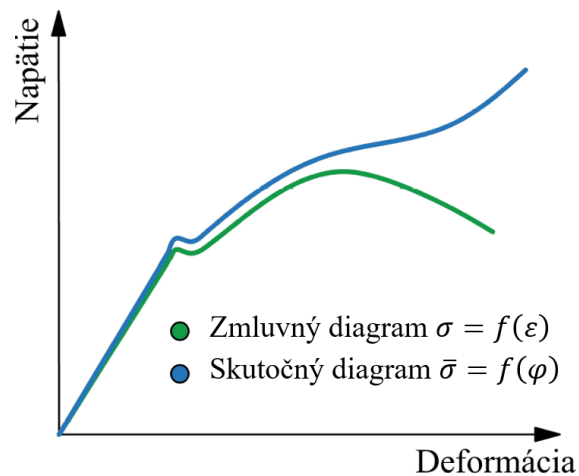
$\sigma$  – zmluvné napätie [MPa].

Platnosť vzťahov (4.15) a (4.16) je obmedzená po medzu pevnosti, ďalej sa jednoosý stav napätosti mení na trojosý. Existuje viacero variant pre získanie skutočnej závislosti v oblasti od medze pevnosti do lomu skúšobnej vzorky. Najjednoduchšia možnosť je výpočet napätia a deformácie v okamihu lomu. Získaný bod sa prepojí so zvyšnou časťou diagramu aproximáciou funkciou. Okrem tohoto variantu sa používajú matematické formulácie, napr. podľa Bridgmana.

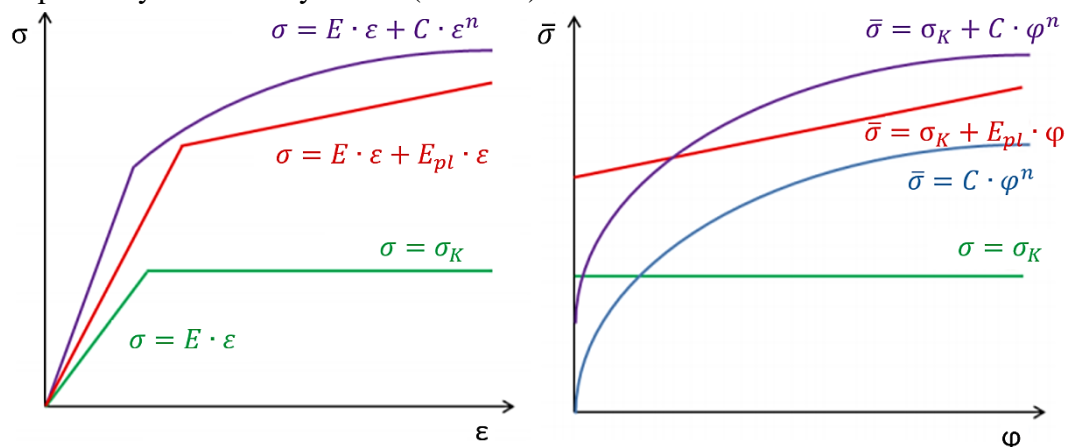
Krivka skutočného diagramu sa od zmluvnej závislosti u väčšiny materiálov odkláňa v okamihu vzniku plastickej deformácie. Výrazný odklon ale nastáva za medzou pevnosti, vid' obr. 32. Aplikované zaťaženie klesá a vytvára sa krčok.

Pri zadávaní materiálového modelu do softvéru, sa samostatne definuje časť elastickej a plastickej deformácie. Elastická oblasť je popísaná modulom pružnosti v ťahu  $E$  a Poissonovým pomerom  $\mu$ . Plasticke vlastnosti sú definované krivkou spevnenia. Jej zadávanie môže byť bodmi skutočnej závislosti napätie – deformácia alebo matematickou formuláciou (Ludwik-Holomonov vzťah, Krupkowského aproximácia apod.). Základné rozdelenie materiálových modelov je nasledovné:

- pružne-plastický materiálový model (obr. 33a),
- tuho-plastický materiálový model (obr. 33b).



Obr. 32 Schematické porovnanie skutočnej a zmluvnej závislosti [32]



a) pružne-plastické materiálové modely    b) tuho-plastické materiálové modely

Obr. 33 Základné materiálové modely používané v MKP [11]

Pri pružne-plastickom modeli je zahrnutá aj elastická oblasť, zatiaľ čo u tuho-plastického sa táto oblasť zanedbáva.

Rozdielnosť materiálových vlastností v rôznych smeroch je definovaná anizotropiou. Prejavuje sa najmä u valcovaných plechov a je spôsobená heterogenitou štruktúry a kryštalografických vlastností. Podľa uvažovaného smeru sa rozlišuje plošná a plastická anizotropia.

- Plastická anizotropia – označovaná tiež ako normálová, vyjadruje nerovnomernosť mechanických vlastností v rovine plechu, vzhľadom k mechanickým vlastnostiam v kolmom smere. Stanovuje sa experimentálne – ťahovou skúškou najčastejšie pre 20 % pomerného predĺženia vzorky. Vplyv plastickej anizotropie je definovaný súčiniteľom plastickej anizotropie  $r_\alpha$ . Index  $\alpha$  označuje smerovú orientáciu vzorky voči smeru valcovania plechu, viď obr. 34. Súčiniteľ  $r_\alpha$  sa počíta podľa vzťahu (4.17).

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_1}}{\ln \frac{s_0}{s_1}}, \quad (4.17)$$

kde:  $r_\alpha$  – súčiniteľ plastickej anizotropie [-],

$\varphi_b$  – logaritmická deformácia v smere šírky vzorky [-],

$\varphi_s$  – logaritmická deformácia v smere hrúbky vzorky [-],

$b_0$  – počiatočná šírka vzorky [mm],

$b_1$  – šírka vzorky po experimente [mm],

$s_0$  – počiatočná hrúbka vzorky [mm],

$s_1$  – hrúbka vzorky po experimente [mm].

Súhrnný vplyv súčiniteľov plastickej anizotropie je vyjadrený váženým priemerom:

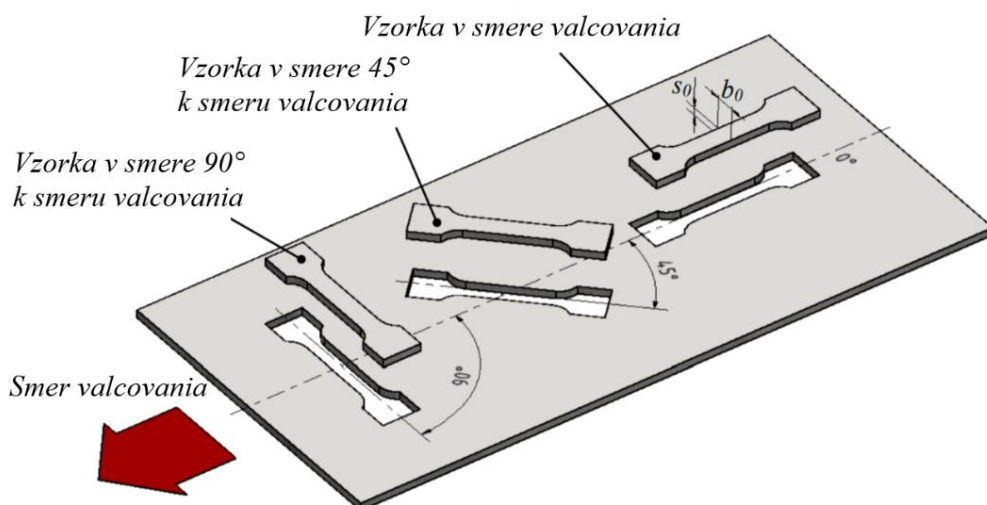
$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4}, \quad (4.18)$$

kde:  $\bar{r}$  – vážený priemer súčiniteľov plastickej anizotropie [-],

$r_0$  – súčiniteľ plastickej anizotropie v smere valcovania plechu [-],

$r_{45}$  – súčiniteľ plastickej anizotropie vzorky odobranej pod uhlom  $45^\circ$  vzhľadom k smeru valcovania plechu [-],

$r_{90}$  – súčiniteľ plastickej anizotropie vzorky odobranej kolmo na smer valcovania plechu [-].



Obr. 34 Spôsob odberu vzoriek pre zisťovanie anizotropie ťahovou skúškou [11]

- Plošná anizotropia – vyjadruje nerovnomernosť mechanických a fyzikálnych vlastností pod rôznymi uhlami vzhľadom k smeru valcovania v rovine plech. Pre jej určenie je používaná ťahová skúška. Hodnota plošnej anizotropie sa potom dopočíta podľa vzťahu (4.19), ktorý sa dá analogicky použiť aj pre ďalšie charakteristiky ako medza pevnosti  $R_m$ , ťažnosť  $A$  apod.

$$a_{R_{p0,2}} = \frac{R_{p0,2}(\alpha^\circ) - R_{p0,2}(0^\circ)}{R_{p0,2}(0^\circ)}, \quad (4.19)$$

kde:  $a_{R_{p0,2}}$  – súčiniteľ plošnej anizotropie [-],

$R_{p0,2}$  – zmluvná medza klzu [MPa],

$\alpha$  - uhol smeru odobranej vzorky vzhľadom k smeru valcovania [°],

0 – uhol smeru odobranej vzorky, zhodný so smerom valcovania [°].

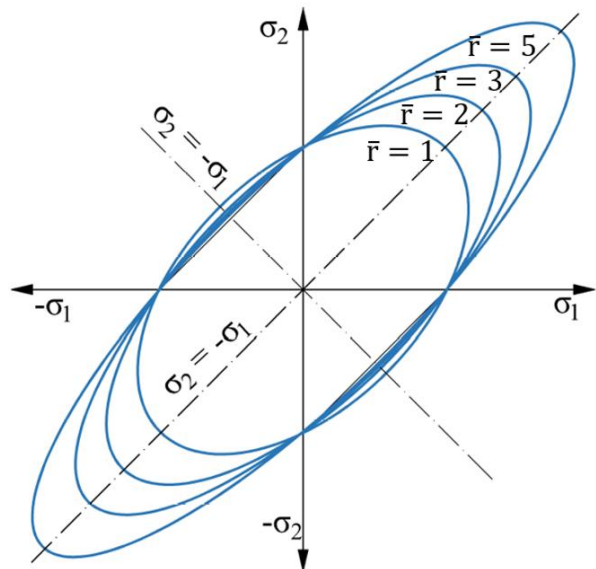
Okrem (4.19) sa používa (často pre numerické simulácie) aj modifikovaná rovnica pre výpočet plošnej anizotropie označená  $\sigma_\alpha$ , ktorá sa počíta nasledovne:

$$\sigma_\alpha = \frac{R_{p0,2}(\alpha^\circ)}{R_{p0,2}(0^\circ)}. \quad (4.20)$$

Anizotropia podstatne vplyva na proces plošného tvárnenia. Z toho dôvodu je potrebné zahrnúť túto vlastnosť aj vo výpočtoch MKP. K tomu sa využívajú najčastejšie tieto materiálové modely:

- Hill 1948,
- Hill 1990,
- Barlat 1989,
- Barlat 1991,
- Barlat 2000,
- Corus-Vegter
- Hosford 1979.

Najpoužívanejším z uvedených materiálových modelov je Hill 1948, ktorý rozširuje použitie podmienky plasticity HMM. Vplyv anizotropie na tento materiálový model je zobrazený na obrázku 35. S rastúcou hodnotou súčiniteľa  $\bar{r}$  teda rastie aj odolnosť materiálu voči stenčovaniu.



Obr. 35 Vplyv anizotropie na podmienku Hill 1948 [52]

#### 4.4 Použitie MKP a softvéry [1, 11, 47, 53, 54]

V súčasnosti je najrozšírenejšou numerickou metódou práve MKP. Preto sa na trhu ponúka viacero výpočtových softvérov, ktoré sa zameriavajú na štrukturálne ale aj neštrukturálne úlohy. Štrukturálne problémy sa riešia s využitím napätovo-deformačnej a vibračnej analýzy, analýzy vzpernej stability apod. Pri neštrukturálnych úlohách sa zase uplatňuje analýza šírenia tepla, prúdenia kvapalín a ďalšie. Z hľadiska oblasti použitia jednotlivých softvérov je možné ich delenie na:

- univerzálne (napr. ANSYS, Abaqus),
- špecializované (napr. FormFEM, Sysweld).



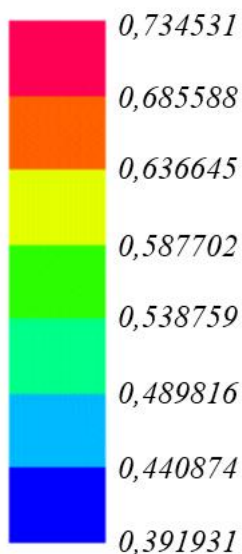
Použitie numerickej simulácie v plošnom tvárnení, prispelo k vývoju špecializovaných softvérov zameraných na túto oblasť, napr. PAM-STAMP, DYNAFORM, AutoForm a iné. Oproti univerzálnym softvérom sú špecializované pre používateľa intuitívnejšie.

Zo všeobecného hľadiska sa analýza plošného tvárnenia robí predovšetkým za účelom získania týchto výstupov:

- priebehy napätia a deformácií tvárneného dielca,
- zmena hrúbky steny dielca,
- veľkosť odpruženia,
- limitné diagramy tváriteľnosti (napr. FLD diagram),
- kritické miesta zaťažovania nástrojov,
- priebeh pôsobiacej sily lisovníku eventuálne pridržovača.

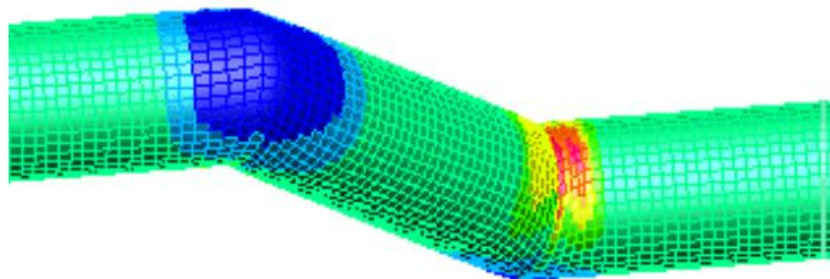
Pre vytvorenie numerickej simulácie v tejto práci bude použitý PAM-STAMP. Ide o softvér od spoločnosti ESI Group, ktorý sa špecializuje na numerickú simuláciu procesov plošného tvárnenia za studena, poloohevu a tepla. Aplikácia PAM-STAMPu pri analýze ohýbania trubiek je zobrazená na obrázku 36. Softvér vo výpočte zahŕňa množstvo javov vplývajúcich na riešenie (napr. kontaktné, materiálové a geometrické nelinearity, anizotropiu), čím sa zvyšuje presnosť výsledkov. Geometrický model sa väčšinou importuje do PAM-STAMPu z CAD softvéru. Analýzou plošného tvárnenia je možné získať všetky z vyššie uvedených výstupov.

*Hrúbka steny [mm]*



*Min = 0,391931*

*Max = 0,734531*



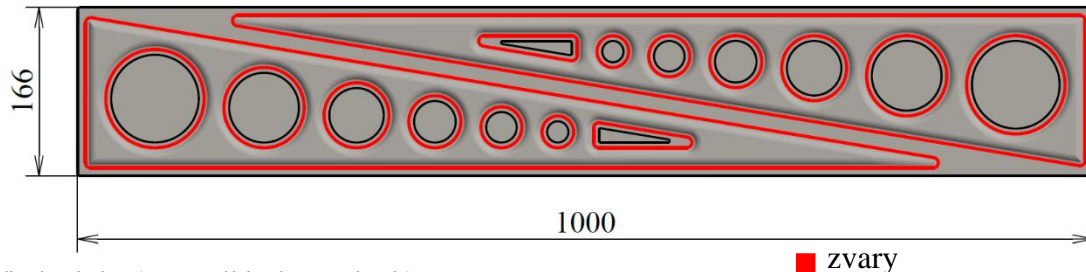
*Obr. 36 Aplikácia PAM-STAMPu pri analýze ohýbania trubiek [54]*



## 5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Riešený dielec je sendvičový panel, tvorený dvomi plechmi s hrúbkou 0,5 mm (tvárnený plech) a 1,5 mm (podkladový plech), viď obr. 37. Oba prístrihy majú rozmery 166 x 1 000 mm. Zaoblenia v rohoch tvárneného dielca a tiež trojuholníkových tvarových prvkov majú hodnotu 5 mm. Materiál polotovaru je oceľ DC01, ktorá je dobre zvariteľná a vhodná pre tvárnenie za studena.

*Pohľad zhora (na tvárnený plech)*



*Pohľad zdola (na podkladový plech)*

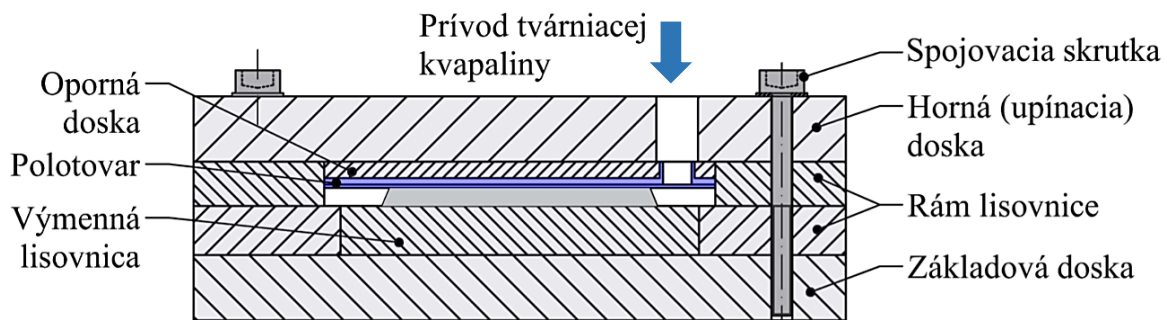


*Obr. 37 Hydroformovaný dielec*

Pre zhotovenie dielca sa využívajú viaceré technológie. Postup výroby sa skladá z nasledujúcich krokov:

1. výroba dvoch plechových prístrihov technológiou rezania laserovým lúčom (rozmery prístrihov: 0,5 x 166 x 1 000 mm a 1,5 x 166 x 1 000 mm),
2. vytvorenie vtokov tvárniacej kvapaliny na podkladovom plechu pomocou termálneho vrtania – metóda Flowdrill,
3. prievarové zváranie laserovým lúčom po obvode dielov a tvarových prvkov (obr. 37),
4. tvárnenie polotovaru v dutine lisovnice – paralelné hydroformovanie.

Operácie využívajúce laserový lúč (rezanie a prievarové zváranie) prebiehali na Ústave prístrojové techniky AV ČR. Termálne vrtanie je technológia umožňujúca výrobu olemovaného otvoru. Takto je možné jednoducho vytvoriť dva vtoky, vďaka ktorým sa obe polovice polotovaru tvárnia samostatne. Dielec počas hydroformovania dosahuje negatívneho tvaru lisovnice, ktorá s ďalšími časťami tvorí lisovací prípravok, znázornený v reze na obrázku 38. Pri tvárnení výlisku môže dochádzať k stenčovaniu steny a prasklinám. Vytvorenie analýz kritických miest a iných určujúcich parametrov (napr. tlak pri porušení, stenčenie) sa robí numerickými simuláciami založenými na MKP.



*Obr. 38 Lisovací prípravok*

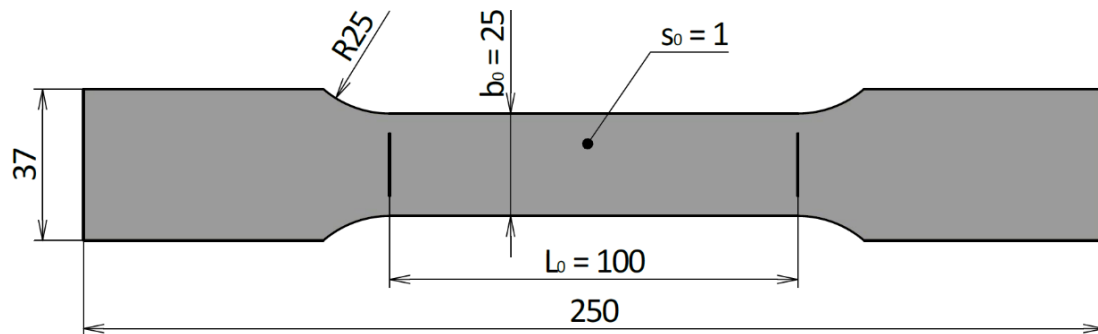
## 5.1 Materiálový model pre numerickú simuláciu [1]

Materiálový model numerickej simulácie má významný vplyv na presnosť riešenia a je dôležité, aby čo najlepšie zohľadňoval chovanie materiálu pri zaťažovaní. K jeho vytvoreniu bola využitá ťahová skúška, ktorá prebehla na hydraulickom skúšobnom stroji ZD40 (obr. 39). Zariadenie je vhodné tiež pre tlakovú skúšku a skúšku ohybom, pričom umožňuje vyvolať zaťaženie až 400 kN. Počas experimentu sa zaznamenáva posuv pričnicka inkrementálnym snímačom polohy s rozlíšením 0,01 mm. Aplikované zaťaženie je merané snímačom sily s presnosťou  $\pm 1\%$ . Stroj je ovládaný riadiacou jednotkou EDC 60, určenou pre riadenie servo-hydraulických skúšobných strojov. Vyhodnotenie skúšky a tiež grafické spracovanie, bolo získané s využitím programu M-TEST v.1.7. Ďalšie informácie o skúšobnom stroji ZD40 sú uvedené v prílohe 1.



Obr. 39 Skúšobný stroj ZD40 [1]

Ťahová skúška do pretrhnutia bola vykonaná na piatich skúšobných telesách vyrobených z materiálu DC01, ktoré boli odobrané v smere valcovania plechu. Ich rozmery a geometria sú zobrazené na obrázku 40. Ide o ploché vzorky s vyznačenou počiatočnou meranou dĺžkou  $L_0 = 100$  mm. Medzi upínacími koncami a skúšobnou dĺžkou je vytvorené prechodové zaoblenie  $R = 25$  mm.



Obr. 40 Geometria a rozmery skúšobného telesa

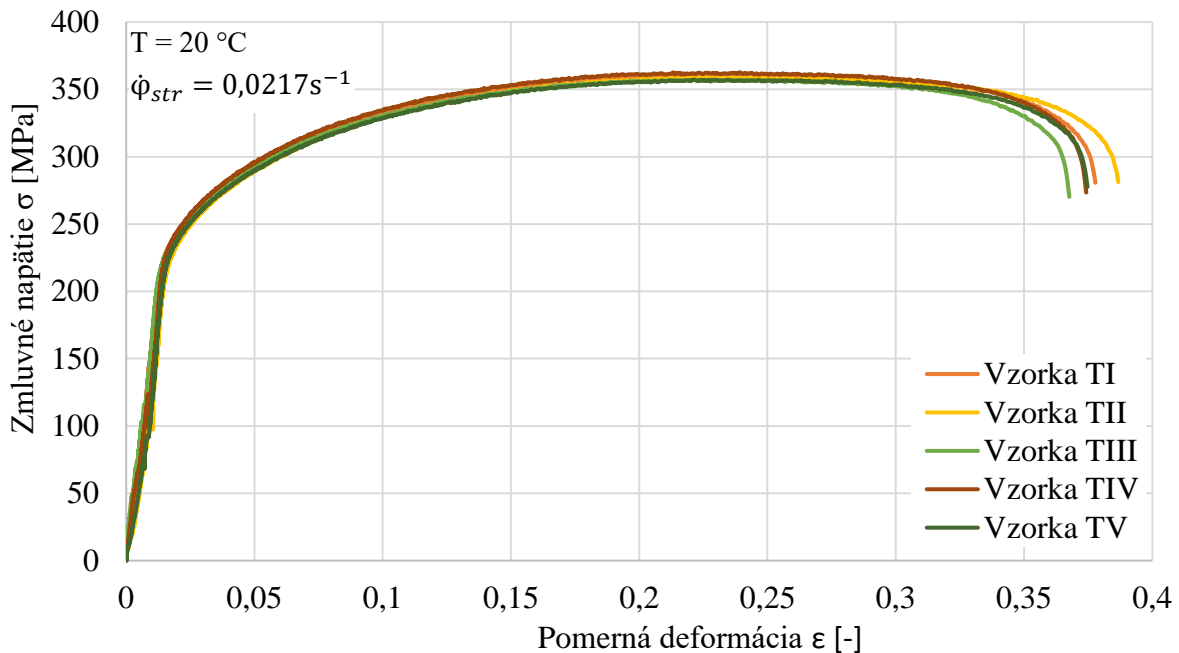
Údaje zadávané do programu M-TEST v.1.7, ktorý vyhodnocoval meranie, sú hodnoty počiatočnej šírky  $b_0$  a hrúbky vzorky  $s_0$  a počiatočná meraná dĺžka. Okrem toho sa definovalo aj predĺženie počiatočnej meranej dĺžky  $L_u$ , merané na pretrhnutom skúšobnom telese.

Pre meranie hrúbky vzorky  $s_0$  bol použitý strmeňový digitálny mikrometer od firmy Mitutoyo s priemerom vretena 6,35 mm. Šírka vzorky  $b_0$  bola zmeraná digitálnym posuvným meradlom EXTOL. Informácie o týchto meracích prístrojoch sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 2 Informácie o použitých meracích prístrojoch.

Merací prístroj	Merací rozsah [mm]	Rozlíšenie [mm]
Mikrometer Mitutoyo	0 až 25	0,001
Posuvné meradlo EXTOL	0 až 150	0,01

Výstupom programu, ktorý spracovával namerané dáta bol záznam, poskytujúci informácie o čase zaťažovania, posuve prierečníka, aplikovanom zaťažení, ťažnosti atď. Z nameraných a vypočítaných hodnôt bola potom vytvorená zmluvná závislosť  $\sigma$ - $\epsilon$ , zobrazená na obr. 41.



Obr. 41 Zmluvný diagram napätie – deformácia oceli DC01 pre vzorky TI až TV

Obrázok 41 zobrazuje zmluvné závislosti pre všetkých päť vzoriek. Odchýlky medzi jednotlivými meraniami sú ovplyvnené viacerými faktormi, napr. heterogenitou materiálu, vlastnou chybou meracích prístrojov apod.

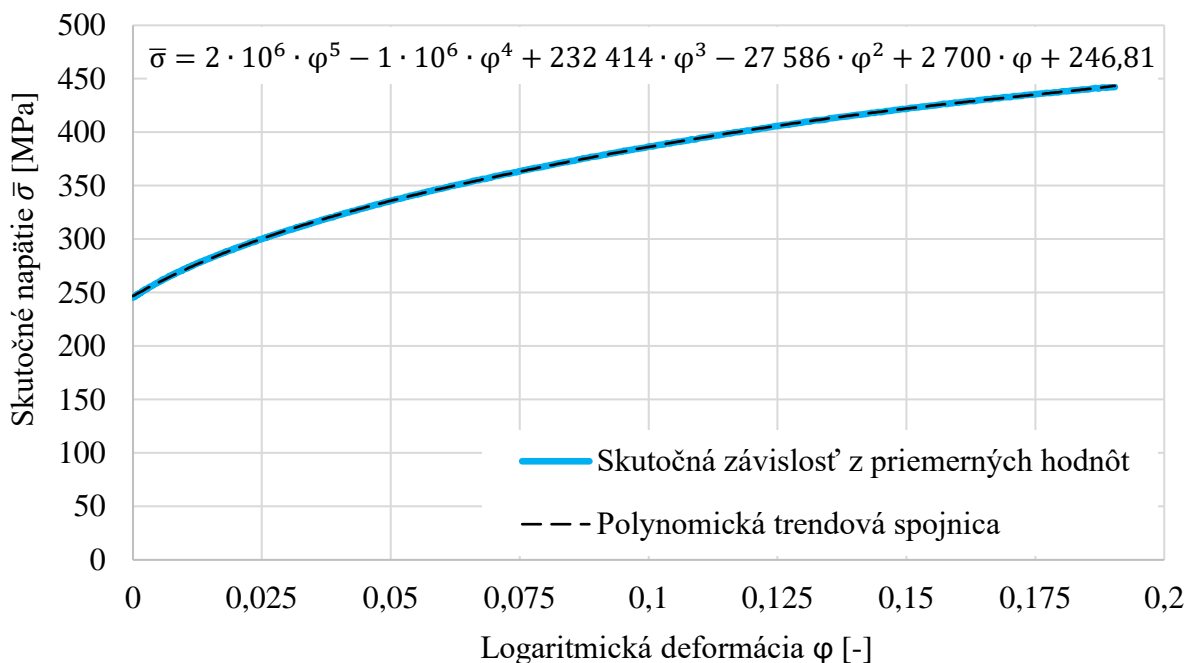
Z diagramu boli potom stanovené napäťové charakteristiky – zmluvná medza klzu  $R_{p0,2}$  a medza pevnosti  $R_m$  a tiež deformačná charakteristika – ťažnosť  $A_{100}$ . Tieto hodnoty spolu so základnými rozmermi vzoriek sú uvedené v tabuľke 3.

Tab. 3 Namerané hodnoty z ťahovej skúšky do pretrhnutia vzorky.

Vzorka	$s_0$ [mm]	$b_0$ [mm]	$L_0$ [mm]	$L_u$ [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{100}$ [%]
TI	0,975	24,94	100	134,5	245,97	360,72	34,5
TII	0,972	24,99	100	135,0	241,60	359,21	35,0
TIII	0,965	24,98	100	134,0	243,84	357,45	34,0
TIV	0,990	24,96	100	135,0	254,25	362,61	35,0
TV	0,991	25,05	100	135,0	240,93	357,01	35,0

Zmluvná závislosť je vhodná len pre malé deformácie, pretože napätie je vzťahované na počiatkový prierez  $S_0$ . Preto sa pre vytvorenie materiálového modelu numerických simulácií, využíva skutočný diagram. Pri meraní nebola zaznamenávaná zmena prierezu vzorky. Hodnoty logaritmickej deformácie a skutočného napätia sú z toho dôvodu vypočítané pomocou prepočtových vzťahov (4.15) a (4.16).

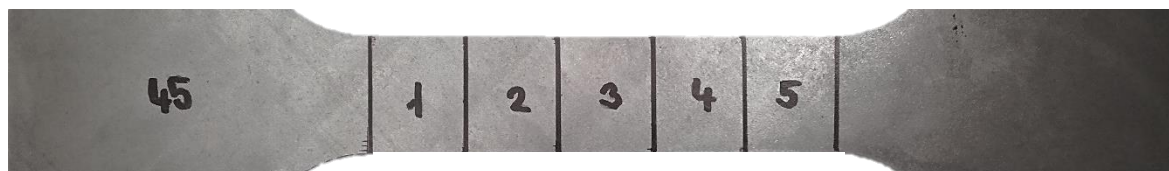
Aby bol materiálový model čo najpresnejší, je skutočný diagram (obr. 42) vytvorený z priemerných hodnôt skutočného napätia a deformácie jednotlivých vzoriek. Zo skutočného diagramu je zrejmé, že zobrazuje oblasť od medze klzu po medzu pevnosti. Získaná krivka spevnenia bola preložená polynomicou trendovou spojnicou 5. stupňa, ktorej matematický zápis je uvedený v obrázku 42.



Obr. 42 Skutočný diagram napätie – deformácia oceli DC01

Okrem zisťovania krivky spevnenia, napät'ových a deformačných charakteristík bola skúmaná aj anizotropia materiálu. Experiment prebehol na 15 vzorkách, tzn. 5 vzoriek pre každý smer vzhľadom k smeru valcovania ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Zaťažovanie trvalo do okamihu, kým pomerné predĺženie nedosiahlo predom nastavenú hodnotu 20 %.

Geometria a rozmery vzorky sú rovnaké ako v prípade ťahovej skúšky do porušenia skúšaného telesa (obr. 40). Rozdiel spočíva v rozdelení oblasti počiatkovej meranej dĺžky na 5 úsekov, vid' obr. 43.



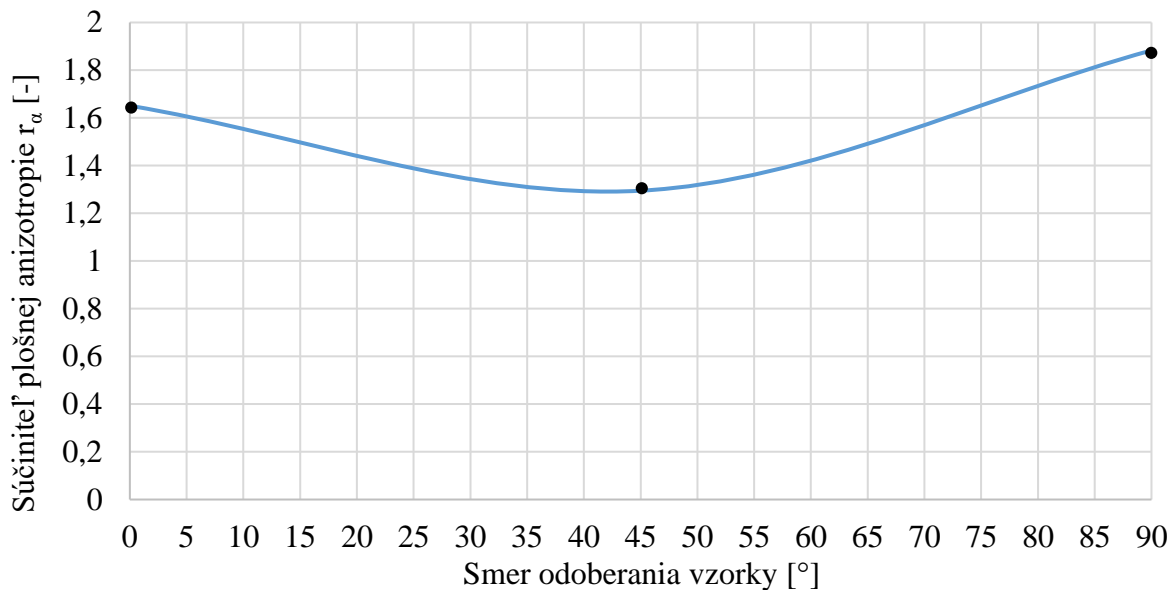
Obr. 43 Skúšobné teleso pre merania anizotropie ťahovou skúškou

Vo vyznačených úsekoch sa zisťovali šírka a hrúbka vzorky pred a po experimente. Hrúbka bola opäť meraná mikrometrom Mitutoyo a šírka posuvným meradlom EXTOL. Kompletne namerané rozmery pred a po skúške sú uvedené v prílohe 2. Tieto údaje sa potom spriemerovali. Priemerné hodnoty pre každú skupinu vzoriek spoločne so súčiniteľmi plastickej a plošnej anizotropie, vypočítanými podľa vzťahov (4.17) a (4.20), sú zhrnuté v tabuľke 4.

Tab. 4 Hodnoty súčiniteľov plastickej anizotropie oceli DC01.

		Smer $0^\circ$	Smer $45^\circ$	Smer $90^\circ$
Pred skúškou	hrúbka $s_0$ [mm]	0,987	0,991	0,977
	šírka $b_0$ [mm]	24,972	25,003	25,012
Po skúške	hrúbka $s_1$ [mm]	0,944	0,936	0,953
	šírka $b_1$ [mm]	22,698	23,004	22,649
Súčinitele plastickej anizotropie $r_\alpha$ [-]		<b>1,651</b>	<b>1,295</b>	<b>1,883</b>
Súčinitele plošnej anizotropie $\sigma_\alpha$ [-]		<b>1,000</b>	<b>1,034</b>	<b>1,022</b>

Súčinitele plastickej anizotropie je tiež možné vyjadriť graficky v závislosti na smere orientácie vzorky. Táto závislosť je zobrazená na obrázku 44.



Obr. 44 Grafická závislosť súčiniteľa plošnej anizotropie na smere odoberania vzorky

Z grafickej závislosti je zrejmé, že súčiniteľ  $r_\alpha$  dosahuje minimum ( $r_{\alpha\min} = 1,295$ ) pri vzorke odobratej pod uhlom  $45^\circ$ . Naopak maximum ( $r_{\alpha\max} = 1,883$ ) nadobúda v smere kolmom na smer valcovania. Stredná hodnota súčiniteľa plastickej anizotropie, vypočítaná podľa vzťahu (4.18) je potom  $\bar{r} = 1,531$ .

Materiálový model bol vytvorený s využitím ESI MAT-WIZARD. Táto nadstavba softvéru PAM-STAMP spracováva vyhodnotené dáta z experimentov pomocou tabuľkového procesoru Microsoft Excel. Jednotlivé výstupy a definovanie materiálového modelu do softvéru sú popísané ďalej.

### 5.1.1 Definovanie elastických a plastických vlastností

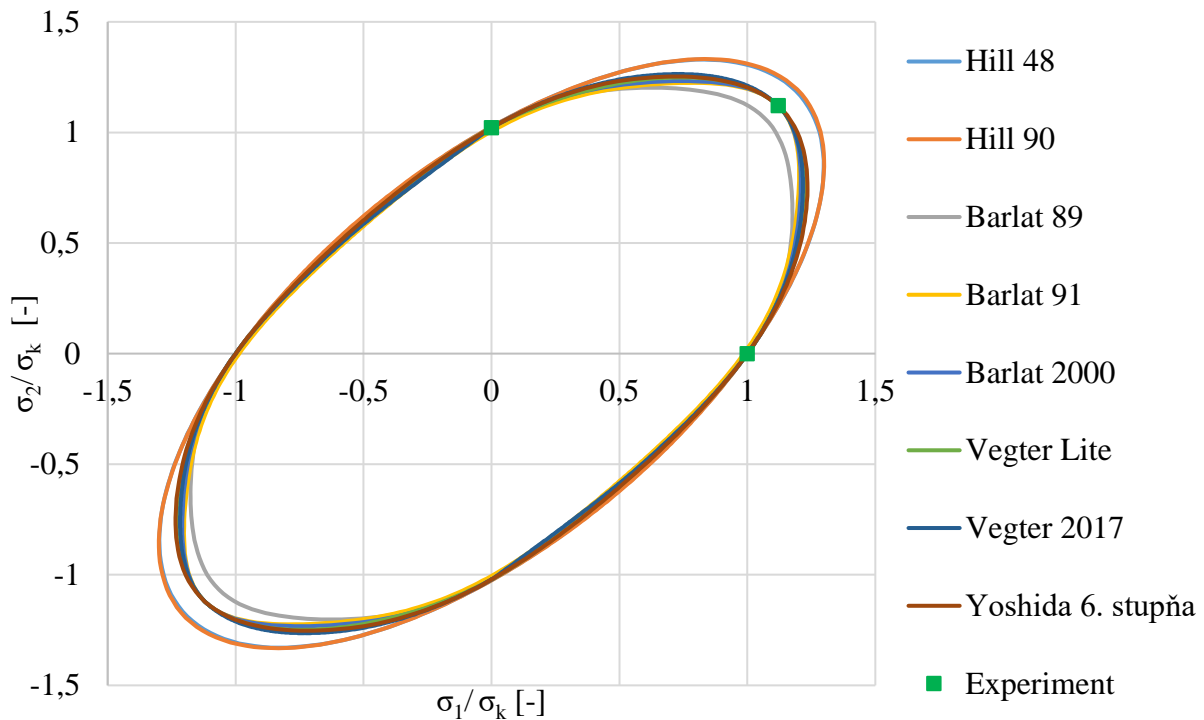
Anizotropný materiálový model je založený na znalosti súčiniteľov plastickej a plošnej anizotropie z tabuľky 4. Okrem nich sú zadávané aj súčinitele anizotropie  $r_b$  a  $\sigma_b$  získané zo skúšky dvojosiť zaťažovaním. Tieto veličiny neboli merané, pre potreby výpočtu sú programom aproximované takto  $r_b = 0,8768$  a  $\sigma_b = 1,1206$ . Ďalšími vstupmi sú tzv. váhové faktory  $w_{ps}$  a  $w_{sh}$  (pre oceľ  $w_{ps} = w_{sh} = 0,666$ ), ktoré ovplyvňujú tvar krivky anizotropnej podmienky plasticity Vegter Lite. Ich hodnota je všeobecne stanovená na základe viacerých experimentov. Posledným zo zadávaných parametrov je exponent  $m$  (pre oceľ  $m = 6$ ), použitý v matematickom vyjadrení Barlat 89, Barlat 91 a Barlat 2000.

Na základe uvedených veličín boli vypočítané anizotropné podmienky plasticity, ktoré sú graficky vyjadrené krivkami na obrázku 45. Tabuľka 5 potom porovnáva presnosť jednotlivých podmienok s experimentálne získanými a aproximovanými hodnotami ( $\sigma_b$ ). Z porovnania je vidieť, že presnosť niektorých modelov sa líši len v rádoch desiatich tisícín %.

Tab. 5 Presnosť anizotropných podmienok plasticity.

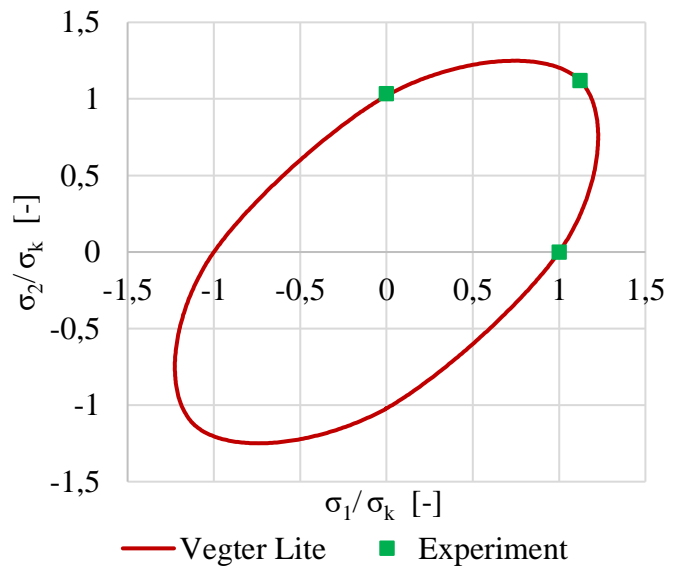
Podmienka plasticity	Presnosť [%]	Podmienka plasticity	Presnosť [%]
Hill 48	90,2125	Barlat 2000	99,9942
Hill 90	83,2063	Vegter Lite	99,9990
Barlat 89	89,4414	Vegter 2017	99,9990
Barlat 91	95,7695	Yoshida	99,9999





Obr. 45 Porovnanie rôznych anizotropných podmienok plasticity pre oceľ DC01

Podmienka Yoshida sa podľa grafického porovnania (obr. 45) a dosiahnutých presností v porovnaní s experimentom (tab. 5), javí ako najlepšia. Problém však nastáva pri jej definovaní. Dôvodom je veľký počet parametrov matematickej formulácie. Pre materiálový model numerickej simulácie riešeného dielca je preto využitá podmienka plasticity Vegter Lite (obr. 46), ktorá dosahuje len o niečo menšiu presnosť než Yoshida. Vegter Lite vyžaduje menší počet definujúcich parametrov, získaných zo skúšok jednoosím ťahom a skúšky rovnomerne dvojsoseho zaťažovania (napr. hydraulická skúška). Podmienka plasticity definuje prechod medzi elastickým a plastickým pretvorením materiálu. Elastické chovanie materiálu sa definuje modulom pružnosti v ťahu a Poissonovým pomerom, ktorých hodnoty pre oceľ DC01 sú  $E = 210\,000$  MPa a  $\mu = 0,3$ . Plastické vlastnosti materiálu sú popísané skutočným diagramom, ktorý bol zadávaný do softvéru bodmi experimentálne získanej závislosti.



Obr. 46 Podmienka plasticity Vegter Lite pre oceľ DC01

### 5.1.2 Predikcia FLC

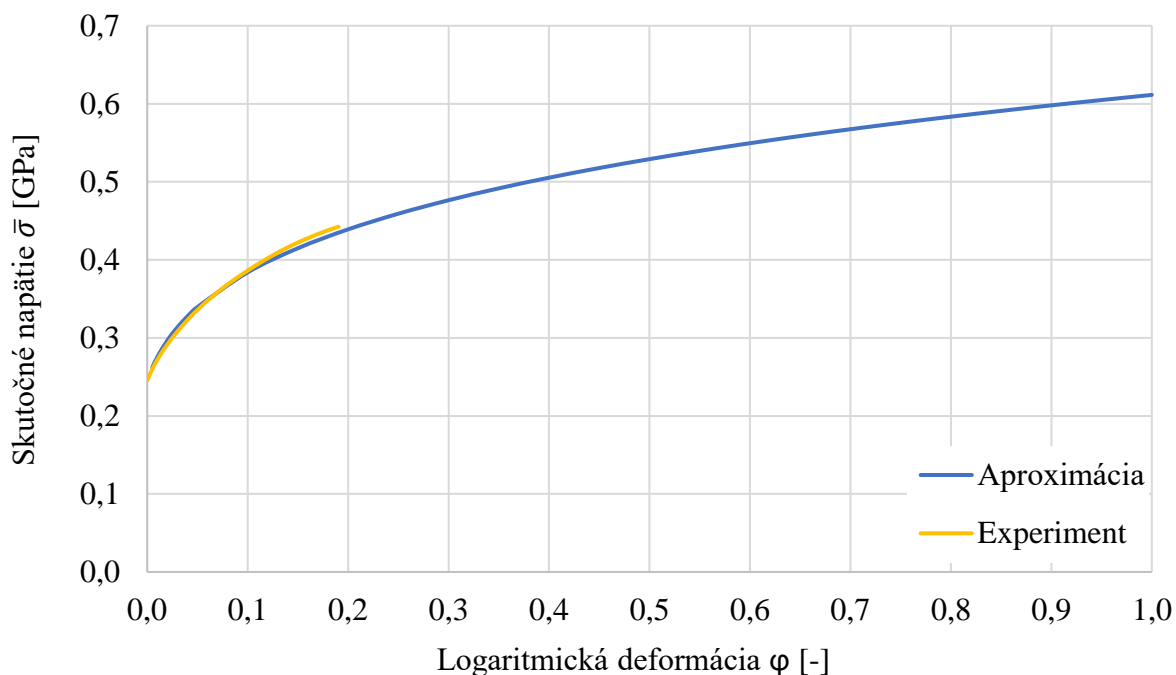
Ďalším z výstupov ESI MAT-WIZARD je predikcia FLC. Získanú krivku je možné použiť pre odhad kritických pretvorení tvárneného dielca. K jej definovaniu sú vyžadované informácie o tvárnenom materiáli a polotovare, uvedené v tabuľke 6. Údaje zo zmluvnej závislosti predstavujú priemerné hodnoty získané vyhodnotením piatich meraní (tab. 3).

Tab. 6 Parametre pre predikciu FLC pomocou ESI MAT-WIZARD pre ocel' DC01.

Parameter	Označenie + jednotka	Hodnota
Hrúbka tvárneného polotovaru	$h_0$ [mm]	0,487
Modul pružnosti v ťahu	$E$ [MPa]	210 000
Zmluvná závislosť $\sigma = f(\epsilon)$		
Hrúbka vzorky pri skúške ťahom	$s_0$ [mm]	0,999
Ťažnosť	$A_{100}$ [%]	34,5
Ťažnosť pri max. zaťažení	$A_g$ [%]	22,0
Pevnosť v ťahu	$R_m$ [MPa]	359,4
Zmluvná medza klzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	245,3
Aproximácia krivky spevnenia podľa tuho-plastického modelu Krupkowsky (Swift)		
Pevnostný koeficient	$K$ [MPa]	609,6
Exponent deformačného spevnenia	$n$ [-]	0,2127
Posun krivky spevnenia	$\varphi_0$ [-]	0,0139

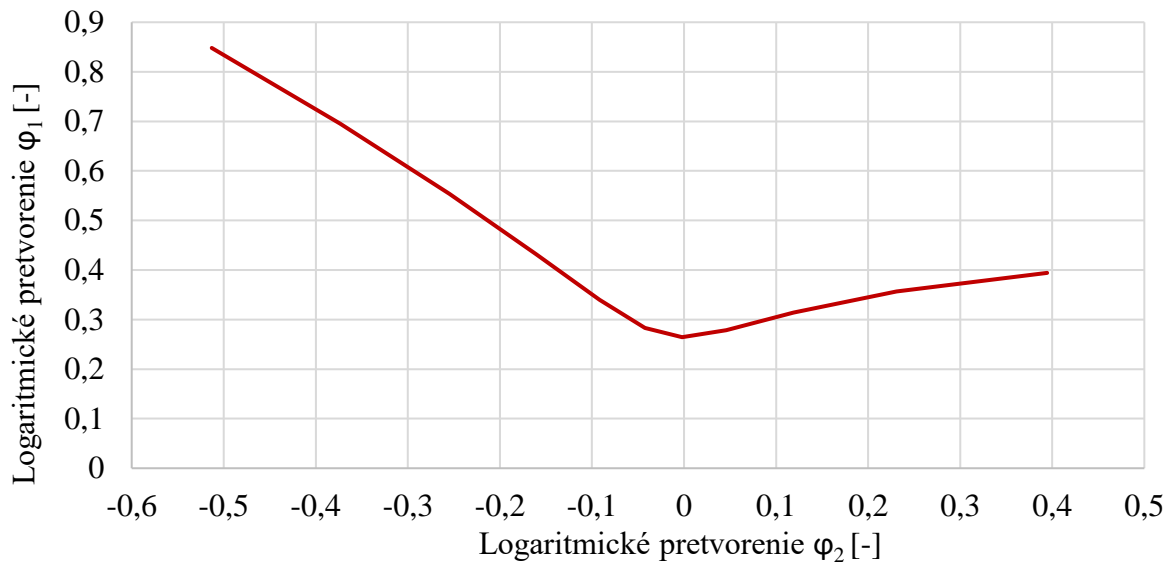
Predikcia FLC je teda založená na hodnotách zo zmluvnej závislosti  $\sigma = f(\epsilon)$  získanej experimentom. Okrem toho sa môže spočítať aj koeficientami matematického vyjadrenia aproximácie krivky spevnenia podľa Krupkowského.

Získanie koeficientov pre Krupkowského tuho-plastický model, vychádza z využitia ďalšej nadstavby softvéru PAM-STAMP a to ESI MCE Tool 1.0, ktorá robí výpočty pomocou tabuľkového procesoru Microsoft Excel. Vstupmi sú medza pevnosti  $R_m$ , zmluvná medza klzu  $R_{p0,2}$  a ťažnosť pri maximálnom zaťažení  $A_g$  (tab. 6). Ďalšia možnosť je zadať body, popisujúce krivku spevnenia získanú experimentálne. V tomto prípade bol použitý prvý variant. Výstupom sú spomínané koeficienty a skutočná závislosť podľa tohto modelu. Obrázok 47 predstavuje porovnanie experimentálne zistenej a aproximovanej krivky spevnenia. Z čoho je možné pozorovať veľmi malé rozdiely závislostí.



Obr. 47 Porovnanie diagramu  $\bar{\sigma} - \varphi$  získaného experimentom a aproximáciou

Po zadání potrebných vstupov z tabuľky 6 do programu ESI MAT-WIZARD, bola vypočítaná predikcia FLC (obr. 48).

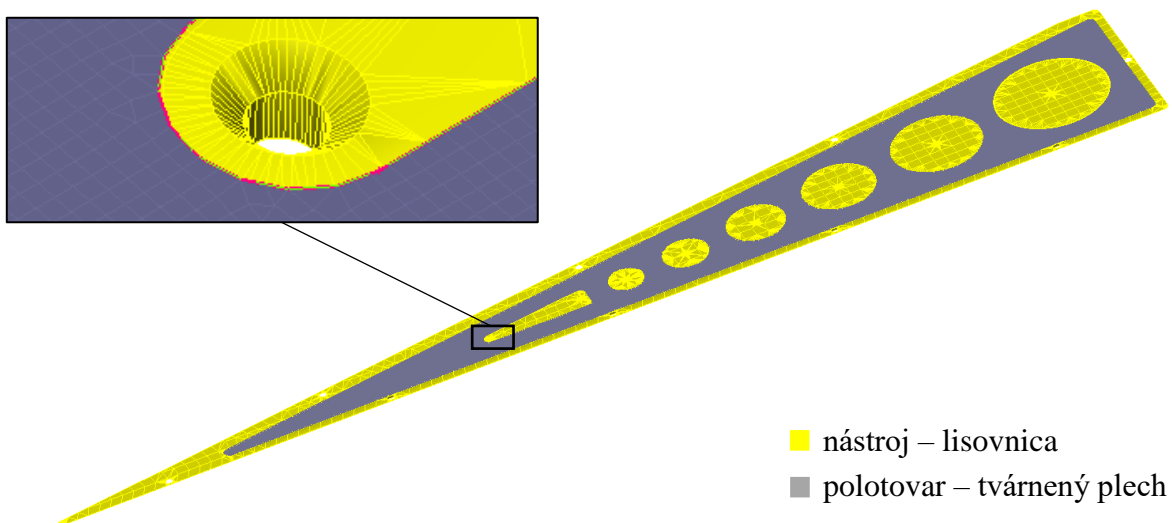


Obr. 48 Predikcia FLC vytvorená pomocou ESI MAT-WIZARD

## 5.2 Numerická simulácia

Numerická simulácia procesu hydroformovania vychádzala z MKP. Samotný výpočet nasleduje po fáze preprocessingu, v ktorej sa okrem materiálového modelu zadáva geometrický model a ďalšie (okrajové podmienky, priebeh zaťažovania apod.).

Geometrický model bol vytváraný v CAD softvéri CATIA V5R20. S ohľadom na výpočtovú náročnosť simulácie v ňom nie sú definované časti, ktoré nemajú vplyv na proces tvárnenia. Z toho dôvodu sa do PAM-STAMPU importoval ako polotovár len tvárnený plech s vyrezanými tvarovými prvkami, vid' obr. 49. Keďže hrúbka skutočného plechu je oproti ostatným rozmerom malá, boli pri tvorbe konečnoprvkovej siete aplikované škupinové prvky s dĺžkou hrany 1 mm. Obrys celého polotovaru vrátane obvodu tvarových prvkov (miesta zvarov) sa potom zafixovali. Nástroj bol definovaný modelom tvoreným plochami povrchu lisovnice, za predpokladu ideálne tuhého telesa. Zaoblenie hrán lisovnice bolo nastavené na hodnotu  $R = 2$  mm. Použitý model zaťažovania bol lineárny a tvárniaci tlak rovnomerne narastal z 0 na 8,6 MPa. Vplyv trenia medzi lisovnicou a polotovarom sa vyjadril súčiniteľom trenia hodnotou 0,1.



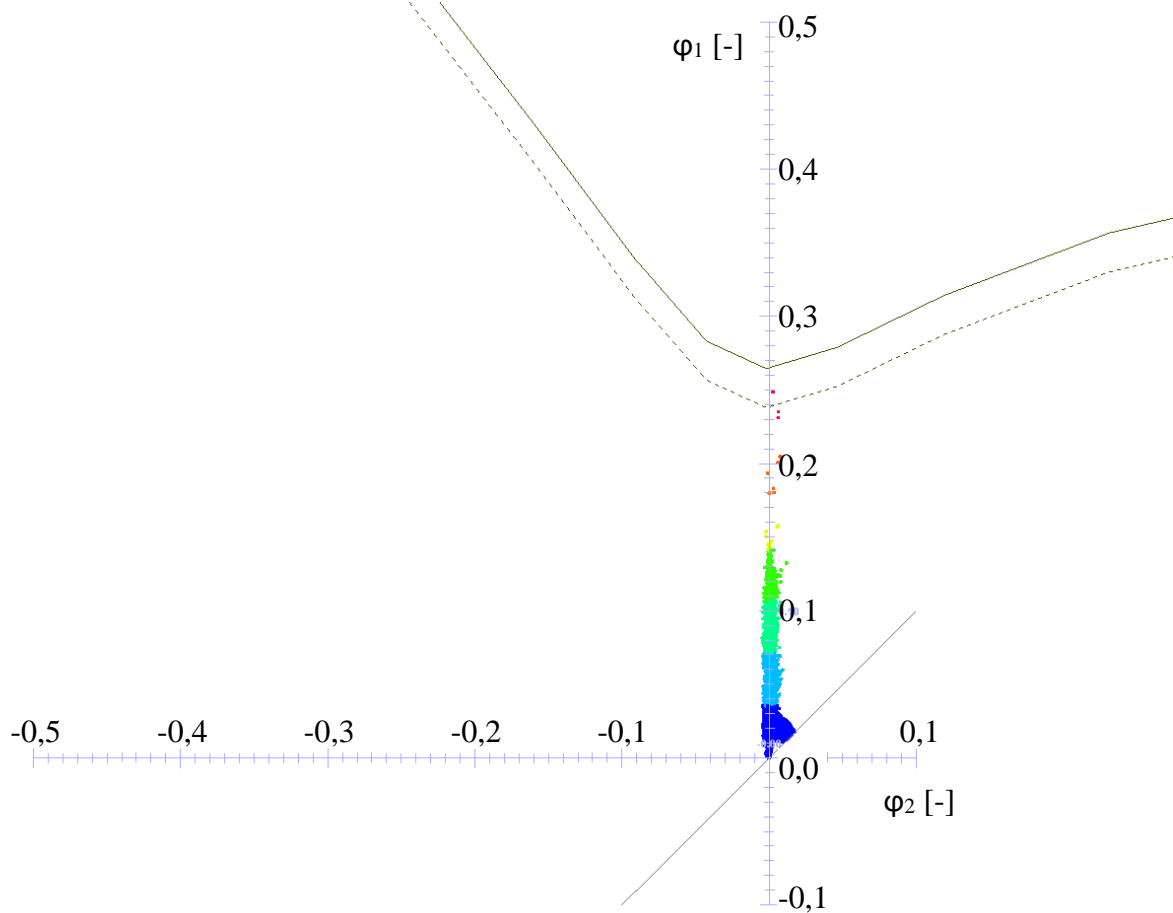
Obr. 49 Geometrický model nástroja a polotovaru



Uvedené podmienky a definície sú základom pre vytvorenie numerickej simulácie procesu hydroformovania riešeného dielca. Potom ako bolo zadané všetko potrebné do softvéru PAM-STAMP, prebehol výpočet.

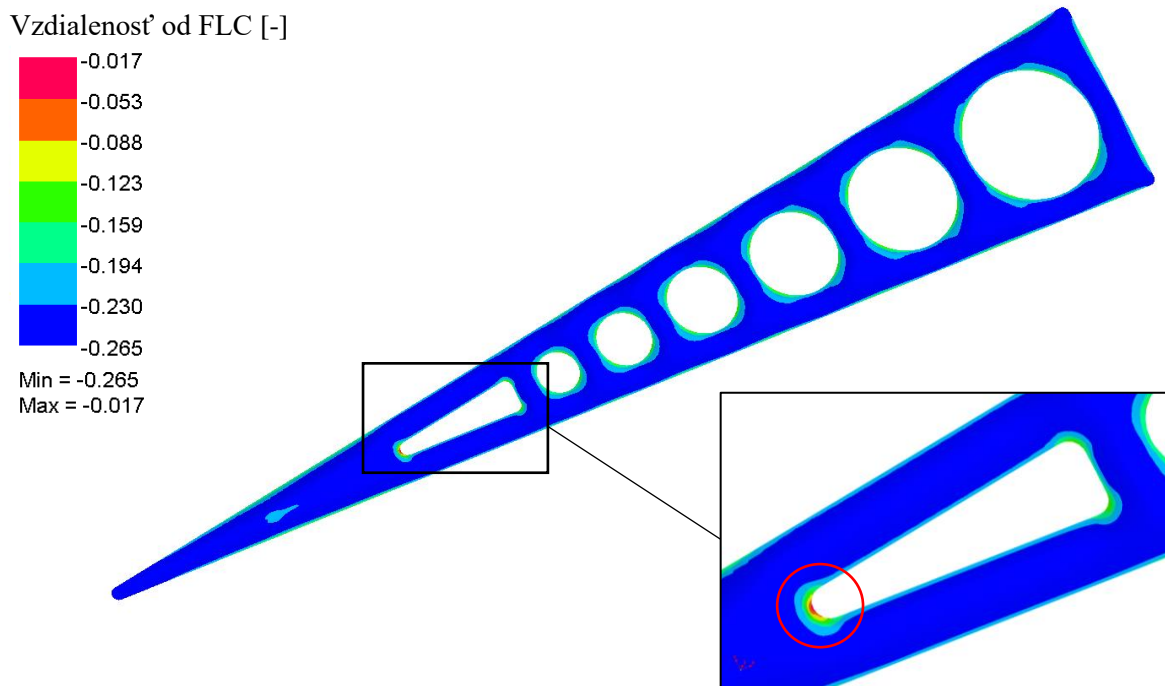
Pri vyhodnocovaní numerickej simulácie vytvorenej s využitím MKP, bol posudzovaný vznik defektov na základe FLD K-G typu. Kontrolou výpočtových krokov sa zistilo, že k porušeniu dôjde skôr, než pri prednastavenom maximálnom tvárniacom tlaku 8,6 MPa. Kritická hodnota tlaku  $p_{krit}$  je podľa výsledkov simulácie 6,36 MPa. Ďalej uvedené výstupy zobrazujú stav dielca v okamihu dosiahnutia pretvoreni zasahujúcich do kritickej oblasti FLD.

FLD na obrázku 50 zobrazuje hodnoty hlavných a vedľajších logaritmických pretvorení  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  tvárneného plechu. Podľa rozmiestnenia vnesených bodov možno konštatovať, že pri tvárnení dominuje rovnomerné pretvorenie.



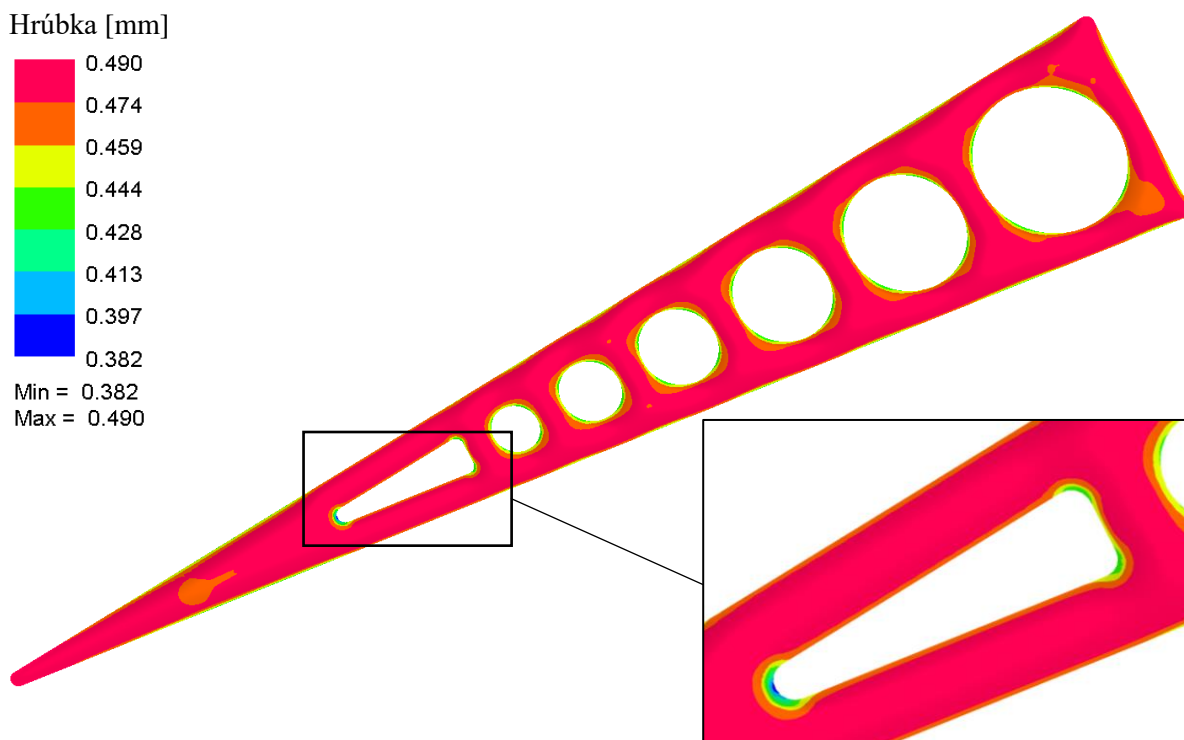
Obr. 50 Analýza porušenia tvárneného plechu pomocou FLD

Na obrázku 51 sú farebne odlišené elementy tvárneného plechu na základe polohy v FLD (obr. 50). Stupnica udáva intervaly vzdialeností bodu v diagrame od krivky medznej tvárniteľnosti. Kladné hodnoty na stupnici dosahujú elementy, u ktorých dochádza ku kritickým a neprípustným deformáciám (sú zvýraznené oranžovou a červenou farbou). Záporné hodnoty predstavujú bezpečné pretvorenie. Z toho vyplýva, že čím je kladná hodnota vyššia, tým je bod vyššie nad FLC resp. u záporných hodnôt, čím je hodnota nižšia tým je bod nižšie pod FLC. Obrázok 51 tiež zobrazuje detail miesta, kde podľa výsledkov simulácie dochádza ku kritickým pretvoreniam.



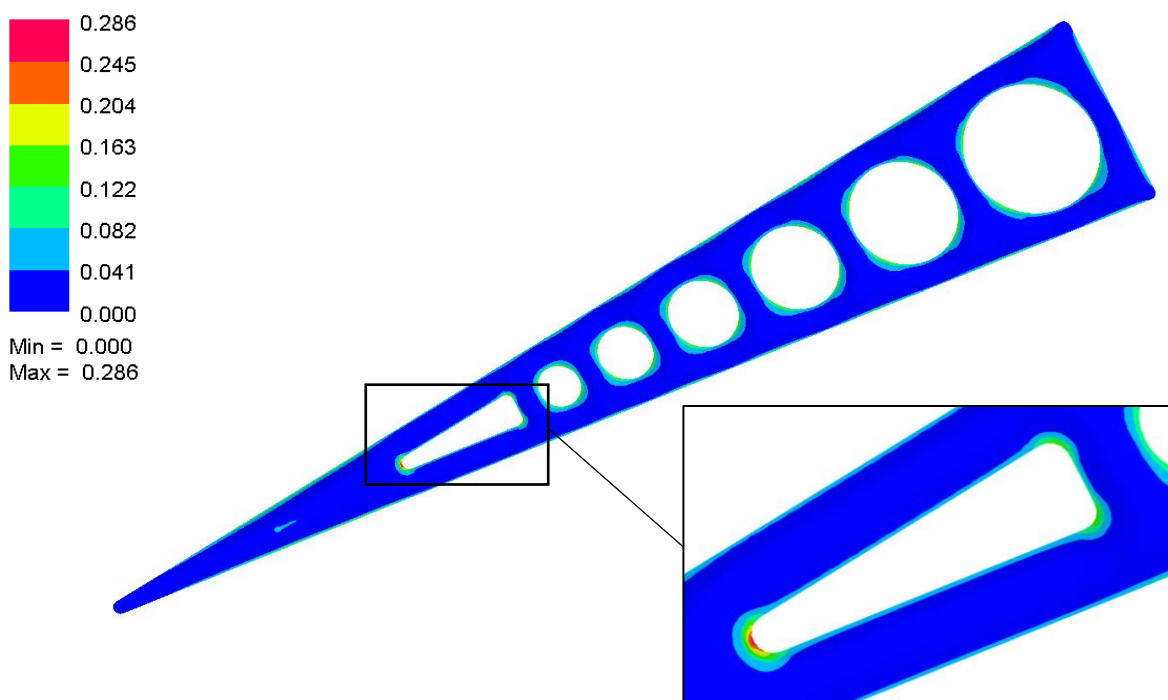
Obr. 51 Kritické miesta výlisku podľa vzdialenosti bodu v FLD od FLC

Výsledky simulácie ďalej poskytujú informácie o rozložení hrúbky steny polotovaru (obr. 52). Výrazné stenčenie polotovaru je predovšetkým v miestach tvarových prvkov a po obvode polotovaru. Tento fakt dokazuje aj rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia, vid' obr. 53. Hrúbka plechu v kritických miestach je 0,382 mm. Oproti počiatkovej hrúbke to dáva rozdiel 0,105 mm. Toto nadmerné stenčenie vedie strate plastickej stability – vzniku trhliny.



Obr. 52 Rozloženie hrúbky steny tvárneného plechu

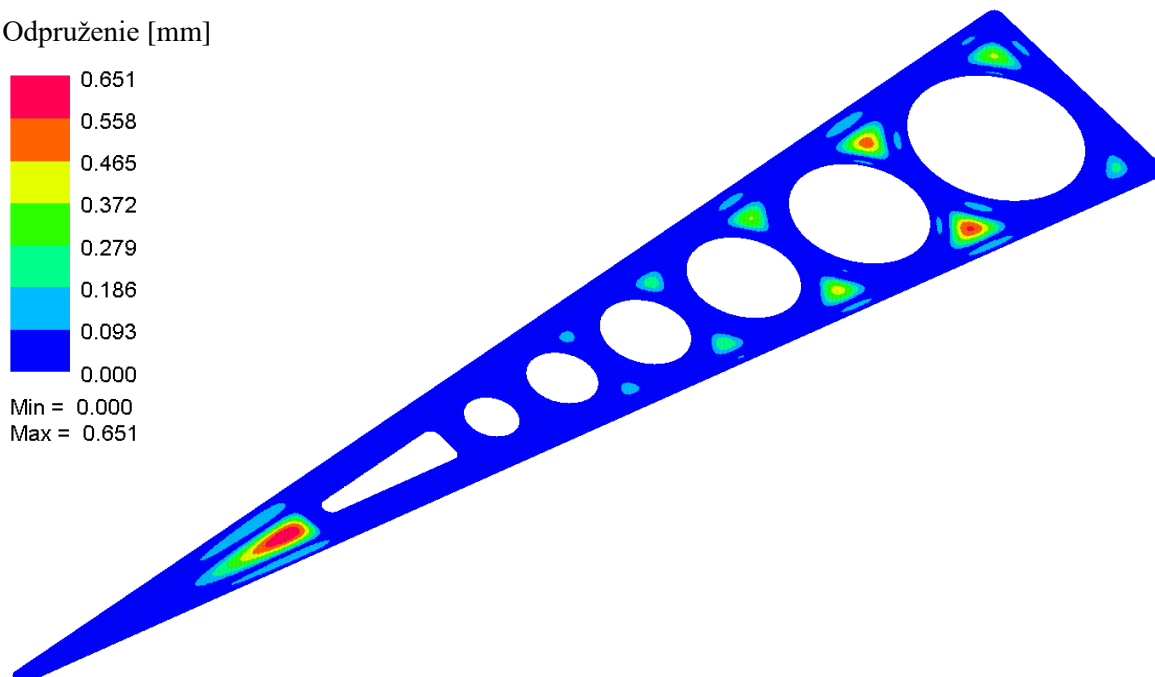
Efektívne plastické pretvorenie [-]



Obr. 53 Rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia

Medzi vady v technológii plošného tvárnenia patrí odpruženie. Ide o geometrickú vadu, ktorá sa prejavuje deformáciou materiálu po odľahčení pôsobiaceho zaťaženia. Aby bolo možné toto kompenzovať, je nutná predikcia miesta odpruženia a taktiež jeho veľkosť. Vypočítané odpruženie riešeného dielca pomocou softvéru PAM-STAMP ukazuje obrázok 54. Zobrazený stav je po odľahčení najväčšieho aplikovaného zaťaženia 8,6 MPa. Maximálna hodnota v niektorých miestach dosahuje 0,651 mm.

Odpruženie [mm]

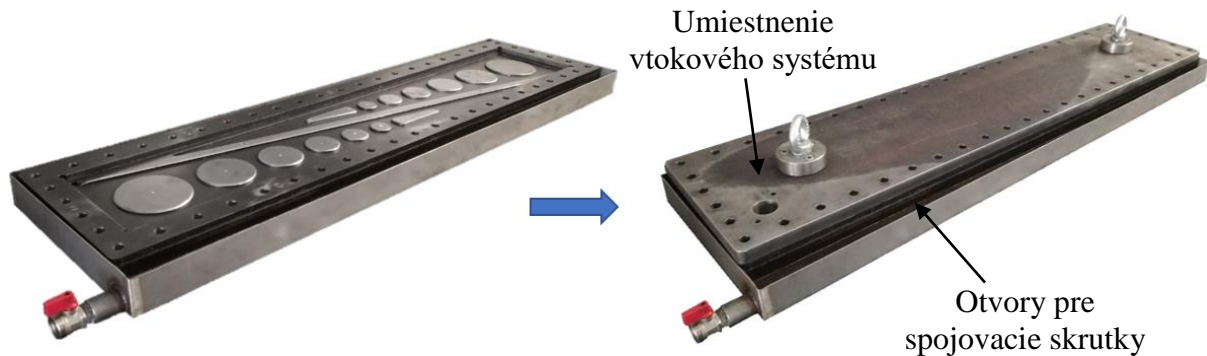


Obr. 54 Odpruženie výlisku po odľahčení aplikovaného zaťaženia

### 5.3 Verifikácia numerickej simulácie – experiment [11]

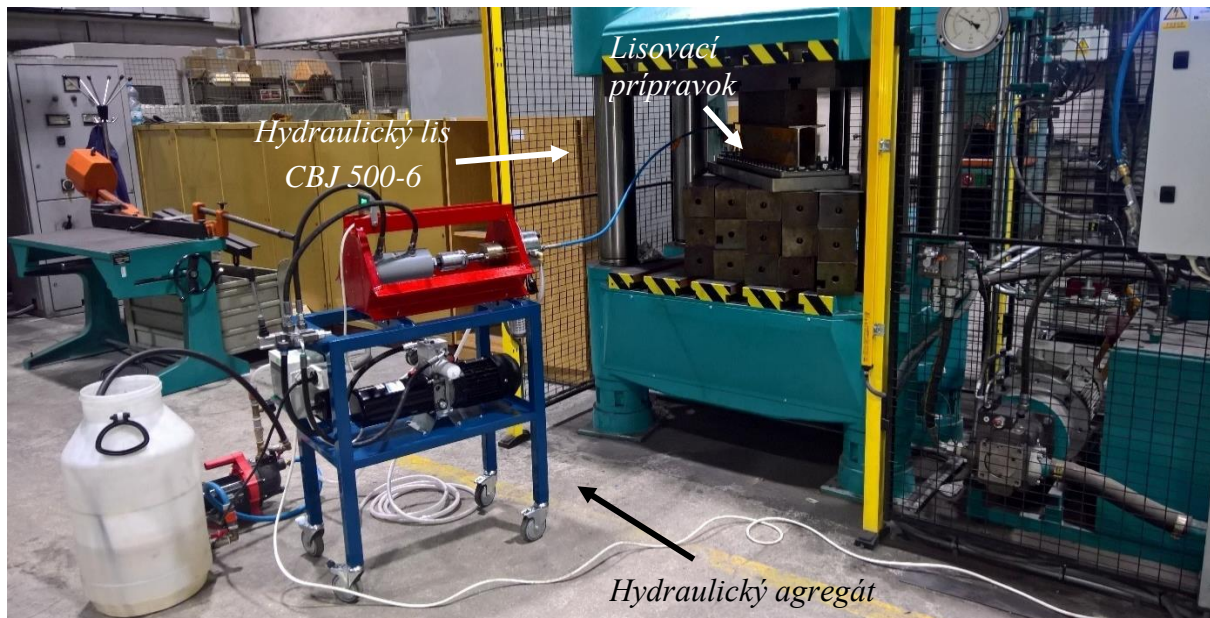
Overenie numerickej simulácie je možné viacerými spôsobmi. Najlepším variantom je porovnanie výsledkov s hodnotami, ktoré boli získané experimentálnou cestou. V ďalšej časti je preto bližšie popísaný proces výroby riešeného dielca a vyhodnotenie experimentu.

Základom lisovacieho prípravku (obr. 55) pre technológiu hydroformovania je lisovnica. Po založení zvarového polotovaru do požadovanej polohy, je naň uložená oporná doska. Následne sa založí horná doska lisovacieho prípravku a celok sa po obvode spojí pomocou skrutiek. Prívod tvárniacej kvapaliny je riešený otvormi v opornej a hornej doske a v polotovare. Závesné oká umožňujú jednoduchšiu manipuláciu s prípravkom. Materiál lisovacieho prípravku je oceľ E335 (ČSN 41 1600)



Obr. 55 Lisovací prípravok

Vysokého tlaku tvárniaceho média sa dosahuje pomocou hydraulického agregátu. Ak by bol lisovací prípravok počas hydroformovania voľne uložený, mohlo by dôjsť vplyvom tohto tlaku k jeho deformácii. Z toho dôvodu je zovretý hydraulickým lisom CBJ 500-6, ktorý plní funkciu vystuženia. Nakoľko použitý lis nemá dostatočný zdvih, je nutné vypodloženie lisovacieho prípravku. Potrebné zariadenie použité pri hydroformovaní riešeného dielca je uvedené na obrázku 56.

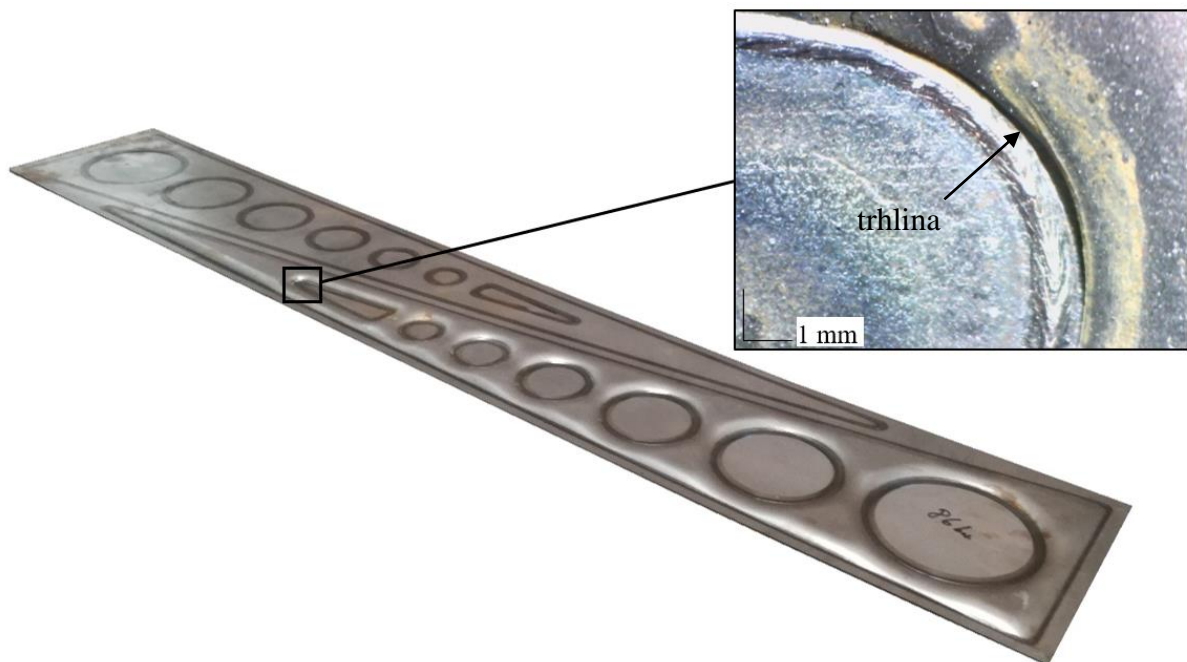


Obr. 56 Zariadenie potrebné pre paralelné hydroformovanie riešeného dielca

Overenie výsledkov numerickej simulácie je možné porovnaním viacerých ukazovateľov. Jedným z nich je tvárniaci tlak  $p_{krit}$  spôsobujúci poškodenie dielca. U reálneho procesu hydroformovania vznikla trhlina pri tlaku 8,6 MPa. K tomu došlo na rozhraní zvar – tvárnený

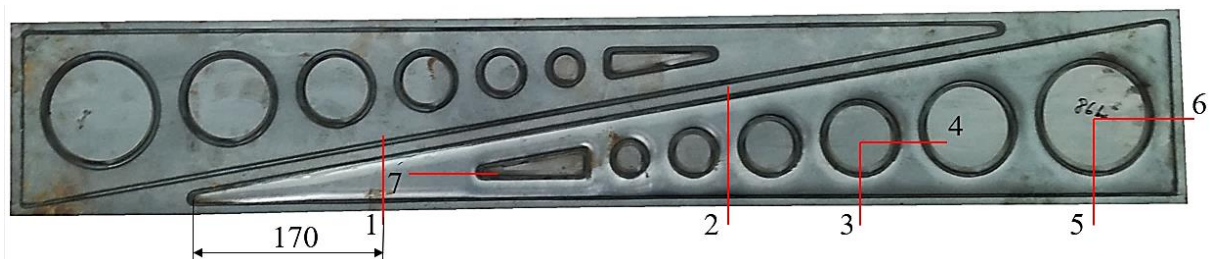


materiál, vid' obr. 57. Zobrazený detail bol skúmaný stereo mikroskopom SSM-3EC2 od firmy Schut a predstavuje zväčšenie 41,2x. Je zjavné, že kritické miesto sa zhoduje so simuláciou. Výpočtom pomocou MKP bol zistený kritický tlak 6,36 MPa. Z porovnania týchto hodnôt vyplýva percentuálny rozdiel 26,0 %, čo je za hranicou technickej prijateľnosti.



Obr. 57 Porušenie hydroformovaného dielca

Ďalším kritériom pre overenie správnosti numerickej simulácie je zmena hrúbky dielca po hydroformovaní. Za týmto účelom bolo vytvorených niekoľko rezov volených tak, aby boli postihnuté oblasti s rôznymi stupňami pretvorenia. Vyrobený dielec s naznačeným umiestnením rezov je na obrázku 58.



Obr. 58 Hydroformovaný dielec s vyznačenými miestami rezov

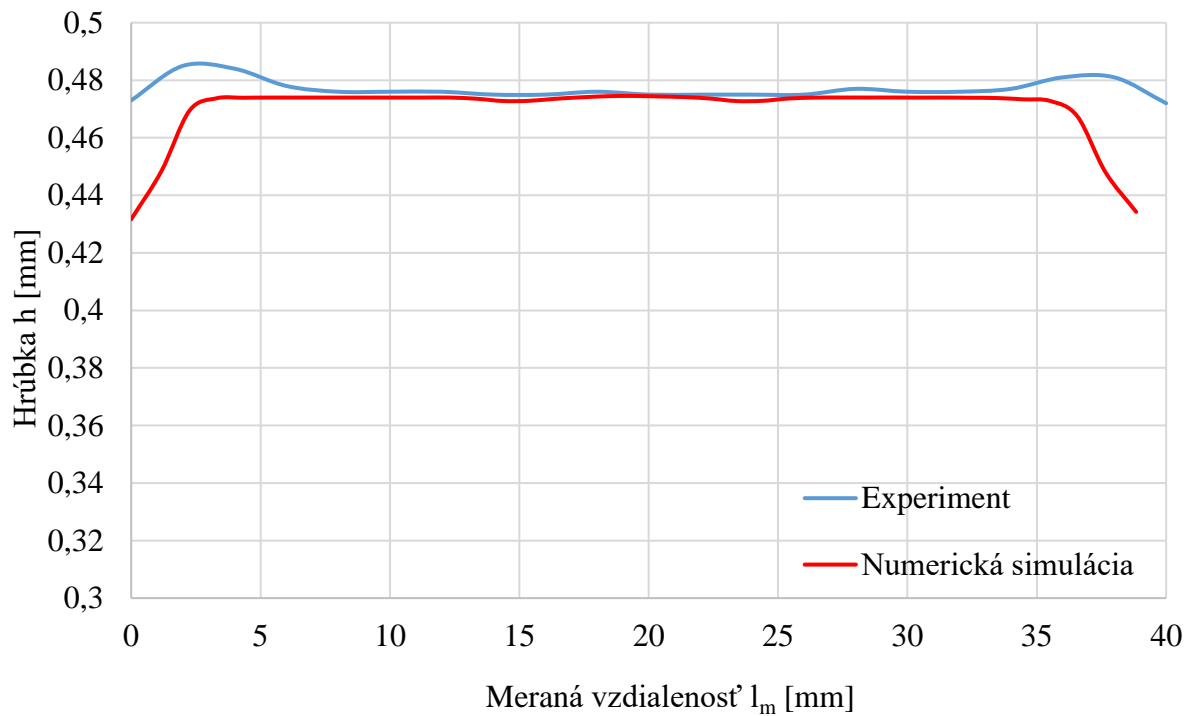
Tvárný plech mal pred experimentom hrúbku 0,487 mm. Po hydroformovaní a rozrezaní dielca sa zmenila hrúbka v skúmaných miestach každé 2 mm, čím sa dostatočne postihol celý priebeh. K tomu bol použitý hrotový digitálny mikrometer Mitutoyo. Bližšie informácie o tomto prístroji sú zhrnuté v tabuľke 7.

Tab. 7 Informácie o hrotovom digitálnom mikrometre Mitutoyo.

Vlastnosť	Hodnota	Jednotky
Merací rozsah	0 až 25	mm
Rozlíšenie	0,001	mm
Meracia sila	3 až 8	N

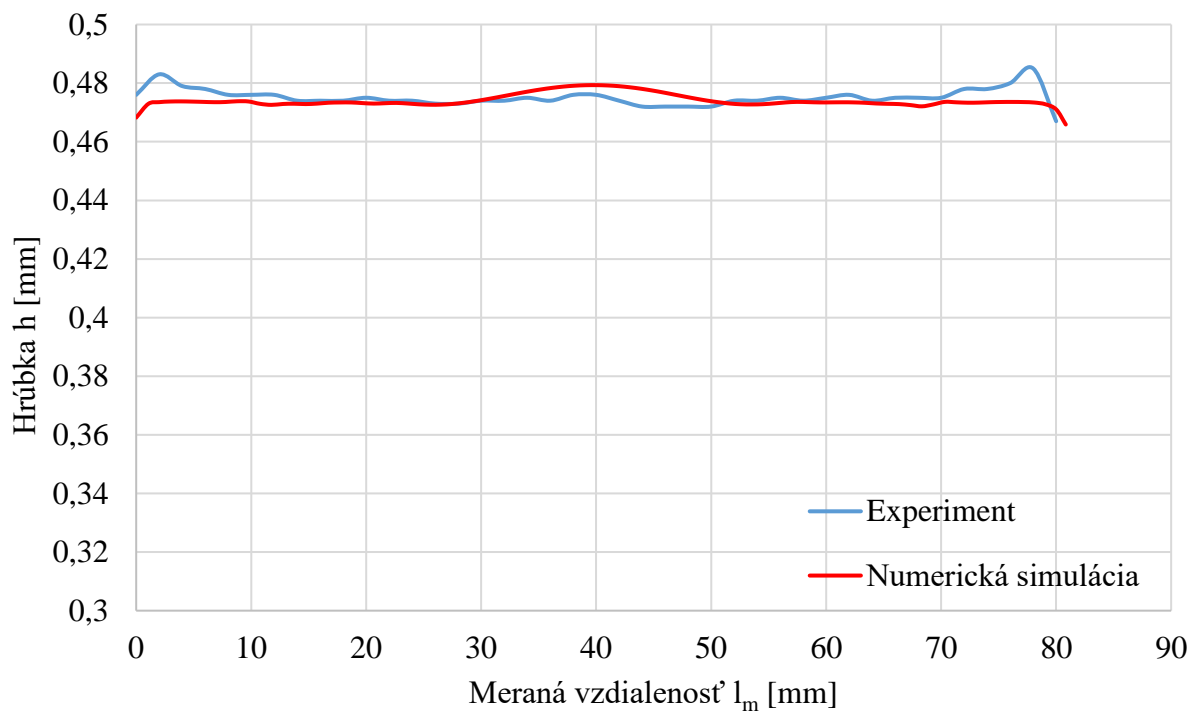
Porovnané dáta zo simulácie sú z posledného výpočtového kroku, kde bol dosiahnutý tlak 8,6 MPa. Tieto aj experimentálne získané hodnoty boli spracované tabuľkovým procesorom Microsoft Excel, čoho výstupom sú ďalej uvedené grafy.

Zmenu hrúbky plechu po tvárnení v mieste 1 ukazuje obrázok 59. Z porovnania je vidieť nesúlad predovšetkým v krajných bodoch vzorky. Percentuálny rozdiel, v mieste s najväčšou odchýlkou (v počiatku meranej vzdialenosti) predstavuje 8,7 %.



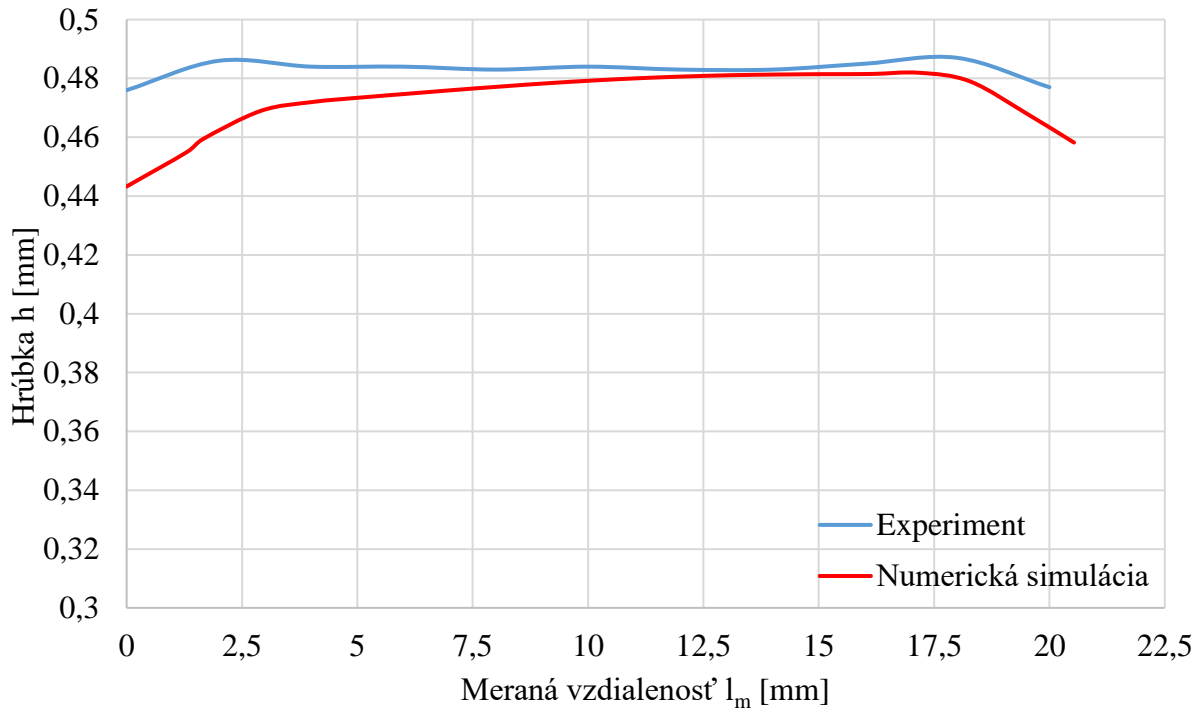
Obr. 59 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 1

Obrázok 60 ukazuje porovnanie pre zmeny hrúbky plechu v mieste 2. V tomto mieste sa výsledky numerickej simulácie a experimentu zhodujú viac ako v predošlom prípade. Maximálny percentuálny rozdiel je len 2,5 % v meranej vzdialenosti 78 mm.



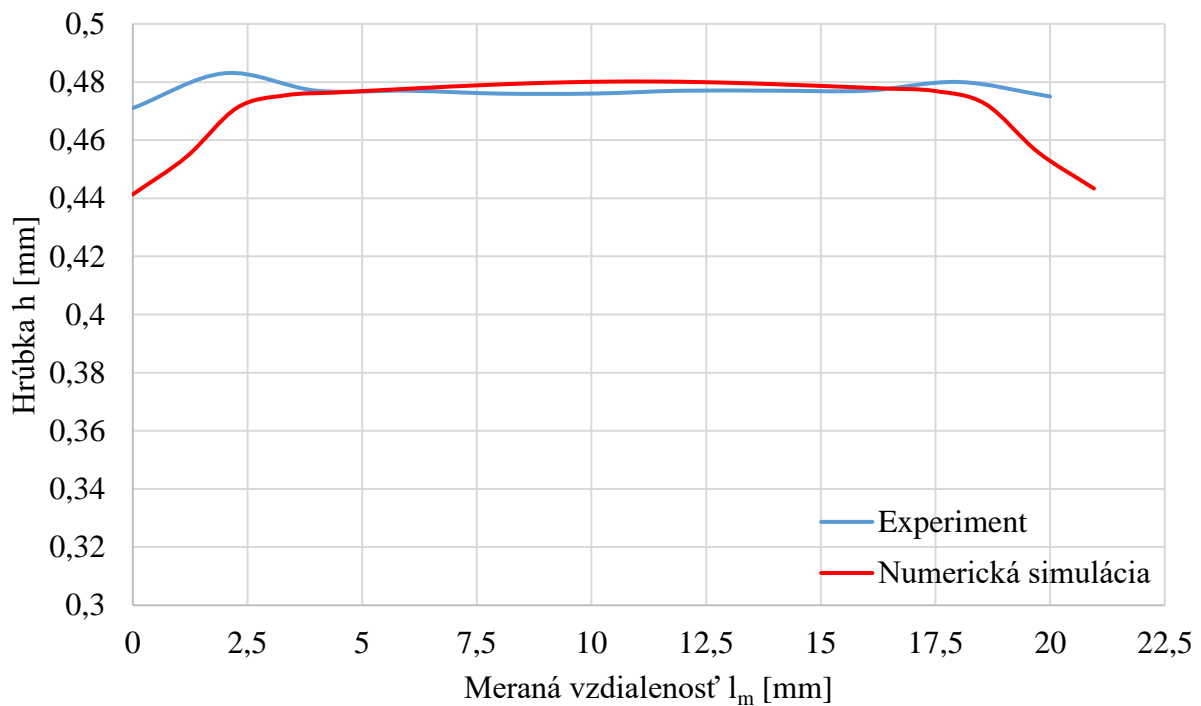
Obr. 60 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 2

Pre miesto 3 je priebeh meniacej sa hrúbky zobrazený na obrázku 61. Porovnanie vykazuje najväčší rozdiel v krajnom bode merania a to 6,9 %. Hrúbka získaná simuláciou v tomto prípade dosahuje v celom priebehu nižšie hodnoty než experiment.



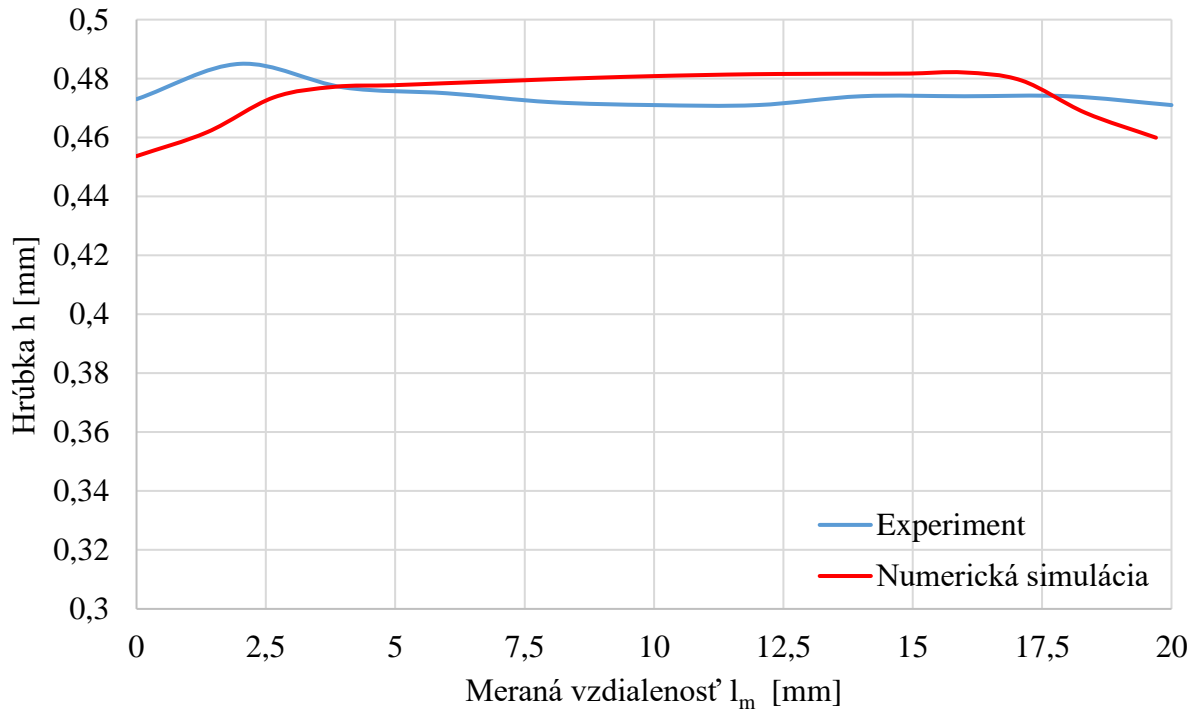
Obr. 61 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 3

Obrázok 62 porovnáva výsledky v mieste 4. Toto miesto je voči predchádzajúcim orientované v kolmom smere. Rozdiel v počiatočnom bode merania vykazuje maximálnu odchýlku oproti simulácii 6,4 %.



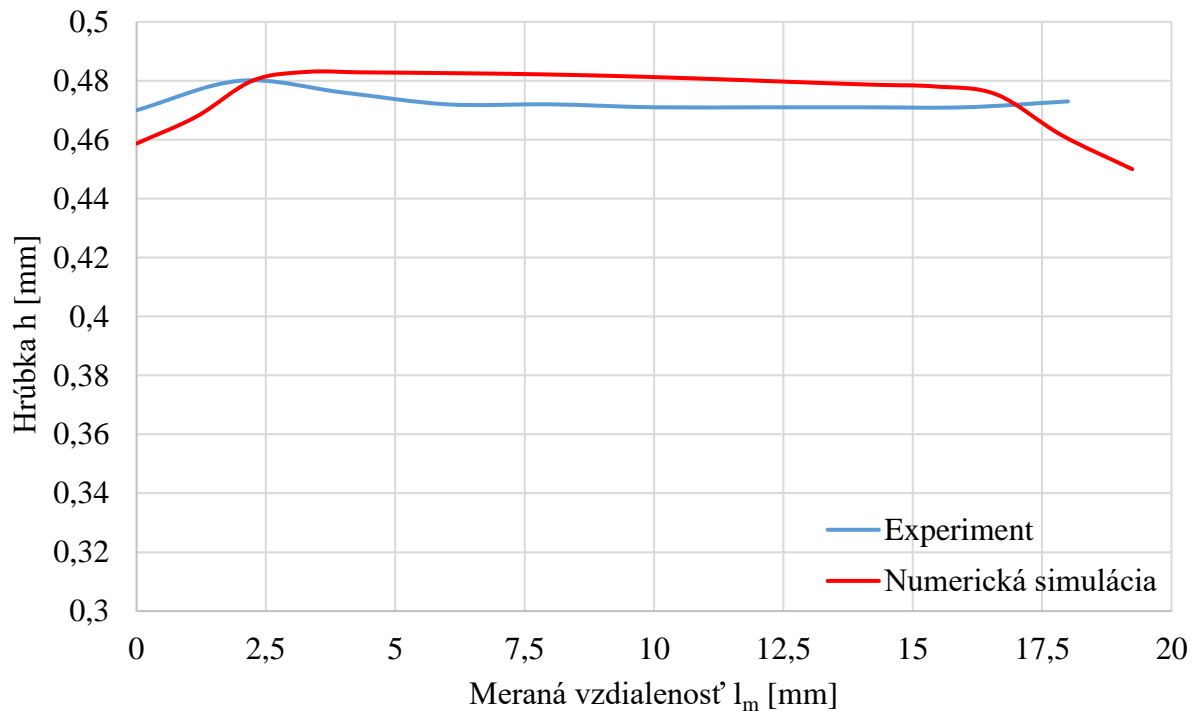
Obr. 62 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 4

Stenčenie tvárneného plechu v mieste 5 je možné určiť z obrázku 63. Na tomto kontrolovanom úseku bol zistený najväčší percentuálny rozdiel medzi nameranými a vypočítanými hodnotami 4,0 % v počiatku meranej vzdialenosti.



Obr. 63 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 5

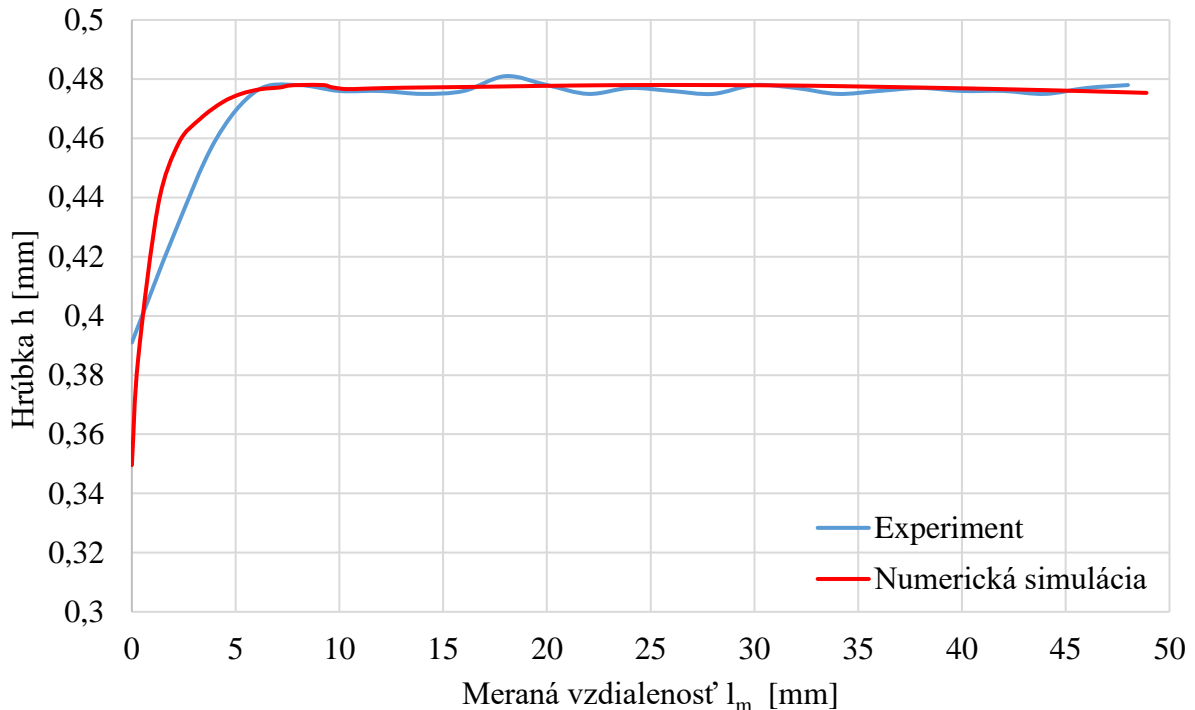
Miesto 6 (obr. 64) leží opäť v kolmom smere. Maximálny percentuálny rozdiel je v počiatočnom bode a jeho veľkosť je 2,3 %. Aj keď je maximálna odchýlka malá, simulácia vykazuje výraznejšie rozdiely v celom priebehu.



Obr. 64 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 6



Vyhodnotením simulácie bolo zistené kritické miesto 7, ktoré bolo následne taktiež zaradené do porovnania. Obrázok 65 dokazuje, že stenčenie v okolí zvaru v tomto mieste je veľké. Podľa merania sa hrúbka steny dielu zmenší o 19,7 %. Simulácia pritom vykazuje ešte väčšie stenčenie a to o 28,2 %. Percentuálny rozdiel je potom 10,6 %, čo znamená, že výsledok je na hranici technickej prijateľnosti.



Obr. 65 Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 7

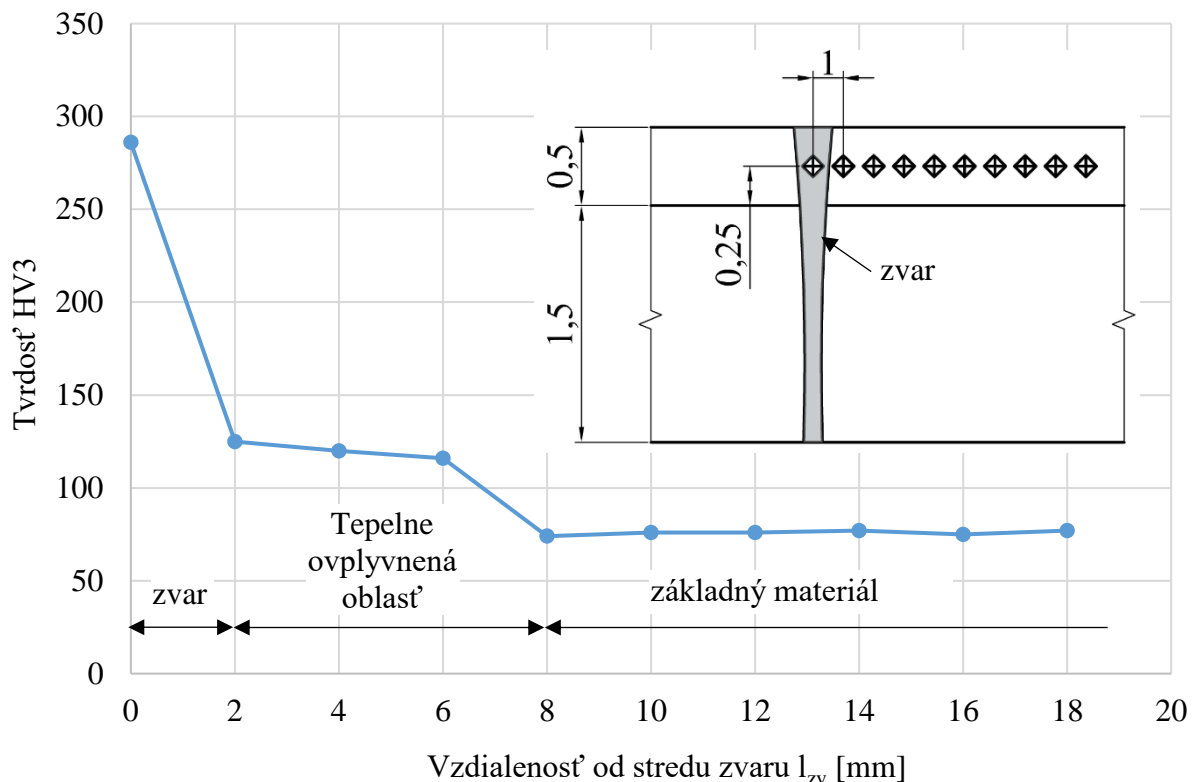
Na základe týchto výsledkov je možné konštatovať, že zmena hrúbky v strede vzoriek získaná simuláciou vo väčšine prípadov odpovedá nameraným rozmerom pomocou mikrometra. Krajné miesta však toto nespĺňajú a vykazujú vyššie percentuálne rozdiely. Zo súboru všetkých kontrolovaných miest sa najväčšia odchýlka 10,7 % zistila v kritickom mieste 7.

Dôvodom vzniknutých nepresností je najmä to, že simulácia nepočíta s vplyvom, ktorý do procesu prináša vytvorený zvar. Materiál v okolí zvarového spoja je tepelne ovplyvnený, čo má za následok zmenu jeho vlastností, predovšetkým tvrdosti a pevnostných charakteristík. Pre posúdenie rozsahu v akom k tomu dochádza, bola využitá skúška tvrdosti podľa Vickersa na stroji Zwick 3212 (obr. 66), ktorým je vybavené laboratórium merania tvrdostí na Ústave strojírenskej technológie VUT FSI v Brně. Meranie podľa Vickersa používa ako indentor štvorboký diamantový ihlan s vrcholovým uhlom  $136^\circ$ . Ten bol do materiálu vtlačovaný pôsobením zaťaženia, ktoré odpovedá označeniu HV 3. Pre vyhodnotenie tvrdosti sa použil softvér, ktorý spracoval dáta získané CCD kamerou.



Obr. 66 Tvrdomer Zwick 3212 [11]

Meranie prebehlo celkovo na 10 miestach, medzi ktorými bola vzdialenosť 1 mm a počiatočné miesto bol stred zvaru. Zo získaných hodnôt bola následne v softvéri Microsoft Excel vytvorená závislosť tvrdosti na vzdialenosti od stredu zvaru, vid' obr. 67.



Obr. 67 Závislosť tvrdosti na vzdialenosti od stredu zvaru

V uvedenej závislosti sú rozlíšiteľné tri oblasti. Najvyššia tvrdosť 286 HV je dosiahnutá v zvarovom kove. K viac ako polovičnému poklesu na približne 120 HV potom dochádza v ďalšom pásme, ktoré predstavuje tepelne ovplyvnenú oblasť. Zvyšných 6 meraní ukazuje priebeh tvrdosti v tepelne neovplyvnenej oblasti – základnom materiáli, kde je tvrdosť cca 76 HV.

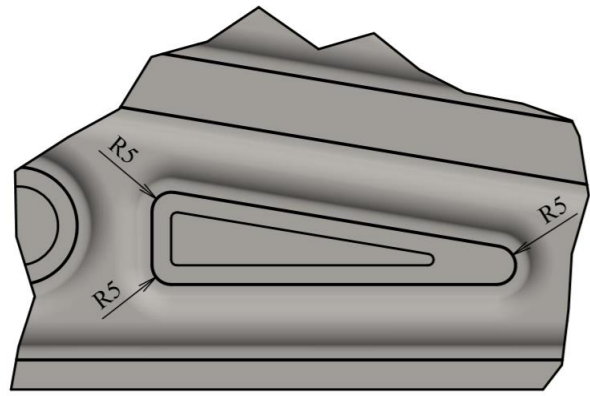
Nárast tvrdosti v tepelne ovplyvnenej oblasti oproti základnému materiálu je asi 44 HV a táto oblasť zasahuje približne 5 mm od stredu zvaru. Pri skutočnom procese je teda tvárnený aj tepelne ovplyvnený materiál, čo v simulácii nie je zahrnuté. Táto vzdialenosť by približne odpovedala aj krajným úsekom grafov merania hrúbky tvárneného plechu, kde boli väčšie odchýlky medzi nameranými a vypočítanými hodnotami.

Pre dosiahnutie presnejších výsledkov je nutné definovať vlastnosti materiálu v tepelne ovplyvnenej oblasti, čo dokazuje aj vyhodnotenie merania tvrdosti. K tomu je možné využiť napríklad numerickú simuláciu zvarovania, čím sa dosiahnutie riešenia značne skomplikuje.

## 5.4 Optimalizácia geometrie

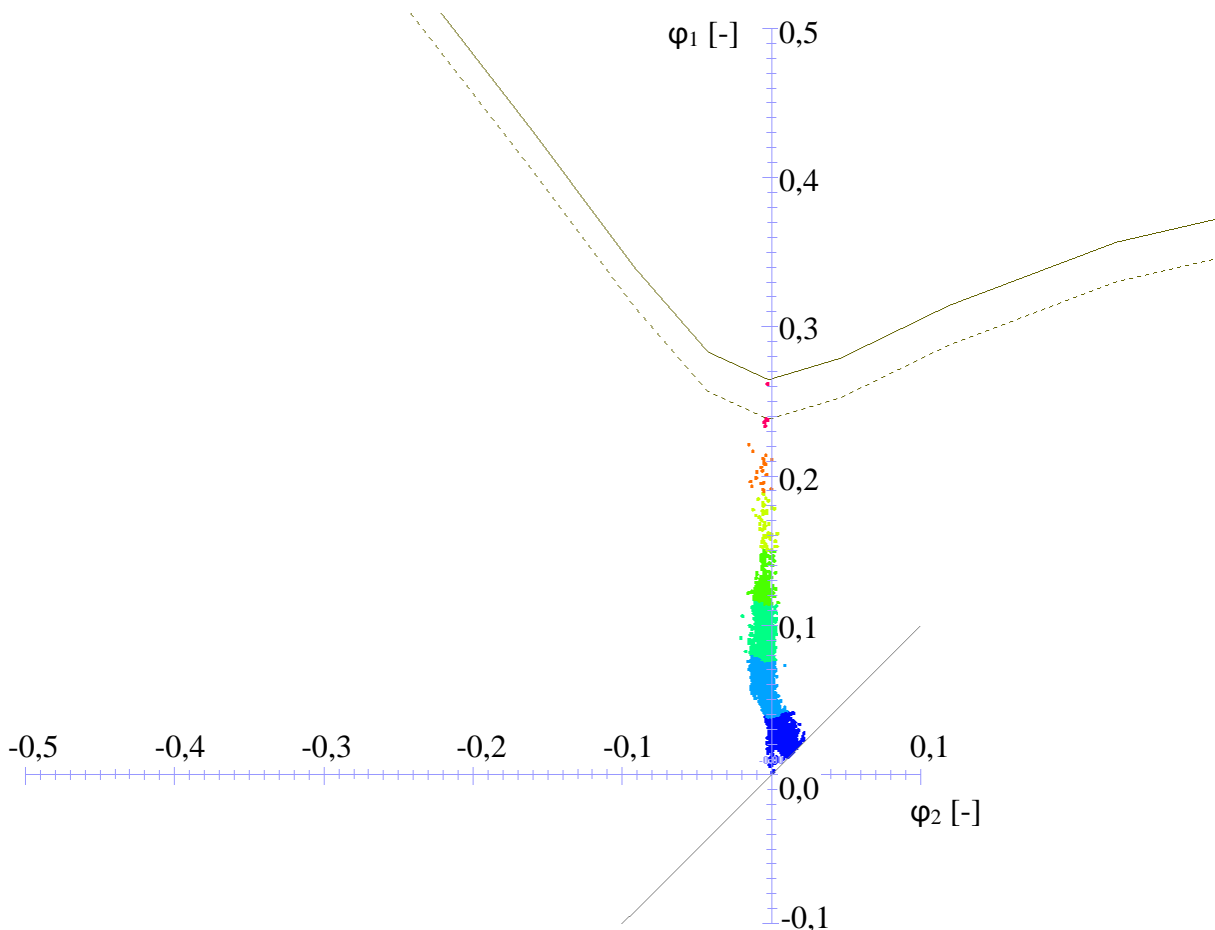
Numerická simulácia je jednoduchým prostriedkom pre optimalizovanie tvaru lisovaných dielcov. Aj keď sa jej výsledky odlišujú od nameraných hodnôt je možné použiť ju pre získanie odhadu priebehu procesných parametrov, na základe zistenia trendov. Podľa vykonaných analýz (stenčenie, FLD, pretvorenie), bolo lokalizované kritické miesto limitujúce možnosti výrobných technológií. Zmenou geometrie výlisku sa dá dosiahnuť zmena priebehu napätia a deformácie. Podľa umiestnenia kritického miesta sa ako najvhodnejší parameter pre optimalizáciu javí polomer zaoblenia tvarového prvku vyznačený na obr. 68. Ako nástroj optimalizácie bude použitý softvér PAM-STAMP.

Pôvodný polomer zaoblenia tvarového prvku je 5 mm. Aby bolo možné určiť vplyv zmeny veľkosti tohto zaoblenia na parametre procesu, sú ďalej rozobrané numerické simulácie, kde bola zvolená veľkosť zaoblenia 7 mm a 9 mm. U oboch optimalizovaných geometrických modelov sa použili rovnaké podmienky ako v pôvodnej simulácii. Rozdiel spočíval v navýšení maximálnej hodnoty tvárniaceho tlaku. Model zaťažovania ostal zachovaný tzn. lineárne rastúci a napätie bolo normálového tlakového charakteru.



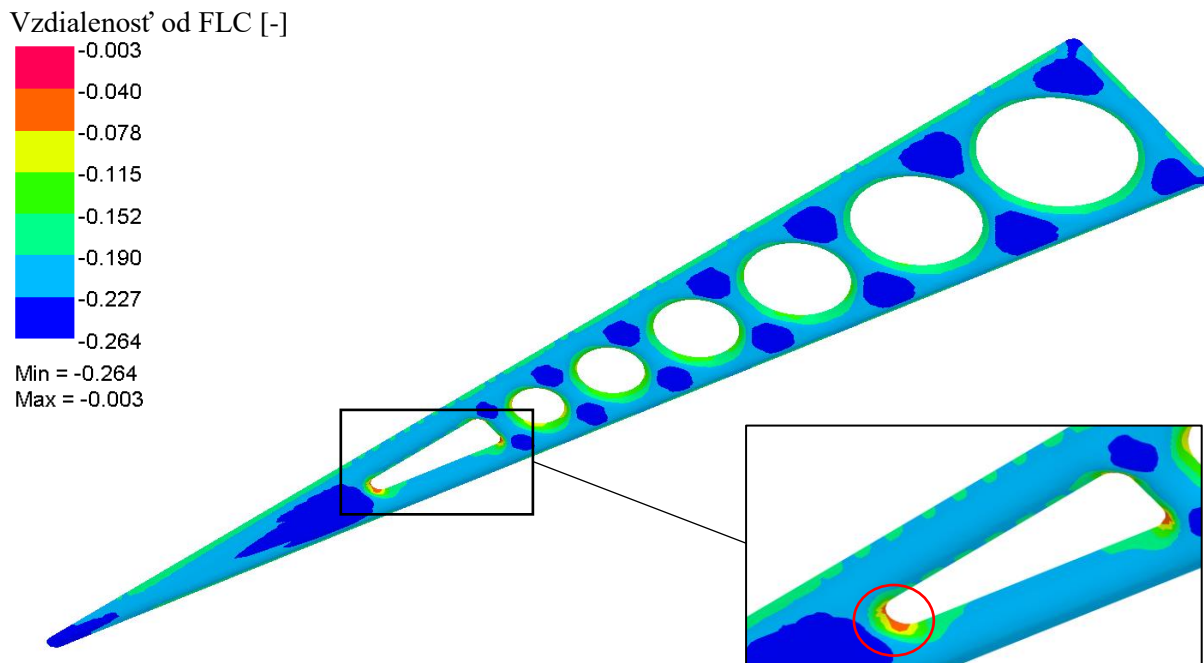
Obr. 68 Optimalizované zaoblenie dielca

Najskôr sú popísané výsledky zo simulácie, kde bol zvolený polomer zaoblenia 7 mm. Zaťaženie v tomto prípade narastalo z 0 MPa na hodnotu 12 MPa. Sledovaním rozvoja pretvorenia pomocou FLD bolo zistené, že ku kritickým pretvoreniam dochádza až v poslednom kroku, kedy tvárniaci tlak dosiahol nastavené maximum. Z toho dôvodu sú všetky ďalšie výsledky uvádzané pre posledný krok numerickej simulácie. Prvým z výstupov je FLD na obrázku 69, ktorý dokazuje, že niektoré elementy sa dostali do oblasti rizika vzniku trhlin.



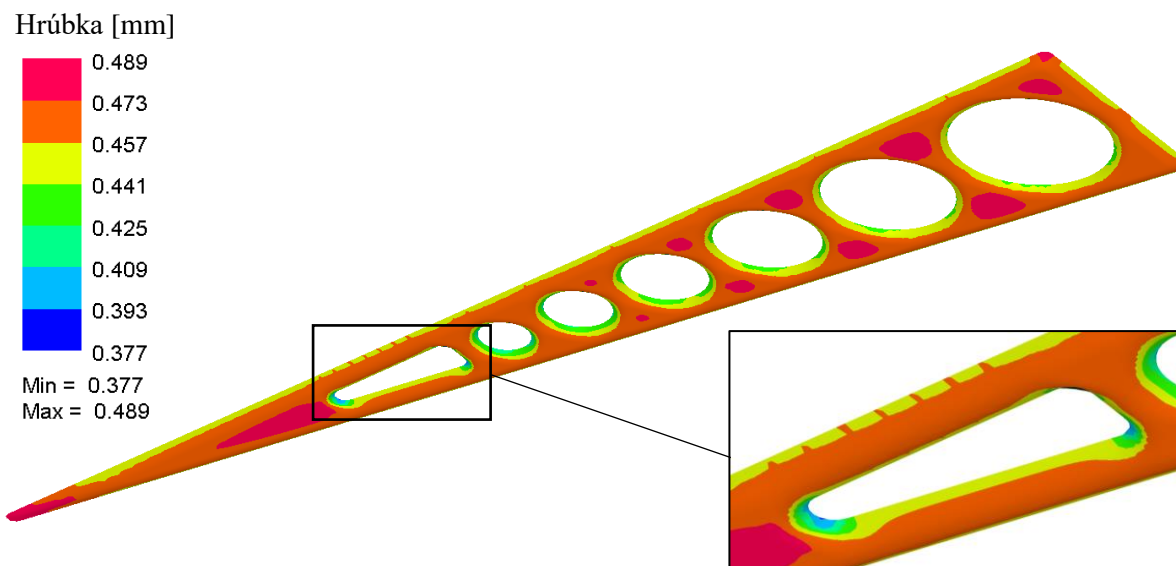
Obr. 69 FLD pre optimalizovanú geometriu  $R = 7 \text{ mm}$

K tomuto diagramu náleží aj obrázok 70 zobrazujúci elementy tvárneného plechu, u ktorých došlo ku kritickému pretvoreniu. Na základe toho je možné pozorovať, že kritickým miestom stále ostáva zaoblenie tvarového prvku ukázané v detaile.



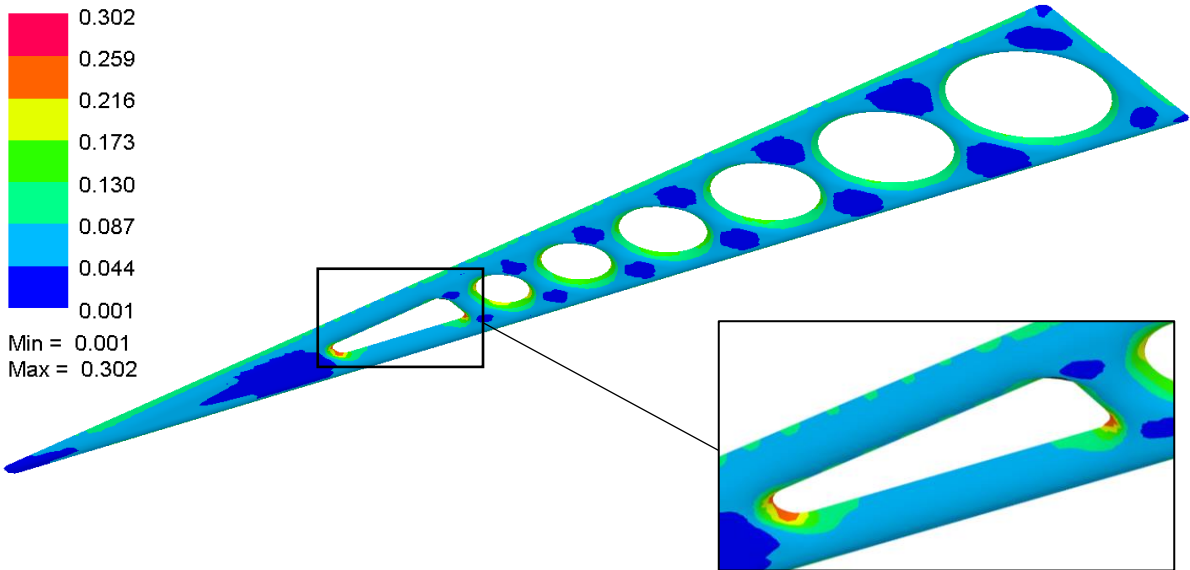
Obr. 70 Kritické miesta výlisku podľa vzdialenosti bodu v FLD od FLC pre  $R = 7 \text{ mm}$

Predstavu o rozložení hrúbky tvárneného plechu ponúka obrázok 71. Oproti pôvodnej geometrii dochádza po celej ploche dielca k výraznejším zmenám hrúbky. Vzhľadom k vyššej hodnote pôsobiaceho tlaku sa tento jav očakáva. Najväčšie stencenie materiálu nastáva v mieste tvarových prvkov a po obvode, čo je opäť podložené obrázkom 72, ktorý ukazuje rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia.



Obr. 71 Rozloženie hrúbky tvárneného dielca pre  $R = 7 \text{ mm}$

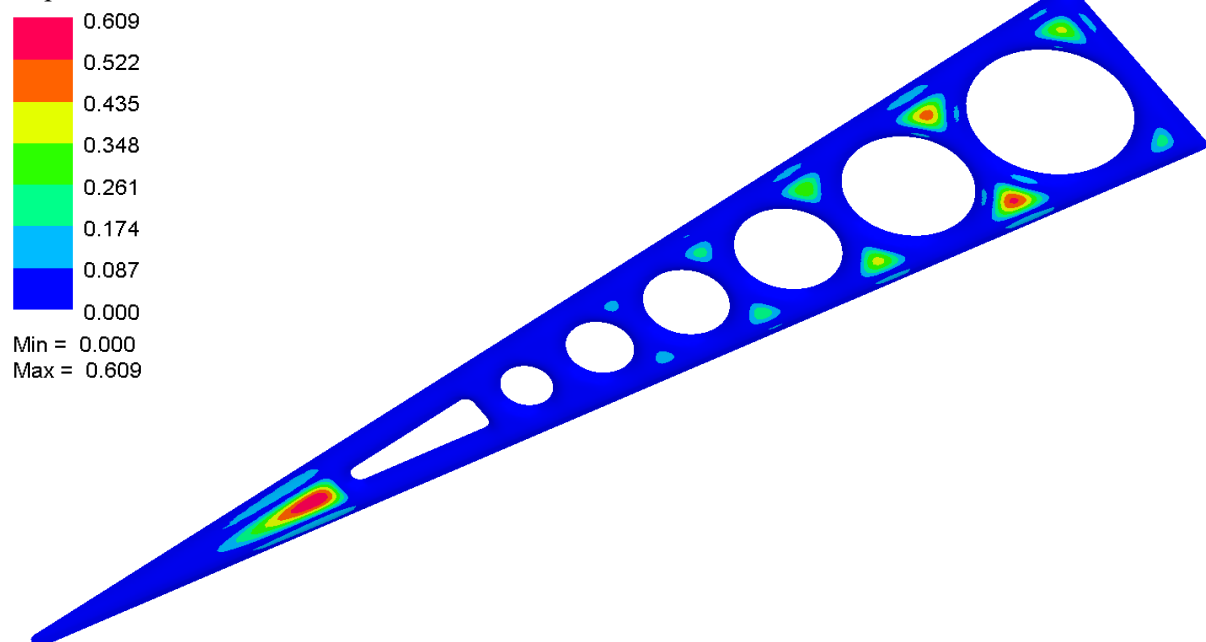
Efektívne plastické pretvorenie [-]



Obr. 72 Rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia pre  $R = 7 \text{ mm}$

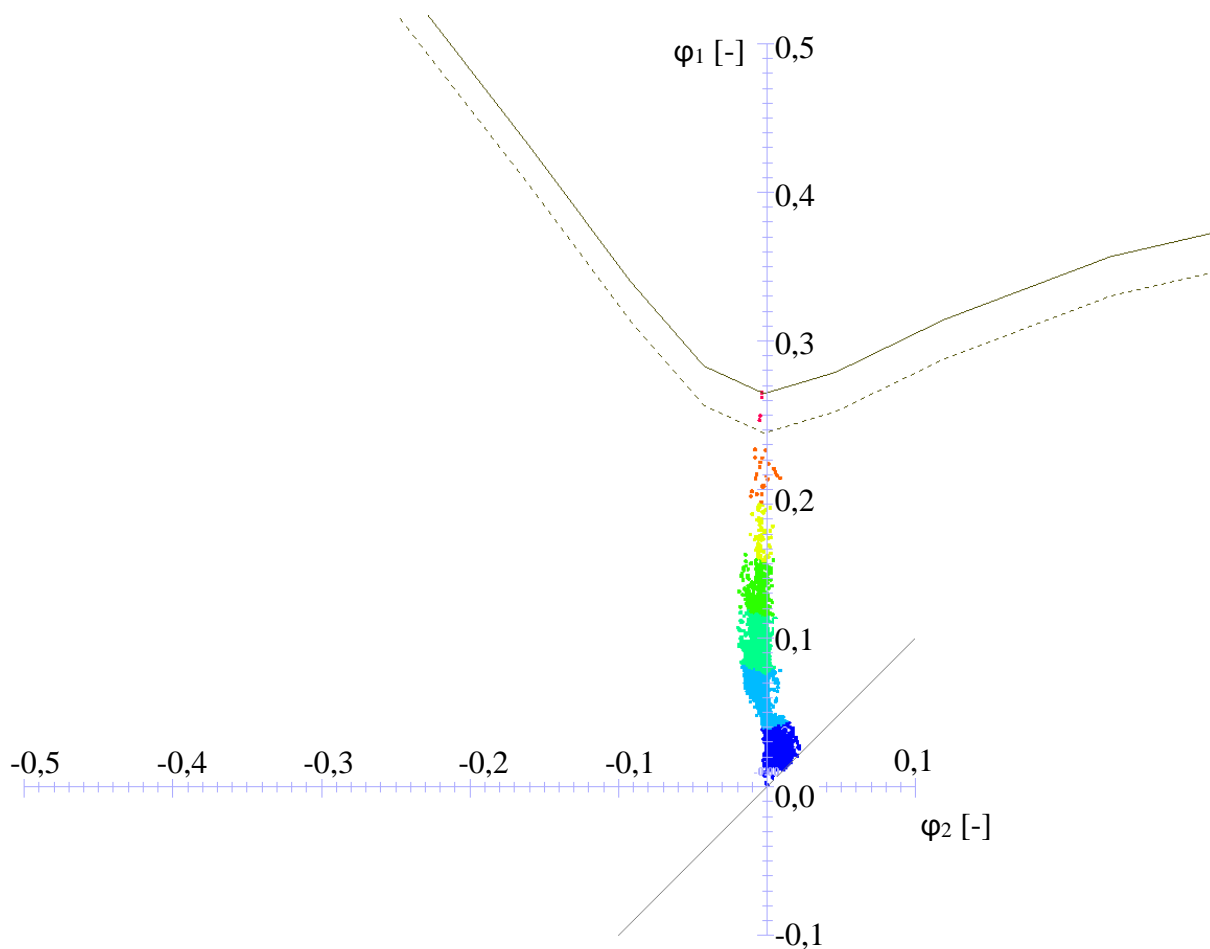
Ďalším z výstupov je odpruženie materiálu (obr. 73). Vzhľadom k vyšším hodnotám tvárniaceho tlaku dochádza k väčšiemu pretvoreniu materiálu, čo má pozitívny vplyv na veľkosť odpruženia. Oproti pôvodnému stavu kedy maximum bolo 0,651 mm, je po optimalizácii najväčšia hodnota odpruženia 0,609 mm.

Odpruženie [mm]



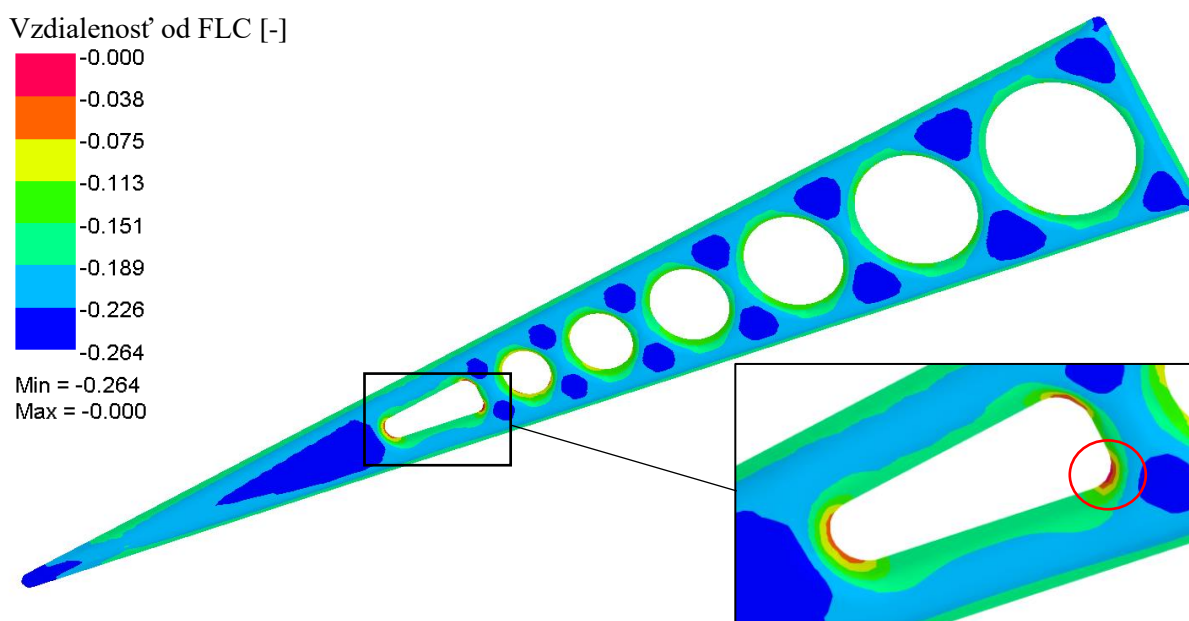
Obr. 73 Odpruženie riešeného dielca po uvoľnení zaťaženia pre  $R = 7 \text{ mm}$

Druhá simulácia bola vytvorená pre optimalizovaný polomer zaoblenia tvarového prvku 9 mm. Zaťažovanie prebiehalo od 0 po 20 MPa a lineárne narastalo v každom z 30 výpočtových krokov. Kontrolou pretvorenia pomocou FLD sa zistilo, že k porušeniu dielca dochádza už v 20. kroku. Tlak pri ktorom defekt vznikol je možné jednoducho dopočítať a jeho hodnota je 13,33 MPa. Ďalej uvedené výstupy sú teda pre 20. krok výpočtu a prvým z nich je FLD na obrázku 74.



Obr. 74 FLD pre optimalizovanú geometriu  $R = 9 \text{ mm}$

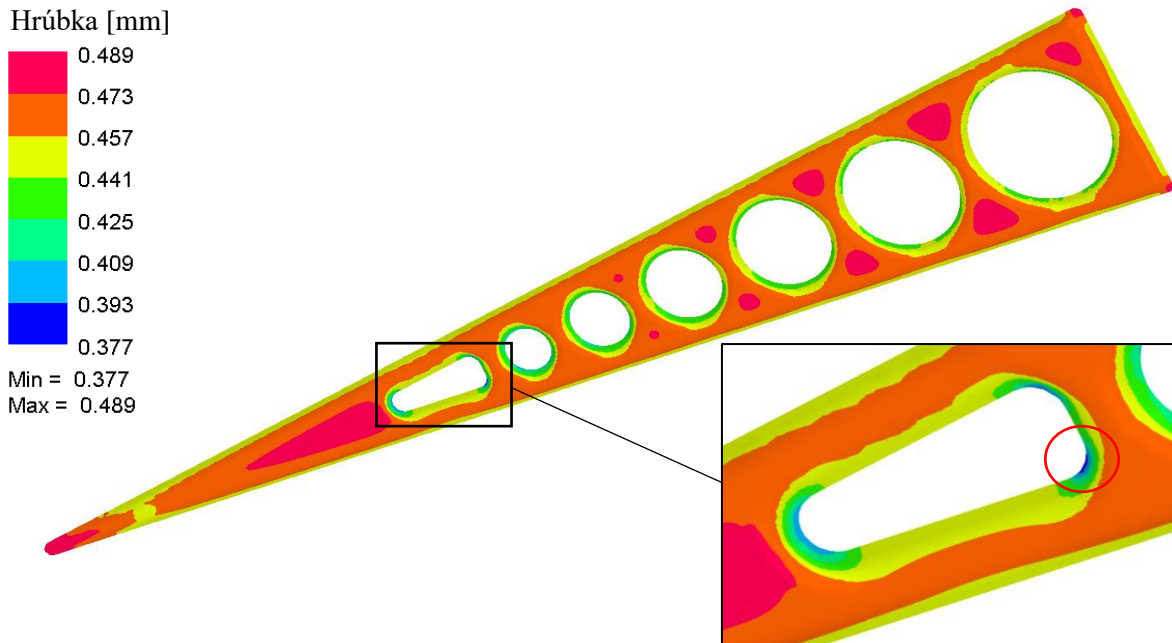
Diagramu opäť prináleží obrázok 75, kde je v detaile zobrazené kritické miesto. Najnáchyľnejším pre vznik trhlín stále ostáva zaoblenie tvarového prvku. Oproti pôvodnému stavu a optimalizácii so zaoblením  $7 \text{ mm}$  je poškodenie iniciované na protiľahlej strane, čo je zvýraznené v detaile.



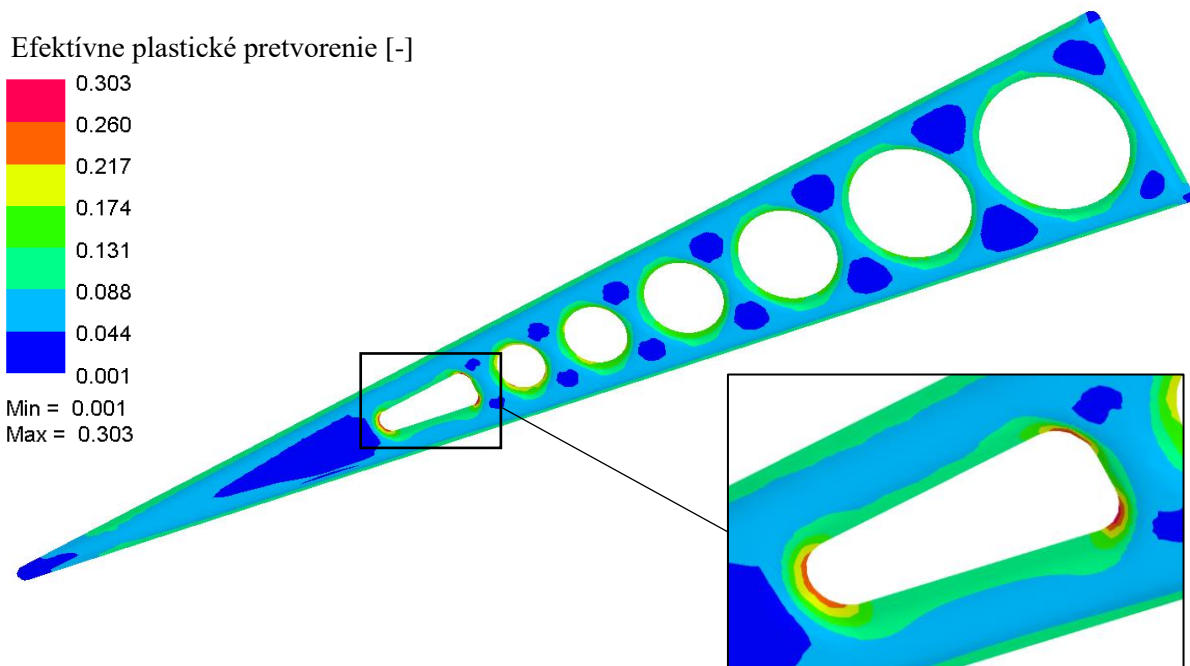
Obr. 75 Kritické miesta výlisku podľa vzdialenosti bodu v FLD od FLC pre  $R = 9 \text{ mm}$



Rozloženie hrúbky u druhého optimalizovaného modelu ukazuje obrázok 76. Minimálna hrúbka steny je 0,377 mm a to v mieste vyznačenom v detaile. Takéto stenčenie môže viesť k iniciácii trhliny a porušeniu dielca, čo potvrdzuje aj FLD. Rozloženie efektívneho plastického pretvorenia po geometrii výlisku je na obrázku 77.

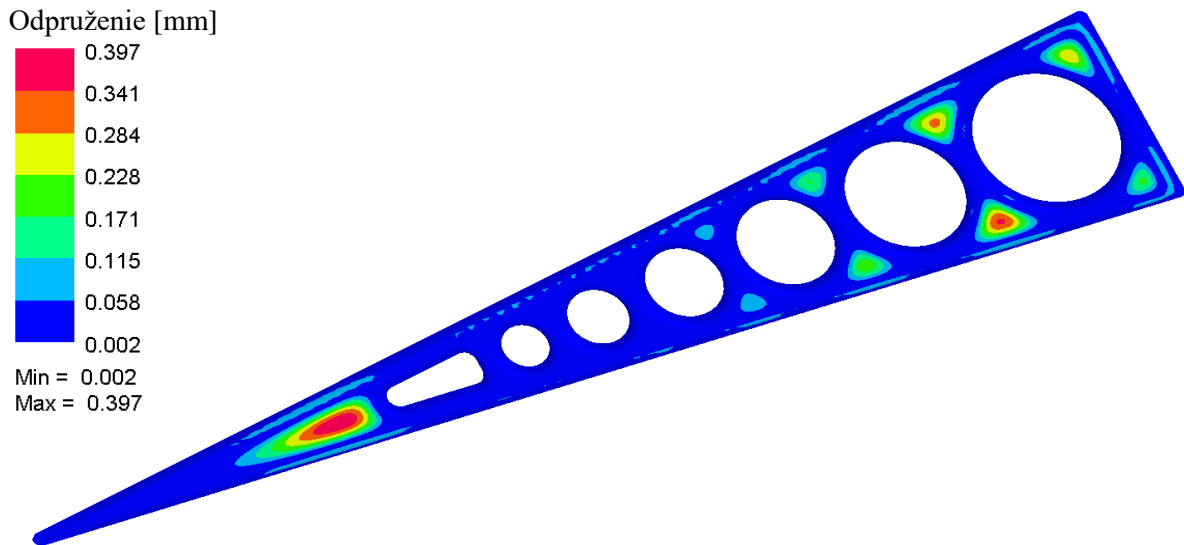


Obr. 76 Rozloženie hrúbky tvárneného dielca pre  $R = 9$  mm



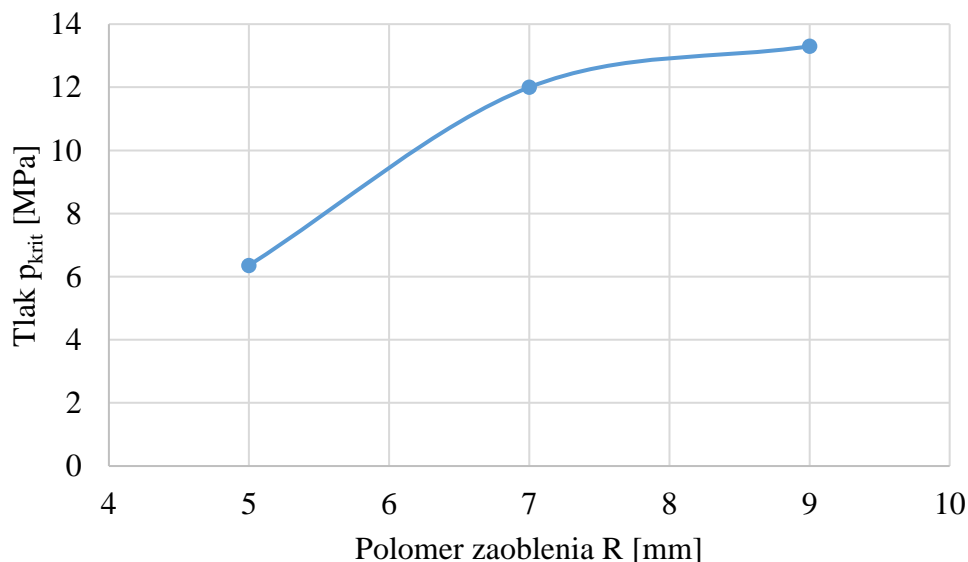
Obr. 77 Rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia pre  $R = 9$  mm

Odpruženie vzniknuté po odľahčení aplikovaného zaťaženie optimalizovaného modelu je oproti predchádzajúcim simuláciám výrazne menšie, vid' obr. 78. Tento výstup je jediný z uvedených, ktorý nie je pre 20. výpočtový krok, ide o stav po poslednom kroku (tvárniaci tlak 20 MPa). Maximálna hodnota odpruženia v tomto prípade dosahuje len 0,397 mm.



Obr. 78 Odpruženie riešeného dielca po uvoľnení zaťaženia pre  $R = 9$  mm

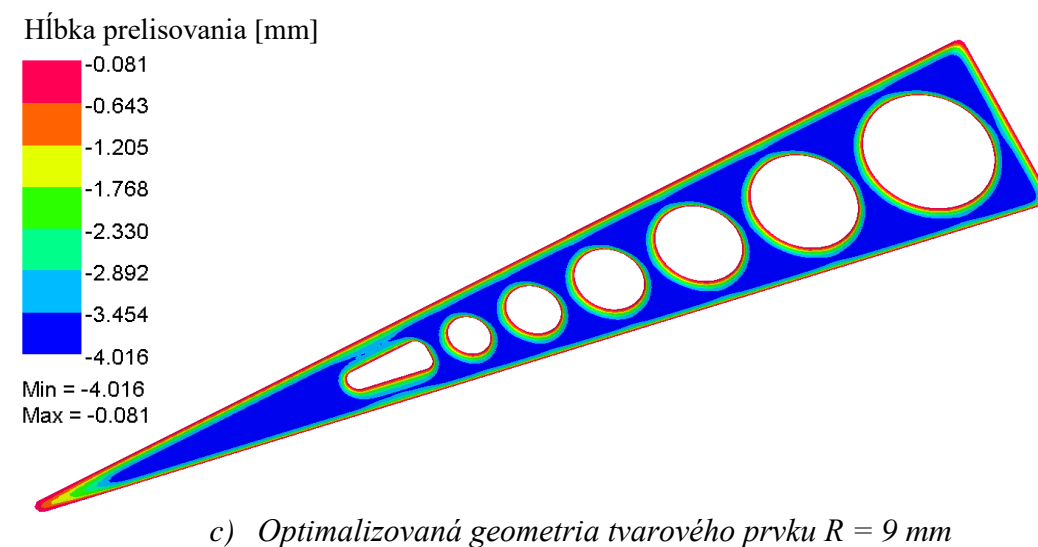
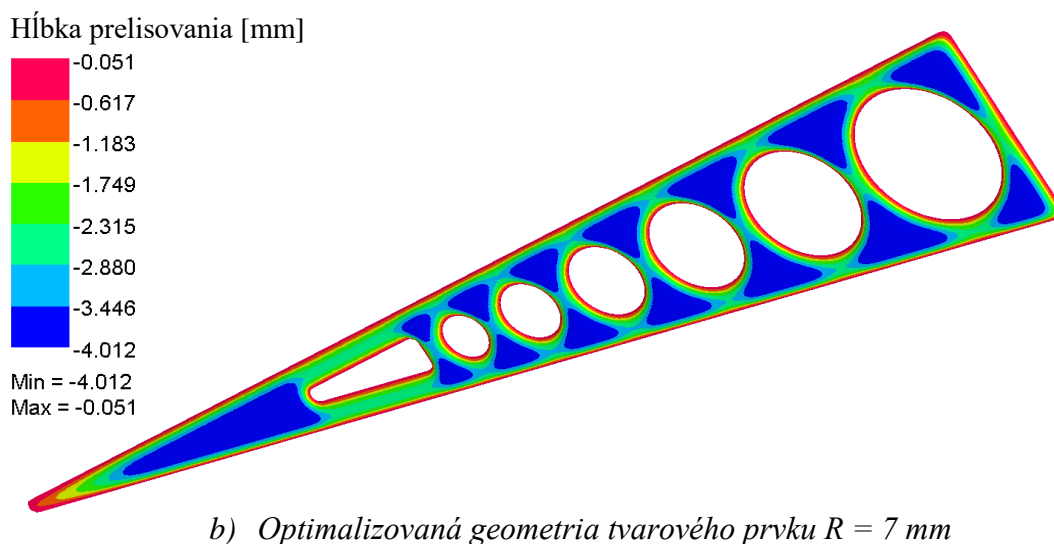
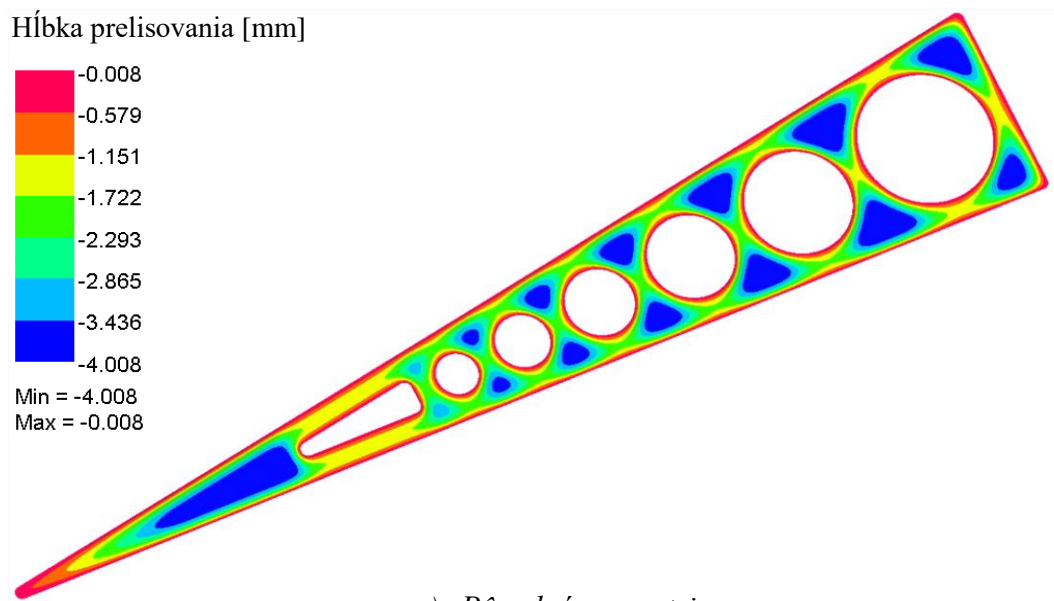
Výstupy optimalizácie ukazujú, že zmena zaoblenia tvarového prvku má vplyv na veľkosť tvárniaceho tlaku  $p_{krit}$ , pri ktorom dochádza k porušeniu výlisku. Vzhľadom k tomu, že graf je zložený len z troch bodov, nie je možné presnejšie určiť matematickú funkciu popisujúcu závislosť na obrázku 79. Na základe grafu ale možno odhadnúť vývoj tvárniaceho tlaku  $p_{krit}$ , v prípade zmeny jedného parametru, ktorým je polomer zaoblenia  $R$ .



Obr. 79 Závislosť tvárniaceho tlaku pri porušení na polomere zaoblenia

Okrem vytvorenej závislosti je z výstupov simulácií vidieť pozitívny dopad narastajúceho tvárniaceho tlaku na hĺbku prelisovania, čo dokazuje nasledujúci obrázok 80. Uvedené výstupy ukazujú prelisovanie pre výpočtový krok simulácie, v ktorom došlo k porušeniu hydroformovaného výlisku.

Väčšia hĺbka prelisovania má navyše vplyv na odpruženie. Toto je dokázané aj výstupmi simulácií, ktoré boli vyššie popísané (obr. 54, obr. 73 a obr. 78).



Obr. 80 Hĺbka prelisovania v jednotlivých numerických simuláciách

## 6 ZÁVERY

Dielec, ktorým sa zaoberá táto diplomová práca, je riešený v rámci vývoja výroby sendvičových panelov na Vysokom učení technickom v Brně. Polotovarom tejto aplikácie sú zvarené plechy s hrúbkou 0,5 mm a 1,5 mm z uľudnenej ocele DC01. Použitý materiál má vyhovujúcu tváriteľnosť, zvariteľnosť a je aj cenovo dostupný. Dielec je vyrábaný technológiou paralelného hydroformovania, ktorá môže byť sprevádzaná vznikom defektov vo forme nadmerného stenčovania a prasklín. Aby sa tomuto zabránilo bola vytvorená analýza a optimalizácia geometrie výlisku, založená na metóde konečných prvkov, k čomu bol použitý softvér PAM-STAMP.

Vlastnosti materiálu boli pre účely numerickej simulácie získané vyhodnotením ťahovej skúšky. Chovanie materiálu pri plastickej deformácii sa vyjadrilo krivkou spevnenia. Elastické vlastnosti boli definované obecnými známymi hodnotami modulu pružnosti v ťahu a Poissonovho pomeru. Vzhľadom k tomu, že polotovarom je valcovaný plech bolo nutné zohľadňovať aj anizotropiu materiálu. S využitím nadstavby použitého softvéru ESI MAT-WIZARD, bola posudzovaná presnosť a použiteľnosť anizotropných podmienok plasticity. Na základe porovnania sa potom v simulácii použila podmienka Vegter Lite. Geometrický model vychádzal z predpokladu, že lisovnica je tuhé teleso. Pre zjednodušenie výpočtu numerickej simulácie bol polotovar definovaný len tvárneným plechom, zloženým zo škupinových (shell) prvkov. Miesta zvarov sa zafixovali.

Pomocou numerickej simulácie bola vytvorená analýza medzných pretvorení pomocou FLD Keeler-Goodwinovho typu. Kontrolou vývoja pretvorení sa zistilo, že kritické hodnoty dosahuje tvárnený dielec pri tlaku 6,364 MPa. Ďalšie analýzy boli použité pre určenie rozloženia hrúbky steny výlisku, efektívnych plastických pretvorení a odpruženia.

Výstupy numerickej simulácie boli pre overenie správnosti konfrontované s výsledkami experimentu. Prvým porovnávacím kritériom bol tlak, pri ktorom došlo k vzniku porušenia. U experimentu vznikla prasklina pri tlaku 8,6 MPa. Percentuálny rozdiel medzi zmeranými a vypočítanými hodnotami predstavuje 26,0 %, čo je za hranicou technickej prijateľnosti. Miesto porušenia sa v oboch prípadoch zhoduje (rozhranie zvar – tvárnený materiál). Druhým porovnávacím kritériom bolo rozloženie hrúbky po tvárnení na 7 miestach výlisku. Z tohto sa zistilo, že výsledky rozloženia hrúbky v strede kontrolovaných rezov zo simulácie približne odpovedajú meraniu. V krajných úsekoch ale boli rozdiely výraznejšie, maximálny percentuálny rozdiel 10,7 %. Meraním tvrdosti podľa Vickersa vyplýva, že toto odchylenie bolo pravdepodobne spôsobené tepelným ovplyvnením materiálu pri zvarení, čo simulácia nezohľadňuje. Pre zvýšenie presnosti sa preto odporúča zahrnúť aj tento vplyv. K tomu by bolo možné použiť numerickejšiu simuláciu zvarovania. Tá však vedie k značnej výpočtovej náročnosti, keďže dĺžka zvarov je približne 4 325 mm. Presnejšie výsledky by mohlo priniesť simulovanie zvaru na krátkom úseku a prenesenie výsledkov do ovplyvnených miest. Výsledky verifikácie boli navyše ovplyvnené tým, že merania prebehli len na jednom dieleci, takže by bolo vhodné merania opakovať na väčšom počte výliskov.

Na základe výsledkov simulácie sa vytvorila optimalizácia, ktorá spočívala v zmene polomeru zaoblenia tvarového prvku, kde dochádzalo ku praskaniu a to z pôvodných 5 mm na 7 mm a 9 mm. Výstupy optimalizácie poskytujú trendy vývoja optimalizovaných parametrov. Bolo zistené, že čím väčšie je zaoblenie tvarového prvku, tým väčší tvárniaci tlak možno použiť. To má potom vplyv na hĺbku prelisovania a tiež pozitívny dopad na veľkosť odpruženia.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [55]

1. HARANT, Martin. *Význam tahové zkoušky pro numerickou simulaci*. Brno, 2017, 28 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření. Vedoucí práce Jan Řiháček.
2. KOÇ, Muammer. *Hydroforming for Advanced Manufacturing* [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008 [cit. 2019-04-09]. ISBN 9781845694418. Dostupné z: <http://www.elsevier.com/books/hydroforming-for-advanced-manufacturing/koc/978-1-84569-328-2>
3. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření: Část I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.
4. Advanced Manufacturing Capabilities. *MSM aerospace fabricators* [online]. c2018 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.msm-aero.com/advanced-manufacturing-capabilities/>
5. Hydro-forming Tube. *BUB Materials* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: [http://www.bubmaterials.com/en/pro\\_show.aspx?nid=44&pid=47&id=53](http://www.bubmaterials.com/en/pro_show.aspx?nid=44&pid=47&id=53)
6. Metal shaping and metal processing for aluminium, steel and stainless steel. *Enders Colman AG* [online]. c2019 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.enders-colman.de/en/metal-shaping/#hydroforming>
7. Know Your Roll: Wethepeople scorpio frame. *RIDE bmx Magazine: BMX Videos, Photos, BMX Bikes, Check Outs and more* [online]. 2015 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.ridebmx.com/features/know-your-roll-we-the-people-scorpio-frame/>
8. CAMPBELL, Flake C. *Structural composite materials*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.
9. Jakosti ocelí. *Feromat* [online]. c2010 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)
10. Carbon sheet DC01. *Metric Metal* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.metricmetal.com/product/carbon/carbon-sheet-dc01/>
11. ŘIHÁČEK, Jan. *Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu*. Brno, 2017, 109 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Libor Mrňa.
12. SINGH, Harjinder. *Fundamentals of hydroforming*. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 2003, 219 s. ISBN 978-1-61344-961-5.
13. SCHULER. *Metal forming handbook*. New York: Springer-Verlag, 1998, xx, 563 s. ISBN 3-540-61185-1.
14. NIKHARE, Chetan, Matthias WEISS a Peter D. HODGSON. Buckling in low pressure tube hydroforming. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier, 2017, 28, 1-10 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.05.015. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1526612517301263>
15. CHU, Guan-Nan, Gang CHEN, Yan-Li LIN a Shi-Jian YUAN. Tube hydro-forging – a method to manufacture hollow component with varied cross-section perimeters. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Elsevier, 2019, 265, 150-157 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.007. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013617305101>

16. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
17. DVOŘÁK, Milan, Karel NOVOTNÝ a František GAJDOŠ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 169 s. ISBN 80-214-2340-4.
18. LANG, Li Hui, Zhong Ren WANG, Da Chang KANG, Shijiang Jian YUAN, Shi Hong ZHANG, Joachim DANCKERT a Karl Brian NIELSEN. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Elsevier, 2004, 151(1-3), 165-177 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.032. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013604003371>
19. Tube Hydroforming - Hydroforming Design Light. *Hydroforming Design Light* [online]. c2013 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.designlight.se/en/platforming/rorhydroforming/>
20. LUO, Liang, Zheng Yi JIANG, Dong Bin WEI a Xiaofeng HE. Study on Micro Hydroforming of Metals. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, 887-888, 1133-1138 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.887-888.1133. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.887-888.1133>
21. QIN, Yi. *Micromanufacturing Engineering and Technology* [online]. 2nd ed. William Andrew Publishing, 2015 [cit. 2019-04-09]. ISBN 9780323311496. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780323311496/micromanufacturing-engineering-and-technology#book-info>
22. ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet metal forming: processes and applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-844-2.
23. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie I*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990, 220 s. ISBN 80-214-0128-1.
24. The Hydroforming Process. *Jones Metal Products* [online]. c2018 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.jmpforming.com/hydroforming/hydroforming-process.htm>
25. GÜRÜN, Hakan a İbrahim KARAAĞAÇ. The Experimental Investigation of Effects of Multiple Parameters on the Formability of the DC01 Sheet Metal Material. *Strojnicki vestnik - Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2015, 61(11), 651-662 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.5545/sv-jme.2015.2562. ISSN 0039-2480. Dostupné z: <https://www.sv-jme.eu/article/the-experimental-investigation-of-effects-of-multiple-parameters-on-the-formability-of-the-dc01-sheet-metal/>
26. *Quintus Technologies: High Pressure Technology* [online]. c2019 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://quintustechnologies.com/>
27. LASCOE, Orville D. *Handbook of Fabrication Processes*. ASM International, 1988, 456 s. ISBN 0-87170-302-5.
28. LIU, Wei, Yi-zhe CHEN, Gang LIU a Xiao-lei CUI. Welded double sheet hydroforming of complex hollow component. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2012, 22, 309-314 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61724-5. ISSN 1003-6326. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1003632612617245>



29. HEIN, Philipp a Frank VOLLERTSEN. Hydroforming of sheet metal pairs. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1999, 87(1-3), 154-164 [cit. 2019-04-09]. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00347-1. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003471>
30. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
31. ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet metal forming: Fundamentals*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-842-8.
32. Tensile test. *Tec-science* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/tensile-test/>
33. BANABIC, Dorel. *Sheet metal forming processes: Constitutive modelling and numerical simulation*. New York: Springer, 2010, XV, 301. ISBN 978-3-540-88112-4.
34. PAUL, Surajit Kumar. Theoretical analysis of strain-and stress-based forming limit diagrams. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* [online]. 2013, 48(3), 177-188 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1177/0309324712468524. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/236156408\\_Theoretical\\_analysis\\_of\\_strain-\\_and\\_stress-based\\_forming\\_limit\\_diagrams](https://www.researchgate.net/publication/236156408_Theoretical_analysis_of_strain-_and_stress-based_forming_limit_diagrams)
35. JAWALE, Kishore, José Ferreira DUARTE, Ana REIS a Maria Beatriz SILVA. Characterizing fracture forming limit and shear fracture forming limit for sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Elsevier, 2018, 255, 886-897 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.01.035. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013618300360>
36. ČSN EN ISO 12004-1. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení křivek mezní tváritelnosti - Část 1: Měření a aplikace diagramů mezní tváritelnosti v lisovně*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s.
37. ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení křivek mezní tváritelnosti - Část 2: Stanovení křivek mezní tváritelnosti v laboratoři*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 32 s.
38. LĂZĂRESCU, Lucian, Dan-Sorin COMȘA, Ioan NICODIM, Ioan CIOBANU a Dorel BANABIC. Characterization of plastic behaviour of sheet metals by hydraulic bulge test. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online]. 2012, 22, 275-279 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61719-1. ISSN 1003-6326. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1003632612617191>
39. SLOTA, Jan, Emil SPIŠÁK, Miroslav JURIŠČIN a Marek ŠISER. Experimental flc determination of high strength steel sheet metal. *Acta Metallurgica Slovaca* [online]. 2015, 21, 269-277 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.12776/ams.v21i4.639. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/291141018>
40. SCHWINDT, Claudio D., Mike STOUT, Lucio IURMAN a Javier W. SIGNORELLI. Forming Limit Curve Determination of a DP-780 Steel Sheet. *Procedia Materials Science* [online]. Elsevier, 2015, 8, 978-985 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.mspro.2015.04.159. ISSN 2211-8128. Dostupné z: [https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2211812815001601](https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2211812815001601)

41. SUTTNER, Sebastian a Marion MERKLEIN. Characterization of the Shear Stress State Under Non-Proportional Strain Paths Realized by Biaxial Stretching in the Marciniak Test. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2015, 2, 98-106 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.05.025. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2214785315000887>
42. GALANULIS, Konstantin. Optical Measuring Technologies in Sheet Metal Processing. *Advanced Materials Research* [online]. 2005, 6-8, 19-34 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.19. ISSN 1662-8985. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMR.6-8.19>
43. ARAMIS. *GOM: Precise industrial 3D metrology* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>
44. BIJKER, Sil. *How to perform adequate optical strain measurements on a sheet metal truck bumper*. 2006. Dostupné také z: <http://mate.tue.nl/mate/pdfs/7468.pdf>
45. ARAMIS Professional. *MCAE* [online]. [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/aramis-professional/>
46. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: část tváření*. Brno: VUT FSI: Ústav strojírenské technologie, 2015, 29 s.
47. LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. 4th ed. United States: Thomson, 2007, xviii, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-5.
48. PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/images/opory/MKP%20v%20inzenyrskych%20vypoctech/RIV.pdf>
49. FABÍK, Richard. Modelování tvářecích procesů [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2013, 76 s. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: [https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik\\_Modelovani\\_tvarecich\\_procesu.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf)
50. ŘIHÁČEK, Jan a Libor MRŇA. Comparison of implicit and explicit algorithms of finite element method for the numerical simulation of hzdforming process. *MM Science Journal* [online]. 2016, 2016(5), 1326-1331 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.17973/MMSJ.2016\_11\_2016114. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/november-2016.html#2016114>
51. MARCINIAK, Z., J. L. DUNCAN a S. J. HU. *Mechanics of sheet metal forming*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, xx, 211 s. ISBN 0-7506-5300-0.
52. HORA, Pavel. *Advanced constitutive models in sheet metal forming*. Zürich: Institute of Virtual Manufacturing, ETH Zurich, 2015. ISBN 978-3-906031-98-9.
53. ESI launches PAM-STAMP 2017 and Delivers Drastic Efficiency Improvements. *ESI Group: Virutální prototypování - Software a servis* [online]. Paris, 2017 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/spolecnost/tisk/tiskove-zpravy/esi-launches-pam-stamp-2017-and-delivers-drastic-efficiency-improvements>
54. *PAM-STAMP 2G 2012: User's Guide* [online]. ESI Group, c2012 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/259215739/Manual-Pam-Stamp>
55. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. c2012-2016 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Označenie	Legenda	Jednotka
A	Ťažnosť	[%]
A <sub>80</sub>	Ťažnosť nepomernej tyče s počiatočnou meranou dĺžkou 80 mm	[%]
A <sub>100</sub>	Ťažnosť nepomernej tyče s počiatočnou meranou dĺžkou 100 mm	[%]
A <sub>g</sub>	Ťažnosť pri maximálnom zaťažení	[%]
a <sub>Rp0,2</sub>	Súčiniteľ plošnej anizotropie	[-]
b <sub>0</sub>	Počiatočná šírka skúšobného telesa	[mm]
b <sub>1</sub>	Šírka skúšobného telesa po experimente	[mm]
<b>C</b>	Celková matica tlmenia	
C	Materiálové charakteristika	[MPa]
D	Priemer valcového ťažníku pri skúške podľa Marciniaka	[mm]
D <sub>bh</sub>	Priemer otvoru nosiča pri skúške podľa Marciniaka	[mm]
d	Počiatočný priemer prvku deformačnej siete	[mm]
E	Modul pružnosti v ťahu	[MPa]
E <sub>pl</sub>	Modul plasticity	[MPa]
<b>F</b>	Celková matica zaťažení	
<b><math>\hat{F}</math></b>	Dynamická matica zaťažení	
FLC	Forming Limit Curve	
FLD	Forming Limit Diagram	
h	Hrúbka tvárneného plechu	[mm]
h <sub>0</sub>	Počiatočná hrúbka tvárneného plechu	[mm]
<b>K</b>	Celková matica tuhosti	
<b><math>\hat{K}</math></b>	Dynamická matica tuhosti	
K	Pevnostný koeficient pre Krupkowského aproximáciu	[MPa]
K-G diagram	Keeler-Goodwinov diagram	
L <sub>0</sub>	Počiatočná meraná dĺžka skúšobného telesa	[mm]
L <sub>u</sub>	Meraná dĺžka skúšobného telesa po pretrhnutí	[mm]
l <sub>1</sub>	Dĺžka hlavnej osi elipsy pretvoreného prvku deformačnej siete	[mm]
l <sub>2</sub>	Dĺžka vedľajšej osi elipsy pretvoreného prvku deformačnej siete	[mm]
l <sub>m</sub>	Meraná dĺžka	[mm]
l <sub>zv</sub>	Vzdialenosť od stredu zvaru	[mm]
<b>M</b>	Celková matica hmotnosti	
MKP	Metóda konečných prvkov	
m	Exponent podmienky plasticity Barlat 89, Barlat 91 a Barlat 2000	[-]
n	Exponent deformačného spevnenia	[-]
p <sub>krit</sub>	Tvárnici tlak pri porušení tvárneného dielca	[MPa]
R	Polomer zaoblenia	[mm]
R <sub>e</sub>	Medza klzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	Medza pevnosti	[MPa]

Označenie	Legenda	Jednotka
$R_{p0,2}$	Zmluvná medza klzu pri ktorej je pomerné predĺženie 0,2 %	[MPa]
$\bar{r}$	Vážený priemer súčiniteľov plastickej anizotropie	[-]
$r_0, r_{45}, r_{90}, r_\alpha$	Súčinitele plastickej anizotropie	[-]
$r_b$	Biaxiálny súčiniteľ plastickej anizotropie	[-]
$s_0$	Počiatočná hrúbka skúšobného telesa	[mm]
$s_1$	Hrúbka skúšobného telesa po experimente	[mm]
$T$	Teplota	[°C]
$t$	Čas	[s]
$\mathbf{U}$	Celková matica deformačných parametrov	
$\dot{\mathbf{U}}$	Celková matica rýchlostí	
$\ddot{\mathbf{U}}$	Celková matica zrýchlení	
$u, v, w$	Zložky posuvu	[mm]
$w_{ps}, w_{sh}$	Váhové faktory podmienky plasticity Vegter Lite	[-]
$Z$	Zúženie	[%]
$\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z,$	Zložky uhlového pretvorenia	[-]
$\Delta t$	Dĺžka časového kroku	[s]
$\varepsilon$	Pomerná deformácia	[-]
$\varepsilon_1$	Hlavná pomerná deformácia	[-]
$\varepsilon_2$	Vedľajšia pomerná deformácia	[-]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z,$	Zložky lineárneho pretvorenia	[-]
$\theta$	Uhol sklonu krivky lineárnej časti zmluvnej závislosti	[°]
$\mu$	Poissonov pomer	[-]
$\sigma$	Zmluvné napätie	[MPa]
$\bar{\sigma}$	Skutočné napätie	[MPa]
$\sigma_1$	Hlavné napätie	[MPa]
$\sigma_2$	Vedľajšie napätie	[MPa]
$\sigma_b$	Biaxiálny súčiniteľ plošnej anizotropie	[-]
$\sigma_K$	Napätie na medzi klzu	[MPa]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z,$	Zložky normálového napätia	[MPa]
$\sigma_\alpha$	Súčiniteľ plošnej anizotropie (podľa modifikovaného vzťahu)	[-]
$\tau_x, \tau_y, \tau_z,$	Zložky šmykového napätia	[MPa]
$\varphi$	Skutočná logaritmická deformácia	[-]
$\varphi_0$	Posun krivky spevnenia	[-]
$\varphi_1$	Hlavná logaritmická deformácia	[-]
$\varphi_2$	Vedľajšia logaritmická deformácia	[-]
$\varphi_b$	Logaritmická deformácia v smere šírky vzorky	[-]
$\varphi_s$	Logaritmická deformácia v smere hrúbky vzorky	[-]
$\dot{\varphi}_{str}$	Stredná rýchlosť logaritmickkej deformácie	[s <sup>-1</sup> ]

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Príklady dielcov vyrobených technológiou hydroformovania [4, 5, 6, 7] .....	9
Obr. 2 Riešený dielec .....	10
Obr. 3 Rozdelenie metód hydroformovania [11] .....	11
Obr. 4 Princíp nízkotlakového hydroformovania [11] .....	12
Obr. 5 Princíp viactlakového hydroformovania [18] .....	12
Obr. 6 Princíp vysokotlakového hydroformovania [19] .....	12
Obr. 7 Komponenty vytvorené mikro-hydroformovaním [21] .....	13
Obr. 8 Princíp metódy Hydroform [24] .....	14
Obr. 9 Princíp metódy ASEA s membránou [23] .....	14
Obr. 10 Princíp prostého hydromechanického ťahania [25] .....	15
Obr. 11 Metódy hydromechanického ťahania [11] .....	15
Obr. 12 Princíp vypínania plechu kvapalinou [12] .....	15
Obr. 13 Princíp metódy Flexform [26] .....	16
Obr. 14 Princíp metódy Wheelon [27] .....	16
Obr. 15 Princíp paralelného hydroformovania [28] .....	16
Obr. 16 Možnosti prívodu tvárniacej kvapaliny medzi plechy [29] .....	17
Obr. 17 Vznik Lüdersovej deformácie pri ťahovej skúške [32] .....	18
Obr. 18 Schematické zobrazenie K-G diagramu medznej tvárniteľnosti [34] .....	19
Obr. 19 Príklady bežne používaných deformačných sietí [17] .....	20
Obr. 20 Pretvorenie kruhových elementov pri metóde pretvorenia sietí [3] .....	20
Obr. 21 Schematické zobrazenie K-G diagramu s deformačnými stopami [35] .....	21
Obr. 22 Geometria vzoriek pre určovanie FLC ťahovou skúškou [33] .....	21
Obr. 23 Princíp hydraulickej skúšky [38] .....	21
Obr. 24 Skúška podľa Nakajimy [39] .....	22
Obr. 25 Skúška podľa Marciniaka [41] .....	22
Obr. 26 Príklad rozloženia orientačných značiek – ARGUS [44] .....	23
Obr. 27 Výstup z merania systémom ARGUS [42] .....	23
Obr. 28 Merací systém ARAMIS [43] .....	23
Obr. 29 Závislosť presnosti riešenia na počte prvkov [49] .....	24
Obr. 30 Základné typy jedno, dvoj a trojdimenzionálnych elementov [47] .....	25
Obr. 31 Zmluvná závislosť napätie – deformácia [46] .....	28
Obr. 32 Schematické porovnanie skutočnej a zmluvnej závislosti [32] .....	29
Obr. 33 Základné materiálové modely používané v MKP [11] .....	29
Obr. 34 Spôsob odberu vzoriek pre zisťovanie anizotropie ťahovou skúškou [11] .....	30
Obr. 35 Vplyv anizotropie na podmienku Hill 1948 [52] .....	31
Obr. 36 Aplikácia PAM-STAMPU pri analýze ohýbania trubiek [54] .....	32
Obr. 37 Hydroformovaný dielec .....	33
Obr. 38 Lisovací prípravok .....	33
Obr. 39 Skúšobný stroj ZD40 [1] .....	34
Obr. 40 Geometria a rozmery skúšobného telesa .....	34
Obr. 41 Zmluvný diagram napätie – deformácia oceli DC01 pre vzorky TI až TV .....	35
Obr. 42 Skutočný diagram napätie – deformácia oceli DC01 .....	36
Obr. 43 Skúšobné teleso pre merania anizotropie ťahovou skúškou .....	36
Obr. 44 Grafická závislosť súčiniteľa plošnej anizotropie na smere odoberania vzorky .....	37
Obr. 45 Porovnanie rôznych anizotropných podmienok plasticity pre oceľ DC01 .....	38
Obr. 46 Podmienka plasticity Vegter Lite pre oceľ DC01 .....	38
Obr. 47 Porovnanie diagramu $\sigma - \varphi$ získaného experimentom a aproximáciou .....	39
Obr. 48 Predikcia FLC vytvorená pomocou ESI MAT-WIZARD .....	40
Obr. 49 Geometrický model nástroja a polotovaru .....	40

Obr. 50	Analýza porušenia tvárneného plechu pomocou FLD .....	41
Obr. 51	Kritické miesta výlisku podľa vzdialenosti bodu v FLD od FLC.....	42
Obr. 52	Rozloženie hrúbky steny tvárneného plechu .....	42
Obr. 53	Rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia .....	43
Obr. 54	Odpruženie výlisku po odľahčení aplikovaného zaťaženia .....	43
Obr. 55	Lisovací prípravok .....	44
Obr. 56	Zariadenie potrebné pre paralelné hydroformovanie riešeného dielca .....	44
Obr. 57	Porušenie hydroformovaného dielca.....	45
Obr. 58	Hydroformovaný dielec s vyznačenými miestami rezov .....	45
Obr. 59	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 1 .....	46
Obr. 60	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 2 .....	46
Obr. 61	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 3 .....	47
Obr. 62	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 4 .....	47
Obr. 63	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 5 .....	48
Obr. 64	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 6 .....	48
Obr. 65	Zmena hrúbky tvárneného plechu – miesto 7 .....	49
Obr. 66	Tvrdomer Zwick 3212 [11].....	49
Obr. 67	Závislosť tvrdosti na vzdialenosti od stredu zvaru .....	50
Obr. 68	Optimalizované zaoblenie dielca .....	51
Obr. 69	FLD pre optimalizovanú geometriu $R = 7$ mm.....	51
Obr. 70	Kritické miesta výlisku podľa vzdialenosti bodu v FLD od FLC pre $R = 7$ mm .....	52
Obr. 71	Rozloženie hrúbky tvárneného dielca pre $R = 7$ mm.....	52
Obr. 72	Rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia pre $R = 7$ mm .....	53
Obr. 73	Odpruženie riešeného dielca po uvoľnení zaťaženia pre $R = 7$ mm.....	53
Obr. 74	FLD pre optimalizovanú geometriu $R = 9$ mm.....	54
Obr. 75	Kritické miesta výlisku podľa vzdialenosti bodu v FLD od FLC pre $R = 9$ mm .....	54
Obr. 76	Rozloženie hrúbky tvárneného dielca pre $R = 9$ mm.....	55
Obr. 77	Rozloženie efektívnych hodnôt plastického pretvorenia pre $R = 9$ mm .....	55
Obr. 78	Odpruženie riešeného dielca po uvoľnení zaťaženia pre $R = 9$ mm.....	56
Obr. 79	Závislosť tvárniaceho tlaku pri porušení na polomere zaoblenia .....	56
Obr. 80	Hĺbka prelisovania v jednotlivých numerických simuláciách .....	57



## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Chemické zloženie a mechanické vlastnosti ukladnenej ocele DC01 [10].	10
Tab. 2 Informácie o použitých meracích prístrojoch.	34
Tab. 3 Namerané hodnoty z ťahovej skúšky do pretrhnutia vzorky.	35
Tab. 4 Hodnoty súčiniteľov plastickej anizotropie oceli DC01.	36
Tab. 5 Presnosť anizotropných podmienok plasticity.	37
Tab. 6 Parametre pre predikciu FLC pomocou ESI MAT-WIZARD pre ocel' DC01.	39
Tab. 7 Informácie o hrotovom digitálnom mikrometre Mitutoyo.	45

## Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

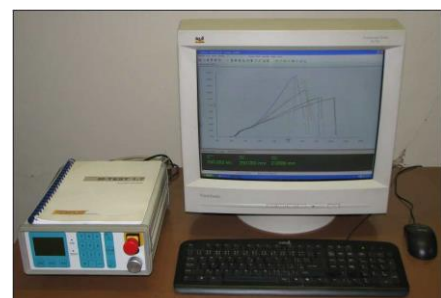
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálu do 400 KN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovu s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1$  % odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

## Meranie súčiniteľov anizotropie

Pre vzorky odobrané v smere valcovania (0°)

- počiatočná meraná dĺžka  $L_0 = 100$  mm

Vzorka	Miesto	Hrúbka		Šírka		Súčiniteľ plastickej anizotropie $r_0$ [-]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]
		Pred skúškou $s_0$ [mm]	Po skúške $s_1$ [mm]	Pred skúškou $b_0$ [mm]	Po skúške $b_1$ [mm]		
AI0	1	1,007	0,953	24,97	22,83	1,664	245,0
	2		0,951		22,62		
	3		0,949		22,55		
	4		0,949		22,58		
	5		0,949		22,77		
	Priemer		0,950		22,67		
AII0	1	1,005	0,950	24,99	22,73	1,664	248,9
	2		0,947		22,58		
	3		0,945		22,60		
	4		0,949		22,64		
	5		0,950		22,87		
	Priemer		0,948		22,684		
AIII0	1	1,003	0,959	24,94	22,83	1,700	248,8
	2		0,948		22,65		
	3		0,946		22,60		
	4		0,944		22,60		
	5		0,946		22,75		
	Priemer		0,9486		22,69		
AIV0	1	0,998	0,939	24,97	22,70	1,623	244,0
	2		0,938		22,53		
	3		0,937		22,54		
	4		0,940		22,60		
	5		0,943		22,80		
	Priemer		0,939		22,63		
AV0	1	0,990	0,937	24,99	23,02	1,604	238,2
	2		0,935		22,74		
	3		0,934		22,70		
	4		0,935		22,74		
	5		0,936		22,88		
	Priemer		0,9354		22,82		
<b>Priemer</b>						<b>1,651</b>	<b>245,0</b>

## Meranie súčiniteľov anizotropie

Pre vzorky odobrané pod uhlom 45° vzhľadom k smeru valcovania

- počiatočná meraná dĺžka  $L_0 = 100$  mm

Vzorka	Miesto	Hrúbka		Šírka		Súčiniteľ plastickej anizotropie $r_{45}$ [-]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]
		Pred skúškou $s_0$ [mm]	Po skúške $s_1$ [mm]	Pred skúškou $b_0$ [mm]	Po skúške $b_1$ [mm]		
AI45	1	0,994	0,933	24,99	23,14	1,272	253,2
	2		0,932		22,97		
	3		0,929		22,94		
	4		0,933		22,96		
	5		0,933		23,11		
	Priemer		0,932		23,02		
AII45	1	1,000	0,934	25,01	23,08	1,216	255,3
	2		0,934		22,90		
	3		0,933		22,89		
	4		0,930		22,92		
	5		0,931		23,06		
	Priemer		0,932		22,97		
AIII45	1	0,998	0,937	25,00	23,09	1,308	251,4
	2		0,935		22,88		
	3		0,934		22,85		
	4		0,936		22,96		
	5		0,936		23,09		
	Priemer		0,936		22,97		
AIV45	1	1,000	0,945	25,01	23,15	1,382	253,0
	2		0,943		22,97		
	3		0,943		22,97		
	4		0,942		23,05		
	5		0,940		23,10		
	Priemer		0,943		23,05		
<b>Priemer</b>						<b>1,295</b>	<b>253,2</b>

## Meranie súčiniteľov anizotropie

Pre vzorky odobrané kolmo na smer valcovania (90°)

počiatočná meraná dĺžka  $L_0 = 100$  mm

Vzorka	Miesto	Hrúbka		Šírka		Súčiniteľ plastickej anizotropie $r_0$ [-]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]
		Pred skúškou $s_0$ [mm]	Po skúške $s_1$ [mm]	Pred skúškou $b_0$ [mm]	Po skúške $b_1$ [mm]		
AI90	1	1,004	0,961	25,00	22,96	1,966	259,3
	2		0,959		22,77		
	3		0,956		22,74		
	4		0,958		22,81		
	5		0,962		22,99		
	Priemer		0,959		22,85		
AII90	1	1,005	0,955	25,03	22,86	1,873	247,3
	2		0,952		22,57		
	3		0,952		22,50		
	4		0,951		22,53		
	5		0,952		22,70		
	Priemer		0,952		22,63		
AIII90	1	1,002	0,945	25,02	22,67	1,748	242,9
	2		0,941		22,40		
	3		0,943		22,50		
	4		0,948		22,58		
	5		0,951		22,90		
	Priemer		0,946		22,61		
AIV90	1	1,004	0,951	25,01	22,62	1,934	247,4
	2		0,949		22,36		
	3		0,953		22,49		
	4		0,956		22,55		
	5		0,950		22,76		
	Priemer		0,952		22,56		
AV90	1	1,006	0,955	25,00	22,70	1,893	254,7
	2		0,952		22,45		
	3		0,952		22,50		
	4		0,953		22,55		
	5		0,956		22,76		
	Priemer		0,954		22,59		
<b>Priemer</b>						<b>1,883</b>	<b>250,3</b>