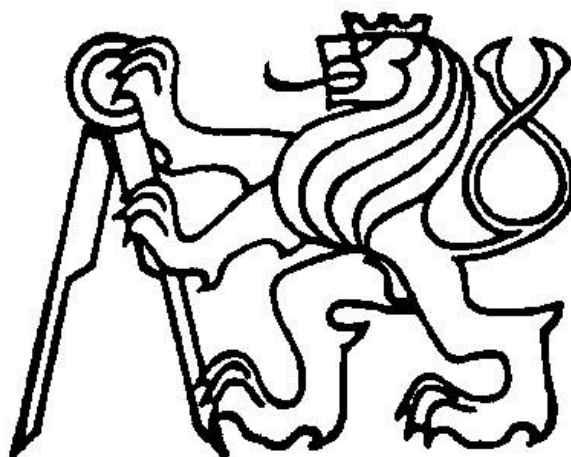


# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Jan Špot

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Špot** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **439009**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Verifikace metodiky měření na experimentálním zařízení**

Název bakalářské práce anglicky:

**Verification of measurement methodology on experimental devices**

Pokyny pro vypracování:

Body k vypracování:

- 1) seznámení s problematikou
- 2) popis zkušebního zařízení a zkušebních vzorků
- 3) realizace experimentu a jeho vyhodnocení
- 4) závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího BP

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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


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


**Ing. Martin Kubelka, ústav strojírenské technologie FS**


Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **10.08.2017**

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

9.5.2017

Datum převzetí zadání

Špot

Podpis studenta

## **Anotační list**

Jméno autora: Jan Špot

Název BP: Verifikace metodiky měření na experimentálním zařízení

Anglický název: Verification of measurement methodology on experimental devices

Rok: 2017

Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

Obor studia: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Ústav: Ústav strojírenské technologie (Ú 12133)

Vedoucí BP: Ing. František TATÍČEK Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran 52

počet obrázků 23

počet tabulek 5

počet příloh 3

**Klíčová slova:** rychlost deformace, tvařitelnost, zkoušky tvařitelnosti

**Keywords:** strain rate, formability, formability tests

### **Anotace:**

Tato bakalářská práce se zabývá možností zkoumání tvařitelnosti na experimentálním zařízení, které vzniklo na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Teoretická část je věnována tvařitelnosti, faktorům které ji ovlivňují, jaké zkoušky se používají a popisu experimentálního zařízení. Praktická část popisuje přípravu vzorků, měření na experimentálním zařízení a srovnání se vzorky získanými na Erichsenově přístroji.

### **Abstract:**

This dissertation delves into the research of possible formability of sheet metal on an experimental device, which was created in the technical faculty of CTU in Prague. The theoretical part of this dissertation is dedicated to formability, factors that affects it, which methodology is used, and a description of the experimental device. The practical part will be dedicated to preparation of samples, measuring on the experimental device and comparison with samples, which were obtained on Erichsens device.

### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zabývající se verifikací metodiky měření na experimentálním zařízení vypracoval zcela samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, jež jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne 9.8.2017

.....

Jan Špot

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. a Ing Martinovi Kubelkovi za cenné rady, připomínky a čas strávený s konzultacemi této práce. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu.

# Obsah

1	Seznam použitých symbolů.....	8
1.1	Seznam základních veličin.....	8
1.2	Seznam základních rozměrů.....	9
1.3	Seznam ostatních zkratk .....	10
2	Úvod.....	11
3	Teoretická část.....	12
3.1	Základní principy tváření.....	12
3.1.1	Tváření za studena.....	12
3.1.2	Plastická deformace.....	13
3.1.3	Skluz.....	13
3.1.4	Dvojčatění.....	14
3.2	Rozdělení technologie tváření.....	15
3.2.1	Objemové tváření.....	15
3.2.2	Plošné tváření.....	16
3.3	Faktory ovlivňující tvařitelnost.....	16
3.3.1	Metalurgické faktory.....	17
3.3.2	Termomechanické faktory.....	17
3.3.3	Stav napjatosti.....	18
3.3.4	Technologické faktory.....	18
3.4	Tvařitelnost.....	19
3.4.1	Zkoušení tahem.....	19
3.4.2	Ukazatele tvařitelnosti za studena.....	20
3.5	Technologické zkoušky hlubokotažných plechů.....	21
3.5.1	Zkouška hloubením dle Erichsena.....	21
3.5.2	Kalíškovací zkouška.....	23
3.5.3	Engelhardt – Grossova zkouška.....	24
3.5.4	Fukuiho zkouška.....	24
3.6	Rychlost deformace.....	25
3.6.1	Rychlost deformace v praxi.....	25
3.7	Tvařitelnost a její hodnocení – FLD diagramy.....	26
4	Praktická část.....	28
4.1	Experimentální zařízení.....	28

4.1.1	Konstrukce experimentálního zařízení.....	28
4.1.2	Nástroje.....	30
4.1.3	Fyzikální popis zkoušky.....	30
4.1.4	Postup práce při realizaci experimentu .....	31
4.2	Zkušební materiály .....	31
4.2.1	Měřicí systémy experimentálního zařízení .....	32
4.3	Návrh metodiky zkoušení na experimentálním zařízení.....	33
4.3.1	Příprava přístřihu.....	33
4.3.2	Zakládání přístřihu do přidržovače.....	35
4.3.3	Zakládání přidržovače .....	35
4.3.4	Provedení zkoušky.....	35
4.3.5	Vyhodnocení měření .....	36
4.4	Vyhodnocení deformací ze zkoušky dle Erichsena.....	36
4.5	Měření na experimentálním zařízení .....	39
4.5.1	Vyhodnocení deformací zkoušky dle modifikovaného Charpyho kladiva .....	39
5	Závěr.....	42
6	Použité zdroje.....	43

# **1 Seznam použitých symbolů**

## **1.1 Seznam základních veličin**

$T_r$  teplota rekrystalizace [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_t$  teplota tavení [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\tau$  smykové napětí [MPa]

$F$  síla [N]

$\sigma$  napětí [MPa]

$R_e$  mez kluzu [MPa]

$R_{p0,2}$  smluvní mez kluzu [MPa]

$R_m$  mez pevnosti v tahu [MPa]

$R$  součinitel plastické anizotropie [-]

$a$  exponent zpevnění [-]

$\varepsilon_r$  rovnoměrná deformace [-]

$\Delta r$  stupeň plošné anizotropie [-]

$r_0$  plošná anizotropie pod úhlem  $0^{\circ}$  [-]

$r_{45}$  plošná anizotropie pod úhlem  $45^{\circ}$  [-]

$r_{90}$  plošná anizotropie pod úhlem  $90^{\circ}$  [-]

$r_m$  normálová anizotropie [-]

$M_{\min}$  součinitel odstupňování tahů [-]

$F_{\text{taž}}$  tažná síla [N]

$F_{\max}$  maximální síla [N]

$T'$  stupeň hlubokotažnosti [%]

$m_f$  součinitel tažení [-]

$v$  ukazatel stavu napjatosti [-]



$\dot{\epsilon}$  rychlost deformace [ $s^{-1}$ ]  
 $\dot{\epsilon}(t)$  smluvní rychlost deformace [ $s^{-1}$ ]  
 $e, \epsilon$  deformace [-]  
 $t$  čas [s]  
 $W_p$  potenciální energie [J]  
 $K$  nárazová práce [J]  
 $A$  tažnost [%]  
 $\bar{r}$  součinitel plastické anizotropie [-]  
 $\varphi_{1,2}$  skutečné deformace [-]  
 $C$  pevnostní konstanta [-]  
 $n$  exponent deformačního zpevnění [-]  
 $m$  součinitel vlivu deformační rychlosti [-]

## 1.2 Seznam základních rozměrů

$\Delta L$  změna délky [mm]  
 $h$  hloubka (prohloubení) [mm]  
 $H$  výška [mm]  
 $\alpha$  úhel natočení [ $^\circ$ ]  
 $\beta$  úhel překmitnutí [ $^\circ$ ]  
 $l_0$  předdeformační stav [mm]  
 $l_1$  hlavní deformace [mm]  
 $l_2$  vedlejší deformace [mm]  
 $t$  tloušťka plechu [mm]  
 $d$  průměr [mm]

$D_{0\max}$  maximální průměr [mm]

r délka ramena [mm]

### **1.3 Seznam ostatních zkratk**

C chemické značení uhlíku

N chemické značení dusíku

S chemické značení síry

Mn chemické značení manganu

Ti chemické značení titanu

$l_{1,2,3}$  označení deformovaných kružnic vlevo od trhliny

$p_{1,2,3}$  označení deformovaných kružnic vpravo od trhliny

## **2 Úvod**

V dnešní době je vytvářena snaha o co nejvyšší produktivitu a přesnost výrobků. To se týká i oblasti plošného tváření, která je nezbytnou součástí například automobilového průmyslu. Vyšší produktivity je dosahováno automatizací a zkracováním strojních časů. U lisování např. karoserie automobilu je zkrácení strojního času podmíněno vyšší rychlostí deformace materiálu. To ovšem přináší potřebu zkoumat chování materiálu na různé rychlosti deformace. Zkoušky materiálů pomáhají ke snížení zmetkovitosti výlisků a napodobením tvářecího procesu zkoumají možnosti využití. Standardně používané zkoušky však dostatečně neumožňují posouzení citlivosti materiálu na rychlost deformace, a tak vznikla potřeba poohlédnout se po něčem novém.

V předchozích letech bylo za tímto účelem na Ústavu strojírenské technologie FS ČVUT v Praze navrženo a zkonstruováno experimentální zařízení, které vychází z principu zkoušky rázem v ohybu dle Charpy, též Charpyho kladiva. To je díky své konstrukci schopno docílit různých rychlostí deformace, které se dále zkoumají a vyhodnocují.

Tato bakalářská práce se bude zabývat možnostmi využití tohoto zařízení pro vyhodnocení tvařitelnosti a to ve srovnání s hojně rozšířenou zkouškou tvařitelnosti podle Erichsena. Porovnání bude provedeno na různých šaržích materiálu jakosti DC06.

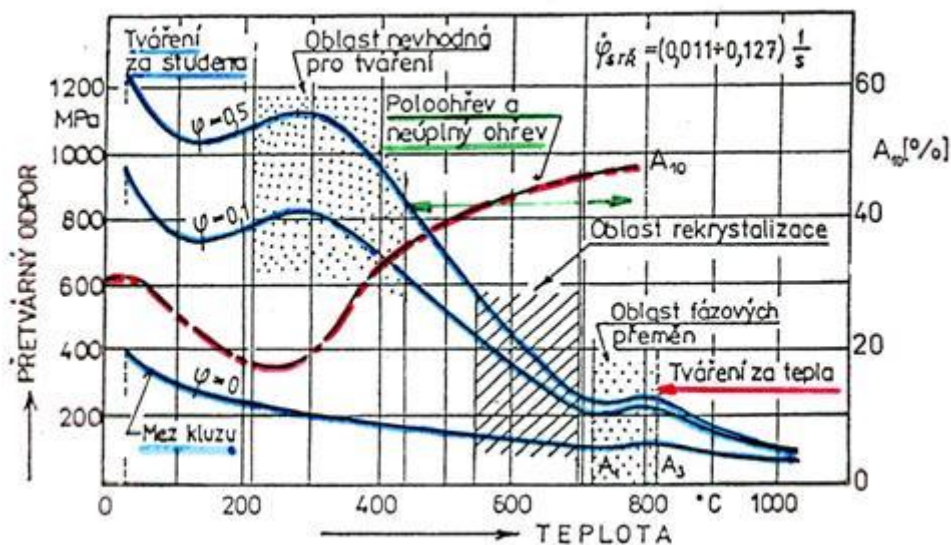
### 3 Teoretická část

V této části bude popsán proces tváření a k čemu dochází v tvářeném materiálu. Dále budou rozebrány faktory ovlivňující tvařitelnost a různé zkoušky, kterým se tvářený materiál podrobuje. Speciální kapitola je pak věnována popisu experimentálního zařízení.

#### 3.1 Základní principy tváření

Tváření je proces, při kterém dochází k fyzikálním a strukturálním změnám materiálu, v důsledku působení vnějších sil. Základem je deformace materiálu. Podle velikosti namáhání rozdělujeme deformace na elastické a plastické, kdy je překročena mez kluzu daného materiálu a materiál zůstává trvale deformován. Podstatou tváření je tedy vznik plastické deformace. Proti probíhající deformaci materiálu působí tzv. přetvárný odpor.

Základním rozdělením tvářecích operací je rozdělení podle teploty na tváření za tepla a tváření za studena. Rozdělení probíhá podle teploty rekrytalizace.  $T_r \geq (0,35 \div 0,45)T_t$  [1] Do teploty rekrytalizace mluvíme o tváření za studena, nad teplotou rekrytalizace o tváření za tepla (viz. obr. 1). [1,2,3,10]



Obrázek 1 - Rozdělení tvářecích procesů dle teploty [15]

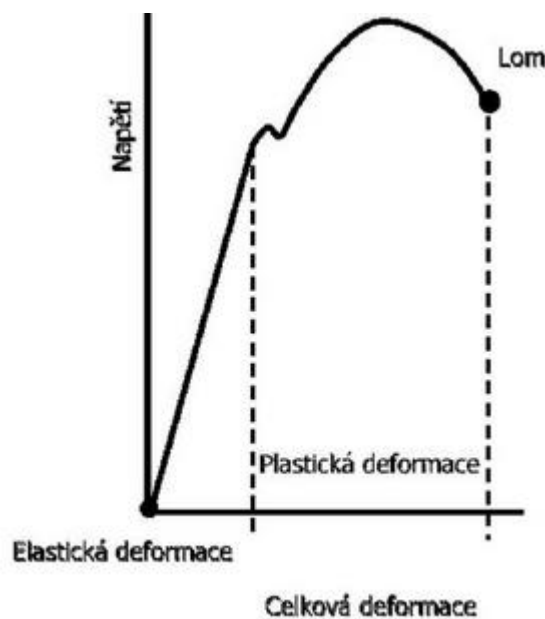
##### 3.1.1 Tváření za studena

Tváření za studena se koná pod rekrytalizační teplotou daného materiálu. Je provázeno zpevňováním materiálu a dochází k deformaci zrn ve směru tváření. Zpevňování je definováno jako odpor proti pohybu dislokací v krystalové mřížce. Deformačním zpevněním se nazývá

stav, kdy překážkou proti pohybu dislokací jsou další dislokace. Při zpevňování rostou hodnoty meze kluzu a plasticity, naopak klesá tažnost. Pro tváření za studena je potřeba využití velké tvářecí síly. Jednou z výhod této operace je i kvalita povrchu, na kterém se nevyskytují okraje a je dosahováno vysoké přesnosti. Nevýhodou je omezená tvárnost materiálu a jeho nerovnoměrné zpevňování. [4,5,2]

### 3.1.2 Plastická deformace

Plastické deformaci vždy předchází deformace elastická. Až po překročení meze kluzu, tedy v oblasti, kde již neplatí Hookův zákon, dochází k plastické deformaci. Projevuje se tím, že už neplatí přímá úměrnost mezi zatížením a deformací. Plastická deformace kovů nemůže být způsobena normálovým napětím  $\sigma$ , ale pouze smykovým napětím  $\tau$ . Působením vnějších sil dochází k trvalému posuvu atomů z jejich rovnovážných poloh o větší vzdálenost, než je hodnota mřížkové konstanty. Atomy se posouvají ve směru nejmenšího odporu, nebo kde jim brání nejméně dislokací, o čemž již bylo zmíněno. Rozeznáváme dva základní mechanismy plastické deformace a to skluz, nebo-li translaci a dvojčatění. [4,8]

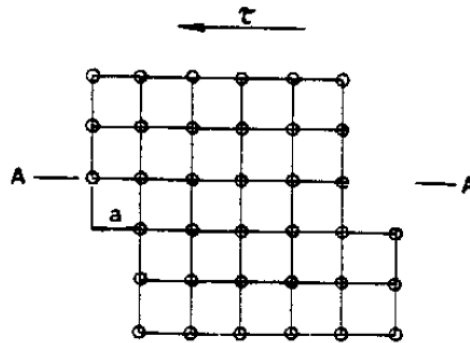


Obrázek 2 - Tahová zkouška kovového materiálu [31]

### 3.1.3 Skluz

Ke skluzu dochází ve směrech a rovinách, které jsou nejhustěji obsazeny atomy. Tyto roviny se označují jako skluzové roviny. Aby došlo k uskutečnění mechanismu skluzu, je nutné překročit hodnotu kritického skluzového napětí. Toto napětí závisí nejen na typu mřížky, ale i na teplotě a čistotě a skutečnosti, jestli byl materiál již dříve deformován.

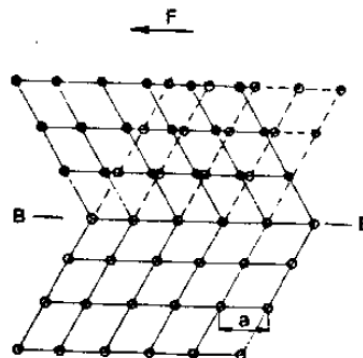
Princip skluzu je zachycen na obrázku č.3, kde A-A je rovina skluzu,  $\tau$  je působící smykové napětí a meziatomová vzdálenost v nezatížené mřížce. [4,8]



Obrázek 3 – Schéma deformace skluzem v dokonalé krystalové mřížce [4]

### 3.1.4 Dvojčatění

Dvojčatění je zvláštním případem skluzu, typický pro velmi nízké teploty a velké rychlosti deformace. Hodnota kritického napětí pro dvojčatění je vyšší než hodnota kritického skluzového napětí, proto dochází primárněji k deformaci skluzem. Mechanismus dvojčatění vypadá tak, že se atomy přemisťují jen o malé meziatomové vzdálenosti, obvykle v řadě rovnoběžných rovin. Schéma je zobrazeno na obr. č.4, kde je patrné vytvoření zrcadlového obrazce vůči neposunuté části mřížky podle roviny B-B, která se nazývá rovinou dvojčatění. Posun je ve směru působící síly F, a-značí opět meziatomovou vzdálenost v nezatížené mřížce. [4,8]



Obrázek 4 - Schéma deformace dvojčatěním [12]

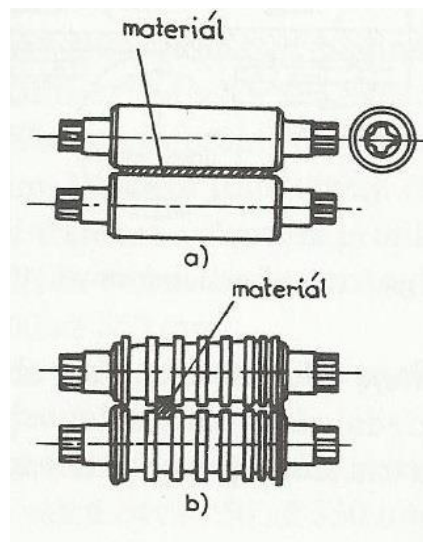
## 3.2 Rozdělení technologie tváření

### 3.2.1 Objemové tváření

Působením vlivu vnějších sil jsou v materiálu vyvolány plastické deformace, které vedou k tomu, že materiál zvětšuje svou plochu povrchu. Deformace jsou ve všech směrech hlavních deformací. Do procesu objemového tváření patří operace kování, válcování, tažení a protlačování.

**Kování** je tváření materiálu působením úderem nebo působením vnější síly. Rozděluje se na volné a zápustkové, kde je materiál zpracováván v jednoúčelných nástrojích, tedy zápustkách. Příkladem volného kování je pýchování, což je operace při níž dochází ke tvarování materiálu konstantní silou, nebo rázem, v ose polotovaru mezi dvěma nástroji. Vhodnými materiály jsou materiály s nízkou mezí kluzu a vysokou tažností.

**Válcováním** rozumíme tváření materiálu pomocí tlaku válců.



Obrázek 5 - Válcování a) hladké válce b) kalibrované válce [33]

**Protlačování** se koná v uzavřené zápustce, je to operace poměrně drahá, jak na vývoj, tak na nástroje. Výhodou však je vysoká přesnost a produktivita. [1,2,8,32]

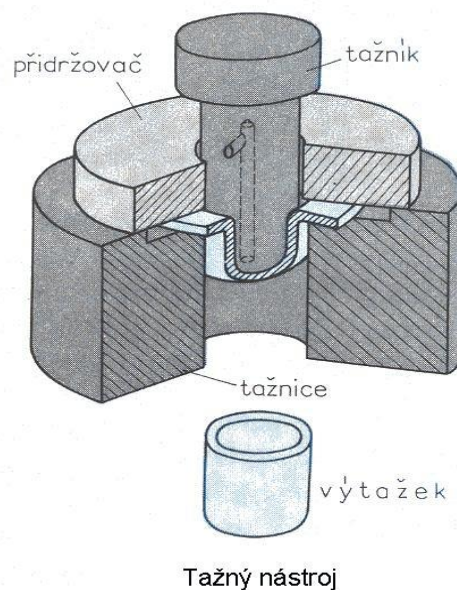
### 3.2.2 Plošné tváření

Při plošném tváření je malá třetí hlavní deformace. Vyskytuje se převážně u tváření plechů. Patří sem operace stříhání, ohýbání a hluboké tažení.

**Stříhání** je oddělování materiálu působením řezných hran, umístěných naproti sobě. Tyto hrany vyvolají v řezné rovině smykové napětí až dojde k porušení. Děje se tomu postupně nebo současně podél hrany stříhu.

**Ohýbání** je deformování materiálu do požadovaného úhlu ohybu. K trvalé deformaci materiálu dochází působením nástroje ohýbadla, který je složen z ohybníku a ohybnice. Vnějšími silami je vyvozen ohybový moment. Místě ohybu, které není namáháno na tah ani tlak, říkáme neutrální osa.

**Hluboké tažení** je tvářecí operací, při které je z rovinného polotovaru (např. přístřížek plechu) v několika operacích vytvořeno duté otevřené těleso (např. kalíšek). [1,2,32]



Obrázek 6 - Hluboké tažení [15]

### 3.3 Faktory ovlivňující tvařitelnost

Pro nás budou důležité faktory, které ovlivňují tvařitelnost při tváření za studena. Jak již bylo zmíněno, tak se rozdělují dva základní typy tvařitelnosti, a to technologická a metalurgická. Abychom zjistili tyto faktory tak se provádí napodobující zkoušky. Mezi nejvíce se projevující faktory patří chemické složení materiálu, struktura, stav napjatosti, rychlost a s ní související



teplota při tvářecím procesu. Neméně podstatná je také anizotropie, která se projevuje při hlubokém tažení geometricky náročným tažníkem. [14]

### 3.3.1 Metalurgické faktory

- Chemické složení – je základním faktorem, neboť se od něj vše odvíjí
  - mají vliv např. na tepelnou vodivost, roztažnost což ovlivňuje technologické parametry ohřevu a tváření
  - ovlivňují teploty fázových přeměn a výsledné struktury, při jejichž nedodržení výrazně ovlivní tvářecí operace
- Struktura – rozděluje se na jednofázovou a dvoufázovou
  - jednofázová struktura – vyšší zpevnění docíleno porušením základní mřížky kovu intersticiálně či substitucí atomy dalších prvků
  - dvoufázová struktura – výrazně snižuje tvařitelnost, zapříčiněná rozdílnými vlastnostmi obou složek a vznikem sraženin na mezifázových rozhraních
- Polotovary – lepší tvařitelnosti dosahují plynule lité polotovary zvané kontislitky, které jsou rychleji ochlazované než ingoty, jelikož mají lepší chemickou i strukturální homogenitu
- Vměstky - vždy zhoršují tvařitelnost
  - nejhorší jsou nízkotající vměstky vyloučené síťovitě na hranicích zrn, protože mohou zapříčinit křehký interkrytalický lom
  - zvyšují anizotropii mechanických vlastností
  - definuje je index tvařitelnosti vměstku, který vyjadřuje poměr mezi deformací vměstku a matrice

[16]

### 3.3.2 Termomechanické faktory

- Rychlost deformace
  - ovlivňuje tvářecí proces
  - obvykle s deformační rychlostí tvařitelnost roste do určitého maxima, po kterém dochází k poklesu

- při vyšších rychlostech deformace, kdy se vytváří deformační teplo, což má obecně nepříznivý vliv na tvařitelnost a dále jí bude věnována ještě pozornost
- Historie deformací – může pozitivně i negativně ovlivnit vlastnosti tvářeného materiálu
  - zahrnuje předchozí deformace a jejich následné zotavování a rekrytalizace
  - neúplná rekrytalizace způsobuje zhoršenou tvařitelnost kovu, tažnost a houževnatost [16,4]

### 3.3.3 Stav napjatosti

Stav napjatosti udává možnosti, jak lze na těleso působit v prostoru. Napětí je veličina, která udává podíl síly na plochu. Napjatostí je poté samotný stav tělesa, který vzniká, když na těleso působíme silami.

Rozdělují se tři základní druhy napjatosti, a to přímková (jednoosá), kdy se jedná o prostý tah, dvojosá a trojosá. Podle směru napjatosti můžeme rozdělit napjatost na tlakovou, kdy výslednice sil směřuje do tělesa a tlakovou. O převaze tlakového či tahového napětí nás informuje bezrozměrný ukazatel stavu napjatosti, popsany následující rovnicí:

$$\nu = \frac{3 \cdot \sigma_8}{S_\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad [6 \text{ str.27}]$$

Tahové napětí je nechtěné v tom, že zvyšuje pravděpodobnost křehkého lomu. Vhodnou volbou napjatosti lze docílit zvýšení tvařitelnosti. Pozitivní vliv na tvařitelnost má vytvoření tlakové napjatosti. [6,18,19]

### 3.3.4 Technologické faktory

**Mazání** tažníku napomáhá k posunutí trhliny od místa kontaktu materiálu s tažníkem k pólu tažníku. Mazání obecně zvyšuje kvalitu povrchu a snižuje tření. Nejvíce je mazání zapotřebí v kontaktu přídržovače a materiálu, naopak co nejméně ze strany tažnice.

Obor, který zkoumá chování dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb se nazývá **tribologie**. [15,28]

**Kinematika pohybu nástroje**, která souvisí s rychlostí deformace.

## 3.4 Tvařitelnost

Tvařitelnost je schopnost materiálu vytvořit požadovaný kvalitativní výrobek plastickou deformací za tepla či za studena, bez makroskopického porušení. Tvařitelnost jednotlivých materiálů je ovlivněna takzvanými okrajovými podmínkami. Do těchto podmínek spadají vlastnosti tvářeného materiálu, tvar nástroje, stykové podmínky nástroje a materiálu, rychlost procesu a spousta dalších. Tvařitelnost je pro náš případ důležitá v tom, neboť se promítá do vad v hlubokém tažení, lisování a obecně plošném tváření. Mezi nejčastější vady patří nestejnorodost výlisků a iniciace trhliny. Z těchto důvodů se vykonávají různé zkoušky, které mají zjistit vlastnosti, které se projevují do jednotlivých tvářecích procesů. Pro nás jsou přednostní zkoušky tvařitelnosti za studena, o kterých bude dále pojednáno. [4,9]

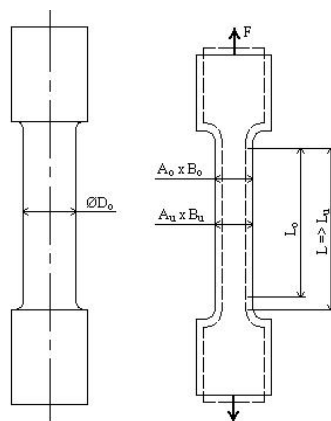
Tvařitelnost je možné rozdělit do dvou skupin – na technologickou a metalurgickou tvařitelnost.

Technologická tvařitelnost, se zabývá technologickými podmínkami, za kterých se uskuteční tvářící operace. Při válcování se zkoumá válcovatelnost, při kování kovatelnost a pěchovatelnost, nás bude zajímat hlavně hluboké tažení – hlubokotažnost.

Metalurgická tvařitelnost spadá do technologické tvařitelnosti. Zabývá se problematikou metalurgických faktorů, které se projevují při technologických operacích, a jejich působením pro teplotní a kinematické podmínky. Do těchto faktorů můžeme zařadit strukturální a chemické složení materiálu a jejich čistota. [14,13,17]

### 3.4.1 Zkoušení tahem

Tato zkouška se využívá k hodnocení plasticity a pevnosti materiálu. Zkouška je normovaná dle ČSN EN ISO 6892-1 a využívá se jak pro obrobená, tak neobrobená zkušební tělesa. Nejčastěji se jako zkušební těleso používá tyč. Princip zkoušky je vytvoření pracovního diagramu  $F=f(\Delta L)$ , kde  $F$  je zátěžná síla a  $\Delta L$  je absolutní prodloužení tyče a skutečného tahového diagramu  $\sigma = f(\varphi)$ , kde  $\sigma$  je skutečné napětí [MPa] a  $\varphi$  je okamžité prodloužení [-]. Zkouška je ukončena lomem zkušební tyče, který nastane až po překročení meze kluzu. U materiálů, které nemají výraznou mez kluzu, se vyhodnocuje smluvní mez kluzu, což je napětí, kterého je dosaženo pro předepsanou hodnotu prodloužení. Z výsledků zkoušky tahem můžeme získat hodnoty kontrakce  $Z[-]$ , tažnosti  $A[-]$ , která by pro hluboké tažení měla být co největší, dále pak pevnostní charakteristiky (mez kluzu  $R_e$  [MPa], popř. smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  [MPa], mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa]). [11]



Obrázek 7- Zkouška tahem [29]

### 3.4.2 Ukazatele tvařitelnosti za studena

Tyto ukazatele určují míru tvařitelnosti. Samotnými ukazateli může být poměrná deformace při válcování, tažení, kování, nebo mezní součinitel při hlubokém tažení a prohloubení při Erichsenově zkoušce. Tyto ukazatelé se zkouší a vyhodnocují podle mechanických zkoušek, které do jisté míry napodobují technologické procesy. Proto se těmto zkouškám též říká napodobující nebo technologické zkoušky a budou dále probrány. [13]

Nejdůležitějšími ukazateli tvařitelnosti jsou:

**Tažnost** se obvykle vyhodnocuje ze zkoušky tahem. Zahrnuje v sobě maximální homogenní deformace  $\varepsilon_r$  a mez difuzní nestability. Čím je mez difuzní nestability větší, tím lepší.

**Mez kluzu** udává, kdy bude počátek plastické deformace, tzn. čím nižší hodnota, tím dříve začne plastická deformace a tím lépe z hlediska tvařitelnosti. Mez kluzu (smluvní)  $R_{p0,2}$  se dává do poměru s mezí pevnosti  $R_m$ . Pro ukazatele tvařitelnosti tedy vystupují společně. Platí pro ně následující vztah:  $0,6 < \frac{R_{p0,2}}{R_m} < 0,8$ , kdy hodnoty blízké 0,6 jsou pro nejlepší hlubokotažné plechy.

**Součinitel plastické anizotropie** je nestejnomyšlností vlastností, hlavně plechů, do různých směrů souřadného systému. Součinitel plastické anizotropie, je definován normou ČSN EN ISO 10113. Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní a je charakterizován třemi ortogonálními osami anizotropie. Jako nulová osa je považována osa x, která je shodná se směrem válcování. Rozhodující vliv pro anizotropii má textura, kterou se rozumí pravidelné geometrické a krystalografické uspořádání struktury polykrystalického kovu. Samotná textura je ovlivněna předchozím tepelným zpracováním materiálu, napět'ovými a deformačními stavy při tváření. Lze tedy říci, že textura je výsledkem tváření. Součinitel anizotropie udává, jak se

materiál ztenčuje při tažení. Pro naše případy hlubokého tažení je vhodné, když je tento součinitel  $r_0$  nejvyšší. **Plošná (rovinná) anizotropie** se obvykle zkoumá pod úhly  $0^\circ$ - $45^\circ$ - $90^\circ$  a výsledné kolísání hodnoty  $r$  způsobuje cípatost výtažků. Čím více bude toto číslo od nuly, tím větší bude riziko vzniku cípů. Vzorec pro výpočet vypadá:

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{45} + r_{90}}{2} \quad [-] \quad [6]$$

Hodnota  $r_0$  je hodnota ve směru válcování a  $r_{45}$  a  $r_{90}$  hodnoty získané pod úhly  $45^\circ$  a  $90^\circ$ . Jako ukazatel pro plastickou anizotropii se udává normálová anizotropie, neboť se stává, že materiál, který vykazuje vysoké hodnoty normálové anizotropie, vykazuje malou plošnou anizotropii.

Průměrnou hodnotu normálové anizotropie udává vztah:  $r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad [-]$

Pokud  $r_m > 1$ , tak se materiál tahem málo ztenčuje, protože má zvýšenou pevnost ve směru tloušťky. Když je  $r_m < 1$ , pak materiál prokazuje náchylnost na ztenčování. Proto je snaha, aby měl materiál tuto hodnotu co největší.

**Komplexní ukazatelé tvařitelnosti** popisují chování materiálu komplexně, dávají do souvislosti více parametrů (např. *tažnost krát součinitel plastické anizotropie krát exponent deformačního zpevnění krát nějaké číslo např. 1000*. Když výsledná hodnota bude vyšší než 300, má materiál dobrou tvařitelnost.). V literatuře je podobných vztahů možné najít více.

[6,14,13,28]

## 3.5 Technologické zkoušky hlubokotažných plechů

### 3.5.1 Zkouška hloubením dle Erichsena

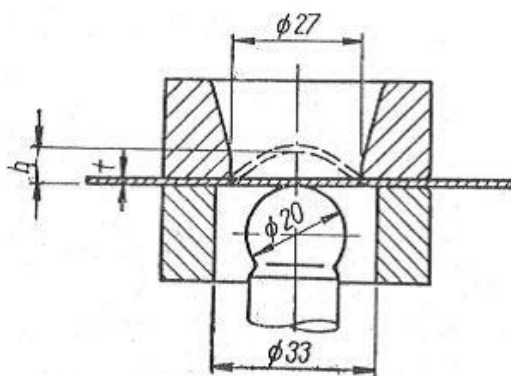
Jedná se o destruktivní zkoušku materiálu. Slouží k vyhodnocení tažnosti plechů a jejich vhodnosti k hlubokému tažení. Zkouška je poměrně hodně rozšířena, neboť je nenáročná, co se týče přípravy plechu, provádění zkoušky a základního vyhodnocení. Nevýhodou však je nekonstantní rychlost tažníku, tedy i rychlost deformací, při ruční obsluze. To může negativně ovlivnit výslednou hloubku  $h$ .

Zkouška je normována dle ČSN EN ISO 20482 v aktuální podobě platná od 05/2014.

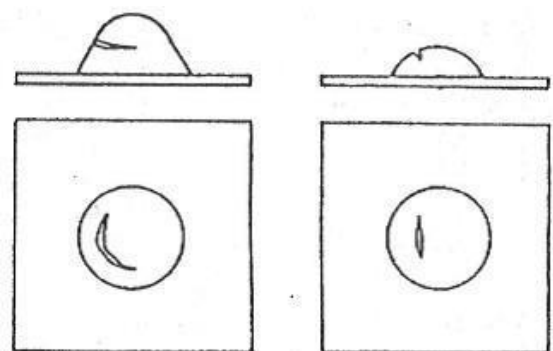


Obrázek 8 - Erichsenův přístroj [30]

Princip zkoušky V prvním kroku je zkoušený plech upnut mezi přidržovač a tažnici. Na stupnici se nastaví nulová hodnota pro pozdější odečet a kulový tažník se začne pomalu sunout, čímž dochází k postupnému protlačování materiálu. Prohlubování se neustále sleduje až do okamžiku vzniku první trhliny v celé tloušťce plechového vzorku, kdy je zkouška ukončena a odečte se hodnota ze stupnice. [26,27]



Obrázek 10 - Princip zkoušky [30]



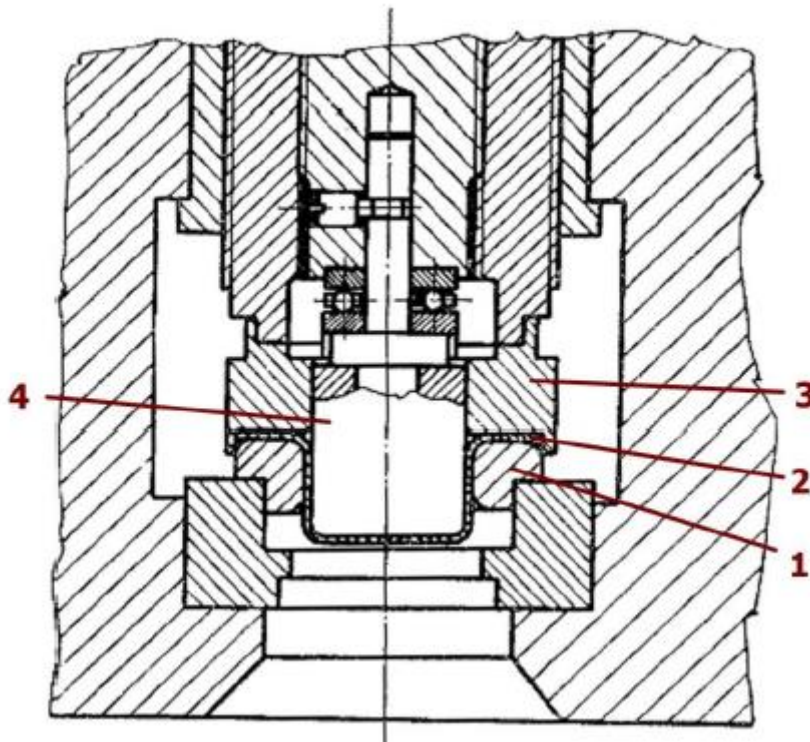
Obrázek 9 - Tvar trhliny [30]

## Vyhodnocování zkoušky

Po ukončení zkoušky se vyhodnocuje velikost prohloubení  $h$ , které indikuje vhodnost plechu pro hluboké tažení. Velikost prohloubení závisí na vlastnostech materiálu plechu, ale i na tloušťce. Rovněž se hodnotí poloha trhliny a její tvar. Buď se jedná o trhlinu podélnou (obr. 9 vlevo), typická pro materiál vhodný pro hluboké tažení, či příčnou. [26,27,30]

### 3.5.2 Kalíškovací zkouška

Známa též jako Schmidtova, či AEG. Jsou pro ni typická tlakově-tahová namáhání, proto se používá převážně pro rotačně symetrické tvary výtažků. Principem zkoušky je postupné vtlačování kruhových přístřihů (kalíšků) o různých průměrech. Výsledkem zkoušky je mezní součinitel odstupňování tahů:  $M_{min} = \frac{d}{D_{0max}}$  Důležité je  $D_{0max}$ , což je maximální průměr kruhového přístřihu, ze kterého je možné vyjmout válcový výtažek bez porušení. Výhodou je vznik cípů, které při změření odkazují na plošnou anizotropii zkušebního plechu. [17]



Obrázek 11 - Schéma kalíškovací zkoušky, 1 - tažnice, 2 - plech, 3 - přidržovač, 4 - tažník [12]

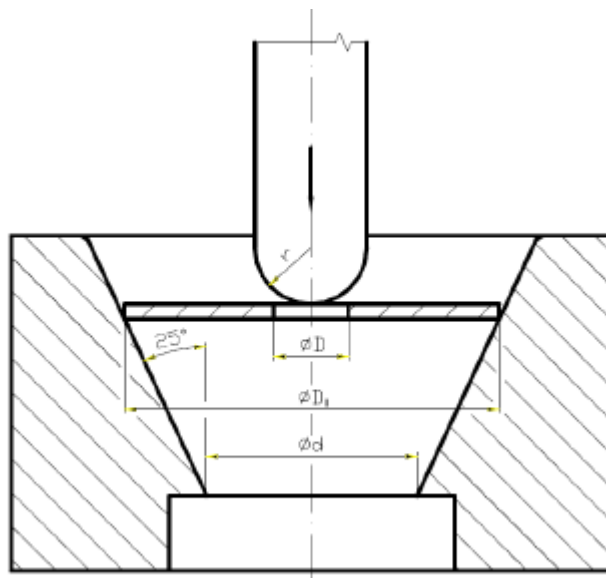
### 3.5.3 Engelhardt – Grossova zkouška

Někdy nese označení TZP, podle německého Tiefziehprüfung. Jedná se o speciální případ zkoušky kalíškovací. Podstatou zkoušky je měření tažné síly a její zaznamenávání při tažení kalíšku. Nejdřív je vystřížen přístřih, který je následně tažen s přidržovačem až je překročena maximální tažná síla  $F_{taž}$ . Poté dojde k sevření zbývající části příruby a tažník se pohybuje až do odtržení dna kalíšku při síle  $F_{max}$ . Z následujícího vztahu se, jako výsledek zkoušky, dopočte přirozený stupeň hlubokotažnosti  $T'$ . 
$$T' = \frac{F'_{max} - F_{taž}}{F'_{max}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Pro kvalitní plechy, určené k hlubokému tažení, by měl být stupeň hlubokotažnosti  $T'$  větší než 40%. [17]

### 3.5.4 Fukuiho zkouška

Podstatou zkoušky je tažení kruhového přístřihu plechu s otvorem umístěným uprostřed (možnost i bez) kulovou tažnicí. Zkouška končí v okamžiku iniciace trhliny na hraně otvoru popřípadě dně drážky. Při zkoušce není použit přidržovač. Ve výsledku se hodnotí součinitel tažení  $m_f$ , který je vyjádřen vztahem  $m_f = \frac{d}{D}$ , kde  $d$  je největší průměr, kdy vznikne trhlina a  $D$  je průměr přístřihu. [12]



Obrázek 12 - Schéma Fukuiho zkoušky [12]



## 3.6 Rychlost deformace

V současné době, kdy dochází k automatizaci, je snaha docílit co nejvyšší produktivity. Té se dosahuje kontinuálností procesu a co možná nejkratších strojních časů. V procesu tváření obnáší snížení strojního času vyšší rychlost deformace materiálu.

Při tvářicích procesech nemusí rychlost pohybu nástroje odpovídat rychlosti deformace jako například při lisování. Rychlost deformace je však rychlostí nástroje ovlivněna. Dále jí ovlivňuje přetvárný odpor materiálu, tvařitelnost, stabilita plastického toku materiálu a jiné. Rychlost deformace je možné vyjádřit jako derivaci deformace podle času, tedy:

$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  [20]. Se zvyšováním rychlosti deformace roste i tvařitelnost, po vyčerpání plasticity však klesá. [20,29]

### 3.6.1 Rychlost deformace v praxi

V praxi se zkoumá časově závislá smluvní rychlost deformace  $\dot{\epsilon}(t)$ . Ta podává informace o změně rychlosti deformace během průběhu zkoušky a je důležitá pro učení, zda bylo dosaženo plánované rychlosti deformace na mezi kluzu.

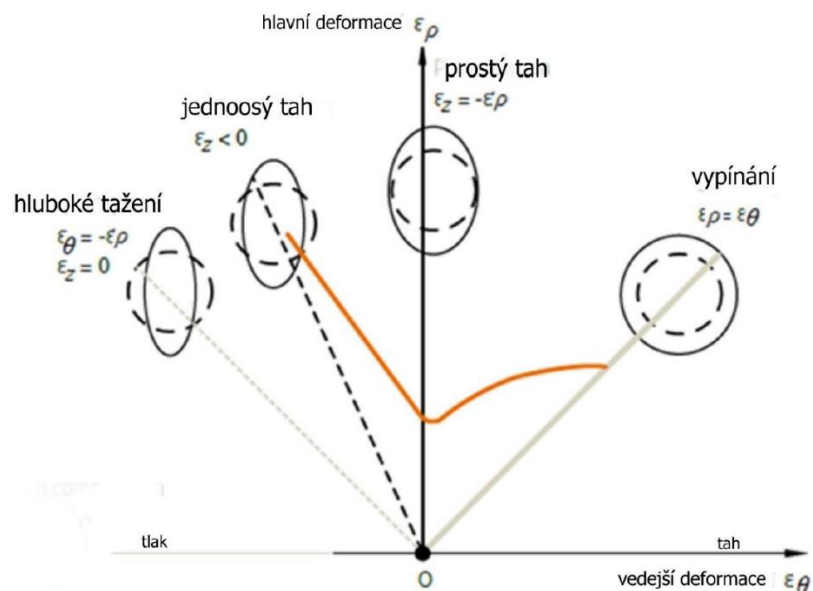
Následující poznatky platí pro zkoušku tahem:

Pracuje se s tzv. Křivkou zpevnění, která je popsána rovnicí  $\sigma_t = C \cdot \epsilon_t^n$ , kde  $C$  je pevnostní konstanta a  $n$  exponent deformačního zpevnění. Tento vztah se zlogaritmuje:  $\log \sigma = \log C + n \cdot \log \epsilon$ , což dává rovnici přímky.

Vliv rychlosti deformace na přetvárný odpor (schopnost materiálu vzdorovat plastické deformaci [MPa]) aproximuje vztah  $\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m$ , kde  $C$  je pevnostní konstanta,  $m$  součinitel vlivu deformační rychlosti. Ten se odečte z vytvořeného grafu. Tím pádem jsme již schopni dostat rychlost deformace. [22,28]

### 3.7 Tvařitelnost a její hodnocení – FLD diagramy

Tvařitelnost lze vyhodnocovat pomocí diagramu mezních přetvoření, který se označuje také jako FLD (Forming limit diagram), či diagram mezní tvařitelnosti. Stanovení křivek mezní tvařitelnosti probíhá dle normy ČSN EN ISO 12004-2 (42 0434), platné od 1.6.2009. Tento diagram je důležitý při technologických operacích lisování. Diagram ukazuje kritické hodnoty hlavních a vedlejších napětí – deformací. Obecně může rozlišovat hodnoty deformací, které jsou bezpečné, které jsou na mezi plastické stability a na ty, které vedou k porušení. Přechod mezi oblastí bezpečných deformací a deformací vedoucích k porušení se nazývá křivkou mezní tvařitelnosti, která nese označení FLC. Křivka se určuje experimentálně a slouží k tomu dva různé postupy.



Obrázek 13 - FLD diagram [12]

První metoda zkoumá a analyzuje deformace vadných produktů v lisovnách. Značnou nevýhodou této metody je, že nejsou obvykle známy přesné průběhy dosažení výsledné deformace. Mezní tvařitelnost tak závisí na vlastnostech materiálu, technologickém postupu a součásti. Tato metoda vychází z normy ISO 12004-1.

Druhá metoda stanovuje mezní křivky tvažitelnosti v laboratorních podmínkách. Pro vyhodnocení se využívá jedné křivky mezní tvažitelnosti v různých stavech deformace. Je kladen důraz, aby průběhy deformací měly lineární charakter. Tato metoda se doporučuje k charakterizování materiálu.

Křivky mezní tvažitelnosti závisí převážně na mechanických vlastnostech materiálu a jeho tloušťce. Vhodné je, když zjištěné body leží pod FLC křivkou, ne však moc nízko, neboť pak dochází k přechování a vlnění materiálu. Spolu s dalšími parametry se křivka používá k porovnání tvažitelnosti různých materiálů

[21,22,12]

## **4 Praktická část**

V této stati bude pojednáno o samotném měření a co měření předcházelo. Zaměření bude hlavně na metodiku měření na experimentálním zařízení, neboť zkouška dle Erichsena je běžně užívána a normována. Dále zde bude probráno provedení zkoušky a vyhodnocení jednotlivých měření.

### **4.1 Experimentální zařízení**

Zkouška hloubením dle Erichsena není dostatečně schopna poskytnout informace pro posouzení vlivu různých rychlostí deformace na chování materiálu. Proto vzniklo experimentální zřízení, které vychází z Charpyho kladiva, kde je možno sledovat citlivost materiálu na různé rychlosti deformace. Zařízení se snaží napodobit proces plošného tváření. [14]

#### **4.1.1 Konstrukce experimentálního zařízení**

Samotná konstrukce vychází ze zařízení pro materiálové zkoušky rázem v ohybu dle Charpy. Nosnou konstrukci tvoří tuhý rám, který je složen ze svařených U profilů. Do rámu je zasazen, radiálně i axiálně zajištěn hřídel, který je schopen konat rotační pohyb. Na hřídeli je umístěn vyměnitelný zkušební nástroj v podobě tažníku s kulovým koncem. Celé experimentální zařízení je ukotveno pomocí šroubů k podlaze. Rychlost deformace se ovlivní výchozím nastavením výšky nástroje, respektive úhlu ramene. Poté díky gravitačnímu zrychlení, nabírá nástroj rychlost. Konstrukce umožňuje dosáhnouti jen takové rychlosti, která nepřekročí rychlost šíření zvuku v kovech, neboť tato rychlost vede k uplatnění jiných mechanismů pro šíření trhliny. [14]



*Obrázek 14 - Modifikované Charpyho kladivo*

### 4.1.2 Nástroje

Nástroj, umožňující simulaci lisovacího procesu, na sobě nese snímací systém, který je schopen poskytovat informace o průběhu deformace a výsledky zaznamenává.

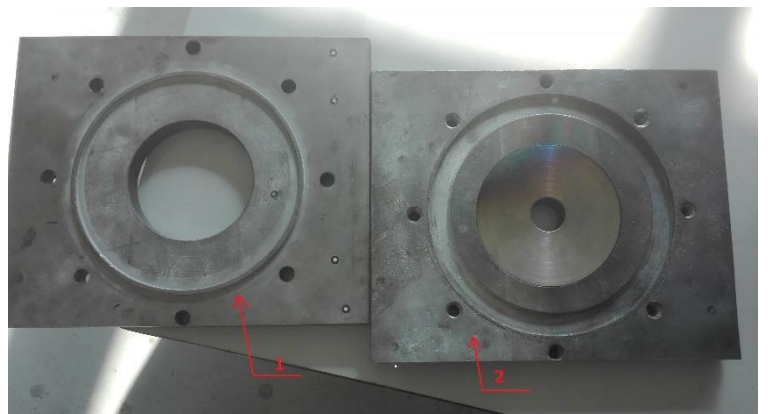
Použití dělené hlavy umožňuje výměnu nástroje a jeho záměnu za různé typy, které mohou simulovat jednotlivá specifika lisovacích procesů.

Pro naše měření byl použit kuželovitý tažník s kulovým zakončením, který je upnut v dělené hlavě pomocí matice M60. Ta vymezuje jeho axiální a radiální vůli.

Statickým nástrojem je sestava tažnice a přídržovače, kam se upíná zkušební vzorek. Tažnice slouží k tvarování vzorku přes tažnou hranu, přídržovač pak k upnutí vzorku. Pro upnutí vzorku mezi horní a dolní přírubu, slouží 7 šroubů M12, jejichž utažením se vzorek uvnitř vhodně sevře. Jak tažník, tak tažnice jsou vyrobeny z nástrojové oceli.



Obrázek 16 – Dělená hlava s tažníkem



Obrázek 15 – Sestava tažnice a přídržovače, 1 – svrchní část, 2 – spodní část

### 4.1.3 Fyzikální popis zkoušky

Vyzvednutí kladiva do výšky  $H$  a tím pádem jeho natočení do úhlu  $\alpha$ , mu dodá potenciální energii  $W_{p1} = G.H$ . Velikost této energie limituje konstrukce zařízení. Po uvolnění kladiva z výchozí polohy a jeho následném pohybu, se přeměňuje potenciální energie na kinetickou s platností zákona zachování mechanické energie. Při dopadu část energie vykoná nárazovou práci  $K = G(H - h)$ . Je patrné, že její velikost je závislá na výšce  $h$ , což je výška, do které

kladivo překmitne po porušení zkušební vzorku a pootočí se tak o úhel  $\beta$ . Velikost nárazové práce je tedy rozdíl potenciálních energií.

$$K = W_{P1} - W_{P2} = G \cdot (H - h) = G \cdot [(r + h_1) - (r - h_2)] = G \cdot r \cdot (\cos\beta - \cos\alpha) [J]$$

[14,23,9]

#### 4.1.4 Postup práce při realizaci experimentu

- 1) Příprava materiálu
- 2) Uložení nasíťovaného přístřihu do sestavy tažnice a přidržovače
- 3) Uložení sestavy tažnice a přidržovače do experimentálního zařízení
- 4) Vymezení vůlí
- 5) Spuštění programu CharpyPlech
- 6) Natočení (zdvih) kladiva o požadovaný úhel
- 7) Spuštění kladiva
- 8) Vyjmutí sestavy a následné vyjmutí vzorku

## 4.2 Zkušební materiály

Zkušebním materiálem jak pro zkoušku dle Erichsena, tak pro experimentální zařízení, byl hlubokotažný plech s označením DC06+ZE50/50-B-PO (dále jen DC06). Je to ušlechtilá legovaná nízkouhlíková feritická ocel mikrolegovaná titanem. Titan má funkci karbonitridačního stabilizátoru k úplnému vyčištění feritu od intersticiálně rozpuštěného C a N. Snížení obsahu C a N vede ke zvýšení normálové anizotropie a tím zlepšuje hlubokotažnost. Vliv anizotropie na hlubokotažnost byl již probrán v předchozích kapitolách. ZE 50/50 uvádí, že se jedná o materiál, který je elektrolyticky pozinkován na tloušťku 0,05 mm.

*Tabulka 1 chemické složení materiálu DC06*

Chemické složení materiálu DC06 ZE50/50BPO				
C	P	S	Mn	Ti
0,02 %	0,02 %	0,02 %	0,25 %	0,30 %

Tabulka 2 mechanické vlastnosti materiálu DC 06

Mechanické vlastnosti materiálu DC06 ZE50/50BPO				
Re	Rm	A 80	$\bar{r}$	$\bar{n}$
[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[-]
120 - 190	270 - 350	min 37	min 1,8	min 0,2

[24]

#### 4.2.1 Měřicí systémy experimentálního zařízení

V předchozích letech byl vytvořen snímací systém CharpyPlech, který je navržen tak, aby bylo možno sledovat dynamické zkoušky plechů za různých rychlostí deformace. Jak již bylo zdůrazněno, rychlost nástroje je závislá na výstupním úhlu natočení. Proto je systém opatřen členem pro záznam úhlu natočení kyvadla v podobě úhlového potenciometru 2123A firmy KISTLER.

Dalším členem systému je člen deformační v podobě můstku z polovodičových tenzometrů s odporem 350  $\Omega$  firmy VTS Zlín. Mezi tenzometrickým můstkem a měřicí kartou je zesilovač s možností nastavení zesílení 100x a 200x. Při nastavení zesílení je nutné zvolit vhodnou kalibrační křivku, nebo ji vytvořit. Neméně podstatnou komponentou systému je měřicí karta Advantech 1712L-AE se samostatnou kalibrací včetně A/D převodníku pro vzorkovací frekvenci až 1MHz.

Systém je napájen za použití napájecího adaptoru SYS1308-2424-W2E se stabilizovaným výstupem napětí 24 V a proudu 1A.

Systém je ovládán aplikací, která získává data, která se dále vyhodnocují v programu MS Excel.

[14]



## 4.3 Návrh metodiky zkoušení na experimentálním zařízení

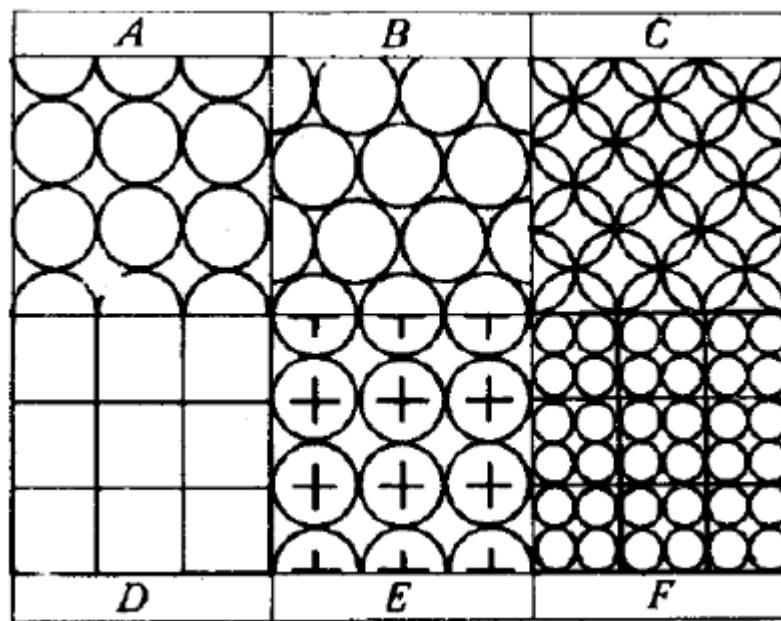
Zde se již budeme zabývat posloupností kroků, které vedly k provedení zkoušky.

### 4.3.1 Příprava přístřihu

V prvé řadě bylo nezbytné plechy odmastit a zbavit nečistot pomocí ředidla. Tento krok je nezbytný, aby mohl být plech opatřen deformační sítí.

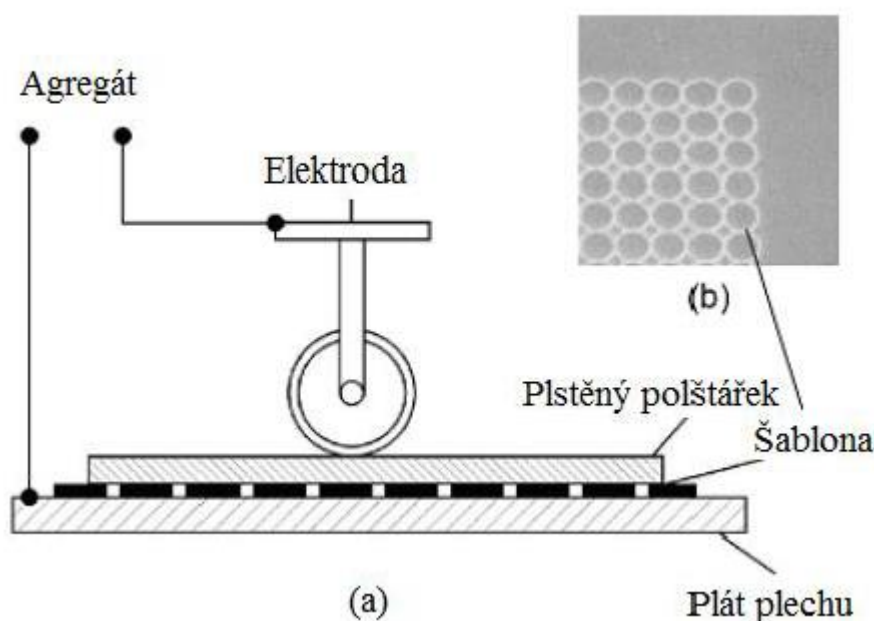
#### 4.3.1.1 Sít'ování plechu

Vytváření deformačních sítí na povrch plechu je nezbytné pro deformační analýzu. Nanesená síť v podobě geometrických obrazců se při zkoušce deformuje a poskytuje tak cenné informace o průběhu napětí a směrů, které vedly k přetvoření zkoumaného vzorku. Geometrických tvarů sítí je spousta, nejčastější však jsou kruhového charakteru, který byl použit i pro náš případ. Nejběžnější typy sítí jsou zachyceny na obrázku č. 17. [7,25]



Obrázek 17 - Příklady typů různých sítí používaných v praxi [7]

Způsobů nanášení deformačních sítí je také více. V našem případě bylo využito **elektrochemického leptání** sítí, jednak díky své jednoduchosti, finanční nenáročnosti, ale také nedochází k narušení plechu a síť je během deformace celkem odolná. Princip metody je vyobrazen na obr. č. 16.



Obrázek 18 - (a) Základní princip, (b) Příklad šablony [7]

V prvním kroku se na plech položí šablona sítě, která se zakryje plstěným polštářkem, který je nasycen vhodným elektrolytem. Elektrolyt se volí podle typu materiálu, v našem případě byl použit elektrolyt 639 firmy Östling Marking Systems GmbH s číslem produktu 11526390. Poté se plech připojí na zdroj, vybavený přepínačem stejnosměrného a střídavého proudu s napětím do 50V, které se volí podle velikosti šablony. Naše síťování proběhlo s napětím 24V. Následuje zapojení elektrody (z grafitu) do zdroje a pohybem elektrody po polštářku se začne leptat. Tlakem válce je elektrolyt vytlačován na šablonu a dochází k naleptání plechu. Hloubka závisí na času leptání. V poslední fázi je plech omyt od zbytků elektrolytu a nechán okapat.

Dalším způsobem, jak je možno nanést deformační síť je sítotisk, který tkví v protlačení vhodného inkoustu sítkou, převážně z hedvábí. Nejpřesnější metodou nanášení sítě je pomocí laseru, je však finančně náročnější a relativně pomalá. Dále existují například ryté sítě, sítě vytvořené pomocí gumostereotypie (razítko z pryže), fotochemické leptání (potřeba UV záření) a vyjiskřování. [7]

Již nasíťované plechy byly už jen upraveny pomocí hydraulických nůžek na požadované rozměry, tedy pro zkoušku dle erichsena na obdélníkový tvar a pro experimentální zařízení kruhový tvar průměru 200 mm.



*Obrázek 19 - Zdroj použitý pro síťování*

### **4.3.2 Zakládání přístříhu do přidržovače**

Jak již bylo zmíněno vzorek se upne do sestavy přidržovače. Upíná se rovnoměrně pomocí 7 šroubů ISO 4017 M12, které se dotahují momentovým klíčem. Rovnoměrné dotahování způsobí, že se vzorek správně vytvaruje přes tažnou hranu.

### **4.3.3 Zakládání přidržovače**

Přidržovač s již upnutým zkušebním vzorkem se vloží do experimentálního zařízení, je však nutno dbát správného směru, aby svrchní strana přidržovače byla blíže k tažníku. Poté se vymezí, aby tažník směřoval na střed přidržovače a plechu. Nyní následuje zkouška.

### **4.3.4 Provedení zkoušky**

Zkouška začíná spuštěním programu CharpyPlech, ve kterém se nastaví požadovaný počáteční úhel (tedy rychlost, kterou se bude pohybovat tažník). Poté se uchopí rameno kyvadla a začne se natahovat. Když je docíleno chtěného úhlu, hodnota aktuálního úhlu na displeji zezelená. Kyvadlo se musí spustit z nejvyššího bodu, neboť program zaznamená maximální úhlovou výchylku. Po spuštění nástroje dojde k deformaci vzorku a program zaznamená data. Ta je možné uložit a dále zpracovávat.

### 4.3.5 Vyhodnocení měření

Vyhodnocení měření je možné z dat, která se získají z programu CharpyPlech, nebo je možné zkoumat již deformované vzorky. V našem případě byly analyzovány deformované vzorky, postup je analogický jako pro vzorky deformované pomocí Erichsenova přístroje.

## 4.4 Vyhodnocení deformací ze zkoušky dle Erichsena

K vyhodnocení deformací bylo použito 8 šarží plechů jakosti DC06, které byly dříve podrobeny zkoušce hloubením dle Erichsena. Na plechy byla před zkouškou zhotovena síť, skládající se z kružnic. Tyto kružnice se vlivem napětí při deformaci přetvořily na elipsy. Pomocí ohebného měřítka s krokem po 0,1 mm, byly pod stereomikroskopem Mantis Vision při osminásobném zvětšení, změřeny hlavní a vedlejší poloosy. Hlavní napětí je vždy ve směru hlavní poloosy.



Obrázek 20 -Stereomikroskop

Měření probíhá na obou stranách od trhliny, kdy jsou zvoleny na každé straně (l-levá, p-pravá) 3 elipsy, které tvoří i s druhou stranou neporušenou řadu. Výsledky měření byly zaznamenány v příloze a dopočteny do tabulky.

Z výsledků měření se dále vyhodnocují deformace nebo poměrné deformace.

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad \varphi_2 = \ln \frac{l_2}{l_0}$$

$l_2$  – vedlejší deformace

$l_1$  – hlavní deformace

$l_0$  – stav před deformací [6]

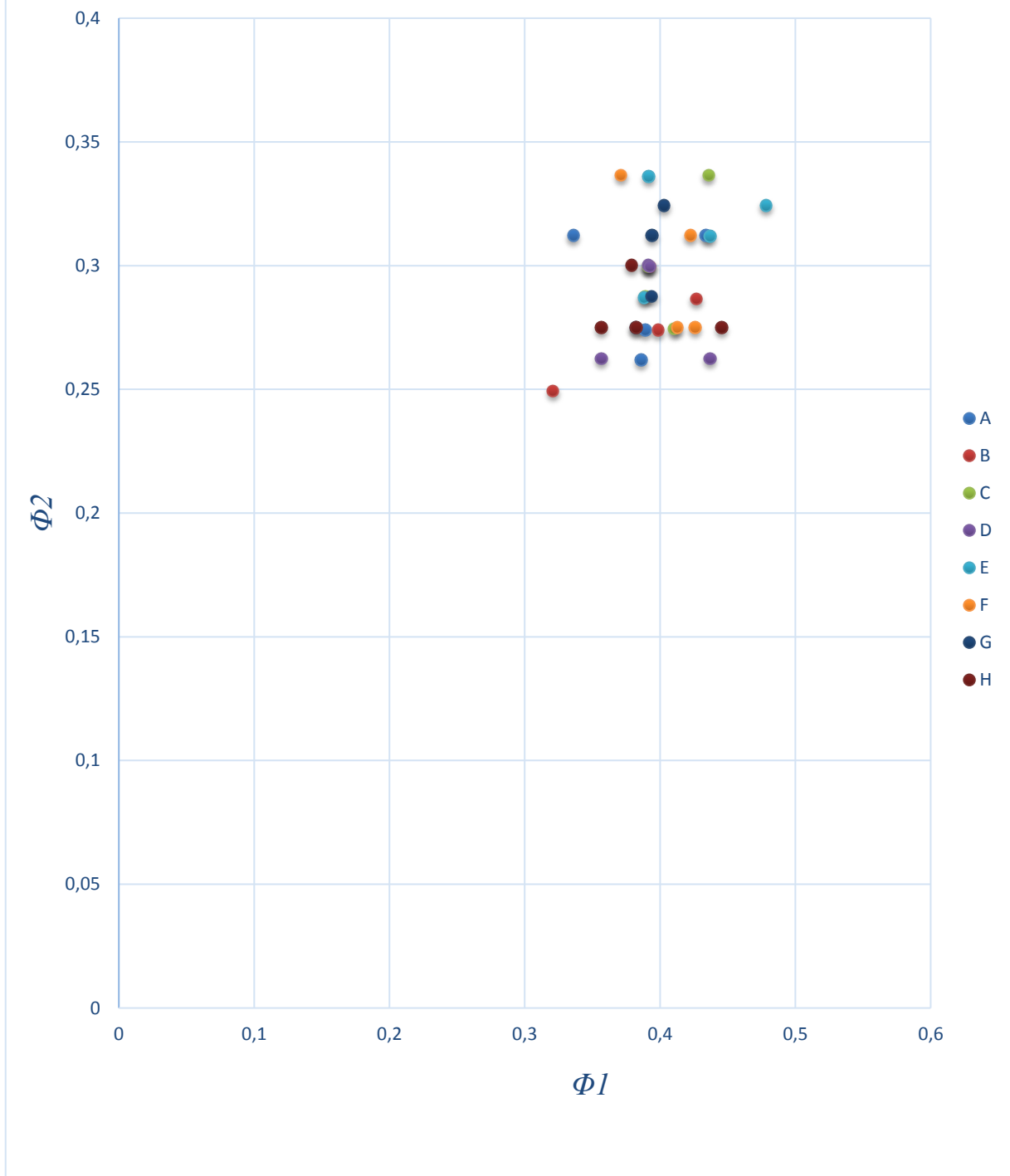
Tabulka 4 - Maximální deformace před vznikem trhliny

vzorek	$\varphi_1$	$\varphi_2$	vzorek	$\varphi_1$	$\varphi_2$
A1	0,336047	0,312227	E1	0,388185	0,287067
A2	0,433851	0,312227	E2	0,478362	0,324350
A3	0,389068	0,273993	E3	0,391858	0,336047
A4	0,386151	0,261871	E4	0,436865	0,311770
B1	0,320994	0,249291	F1	0,371167	0,336472
B2	0,398731	0,273993	F2	0,425935	0,274944
B3	0,392680	0,299647	F3	0,422551	0,312227
B4	0,426978	0,286573	F4	0,412888	0,274944
C1	0,389068	0,287524	G1	0,382097	0,274944
C2	0,410428	0,274451	G2	0,394165	0,312227
C3	0,435886	0,336472	G3	0,393794	0,287524
C4	0,391240	0,299647	G4	0,402937	0,324350
D1	0,356738	0,262364	H1	0,382467	0,274944
D2	0,391240	0,300105	H2	0,445548	0,274944
D3	0,392680	0,299647	H3	0,379117	0,300105
D4	0,436865	0,262364	H4	0,356738	0,274944

### Závěr

Z naměřených a odečtených hodnot je vidět, že všechny šarže se nedeformují stejně. Jistých nepřesností mohlo být docíleno při odečtu délky poloos z důvodu málo zřetelné sítě. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v následujícím grafu. [6,7]

### Maximální deformace před porušením - Erichsen



Obrázek 21 - Maximální deformace před porušením - Erichsen

## 4.5 Měření na experimentálním zařízení

Postup měření je již v popsán v provedení zkoušky. Zde budou již uvedeny výsledky měření na experimentálním zařízení.

### 4.5.1 Vyhodnocení deformací zkoušky dle modifikovaného Charpyho kladiva

Provedení vyhodnocení bylo prováděno analogicky, jako u vzorků ze zkoušky dle Erichsena. Jedná se opět o materiál jakosti DC06. Na rozdíl od Erichsena byla na 4 vzorcích síť v podobě čtvercových elementů, odečet byl prováděn však obdobně. U všech plechů zkoušených pomocí experimentálního zařízení byl zaznamenán úhel, ze kterého bylo kladivo spuštěno.

Výsledky maximálních deformací před vznikem trhliny jsou uvedeny v následující tabulce.

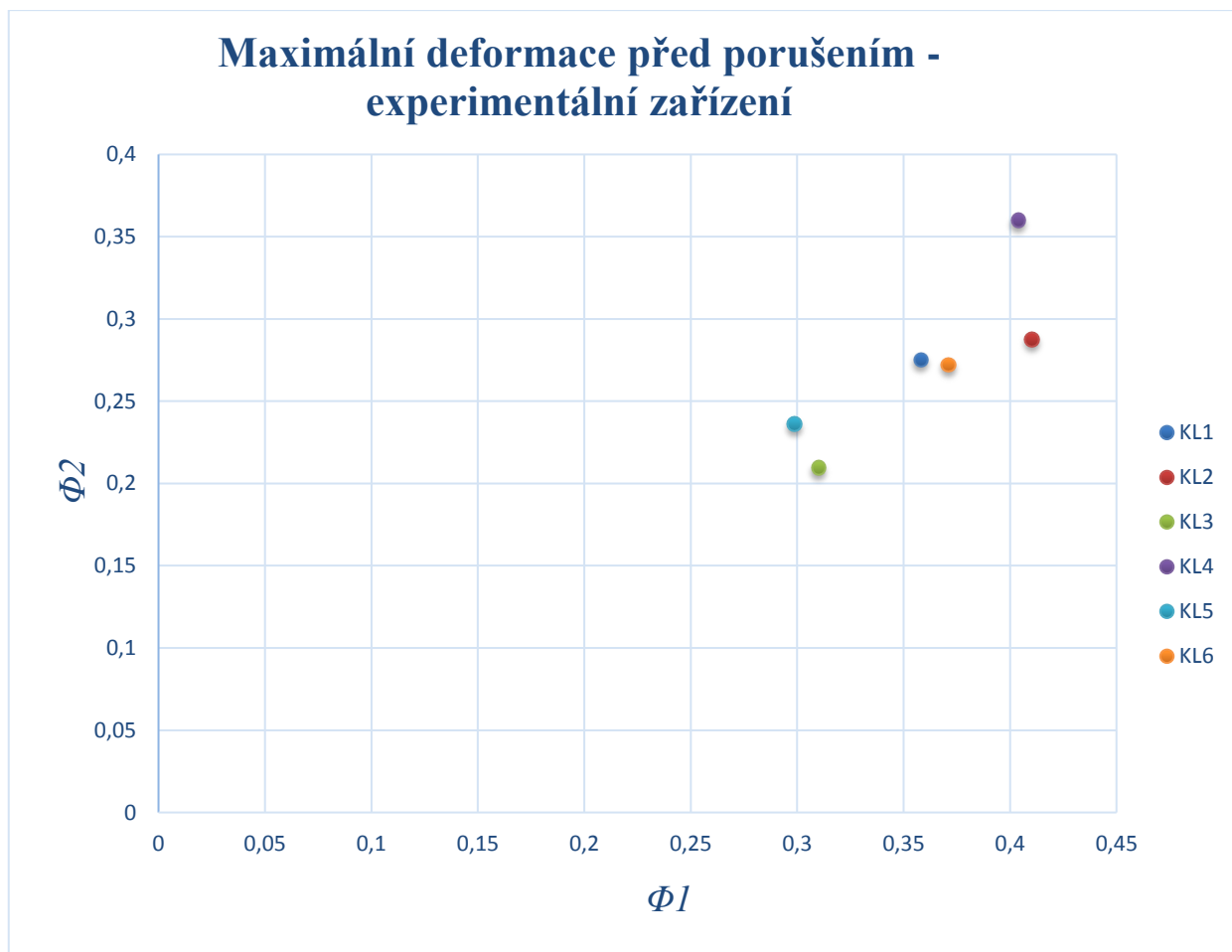
Na obr. č. 23 je zachycen průběh deformační síly, získaný z dat, která zaznamenal program CharpyPlech.

*Tabulka 5 – Maximální deformace před vznikem trhliny*

vzorek	šarže	poč. úhel	$\varphi_1$	$\varphi_2$
KL 1	C	18°	0,358277	0,274944
KL 2	A	18,4°	0,410428	0,287524
KL 3	B	19,4°	0,310065	0,209536
KL 4	A	20°	0,403980	0,359866
KL 5	F	17,7°	0,298764	0,236217
KL 6	G	18,4°	0,371167	0,272083

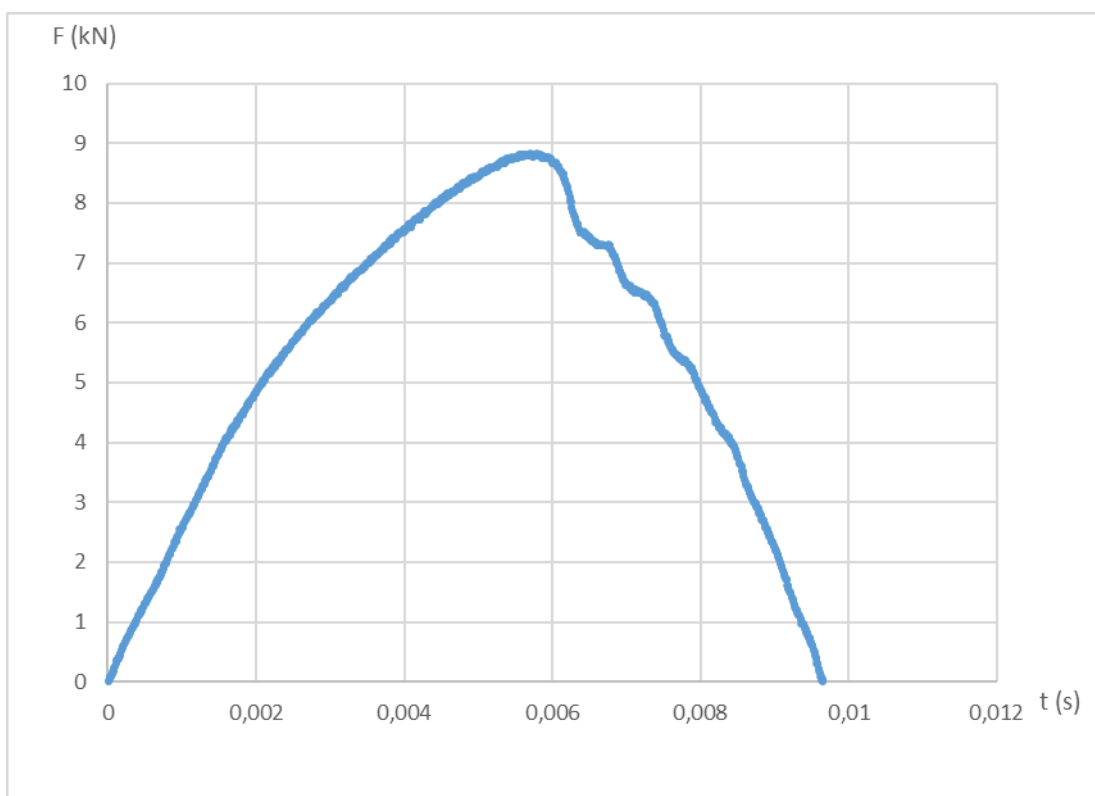
### Závěr

Bez ohledu na šarže se jeví chování deformace podobně jako u vzorků z Erichsenovy zkoušky. Je patrné, že počáteční úhel a s ním spjatá rychlost, mají vliv na deformační chování materiálu.



Obrázek 22 - Maximální deformace před porušením - experimentální zařízení





Obrázek 23 - Graf průběhu deformační síly

## **5 Závěr**

Cílem této bakalářské práce bylo verifikovat metodiku měření na experimentálním zařízení. Bakalářská práce je členěna na část teoretickou, kde je seznámení s problematikou tváření, faktorů, kterými je možné proces tváření ovlivnit. Dále jsou zde uvedeny různé zkoušky, kterými je možné stanovit hodnotu tvařitelnosti.

V praktické části se zabývám přípravou vlastního měření, včetně možnosti přípravy zkušebních vzorků. Jsou zde uvedeny vlastnosti zkoumaného materiálu jakosti DC06 a nechybí popis experimentálního zařízení včetně jeho principu. Dále je zde popsáno měření jak na experimentálním zařízení, tak na zařízení pro ověřování hlubokotažnosti podle Erichseny. Je zde popsán postup vyhodnocování vzorků po zkoušce. Díky tomu, že je metodika vyhodnocování stejná, je možné obě metody měření vzájemně srovnávat. Zkoušky byly prováděny na materiálové jakosti DC 06, nominální tloušťka plechů je 0,8 mm. Pro experimenty bylo použito 6 šarží materiálu pro určení rozptylu chování v závislosti na rychlosti deformace. Měřením bylo zjištěno, že rozdíl tloušťky jednotlivých šarží je zanedbatelný. To nám implikuje, že rozdíl tloušťky má minimální vliv na výsledky získané prováděným experimentem.

Z naměřených hodnot plyne, že výsledky obou zkoušek (pomocí Erichsenovy zkoušky a experimentálního zařízení) nevykazuje měřitelné rozdíly. To může být ovlivněno řadou faktorů, mezi které bude patřit velikost měrné sítě, měřící metoda pro ověření velikosti elementů měrné sítě apod.

Pro další práci doporučuji se problematikou zabývat a provést ověření velikosti deformace na vzorcích s menší velikostí měrné sítě, například využít měrné sítě vytvářené pomocí laseru. Dále bych doporučil provést opakované měření na experimentálním zařízení, sledování procesu pomocí například vysokorychlostní kamery, rozšířit počet vzorků.

## 6 Použité zdroje

- [1] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6
- [2] LENFELD, Petr. *Technologie II*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. ISBN 978-80-7494-304-1
- [3] *Tváření* [online]. Ostrava: Střední průmyslová škola, Ostrava - Vítkovice, příspěvková organizace [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/ZAV/ZAV4-Tvareni\\_GEL.pdf](http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/ZAV/ZAV4-Tvareni_GEL.pdf)
- [4] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6
- [5] PAVLÍK, Z. *Tvářecí technologie ve strojírenské praxi*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně.
- [6] KOTOUČ, Jiří. *Teorie a metodika tváření: návody ke cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 1992
- [7] KUČERA, R. *Význam deformační sítě v oblasti tváření*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [8] *Skripta tváření: technologie tváření* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Skriptatvareni.pdf>
- [9] PAČÁK, T. *Konstrukční návrh zařízení pro sledování tvařitelnosti hlubokotažných plechů při různých rychlostech deformace*. Praha, 2011. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce F. Tatíček.
- [10] OŠŤÁDAL, J. *Zkoušky tvařitelnosti a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [11] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2
- [12] ŠULC, V. *Ověření velikosti deformací na malých designových hranách*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce F. Tatíček

- [13] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 80-7078-635-3
- [14] NIKODÝM, L. *Modifikace Charpyho kladiva a metodika tváření*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce F. Tatiček
- [15] *Technologie II: Tváření kovů, zpracování plastů* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec - Fakulta strojní [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm#011](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#011)
- [16] SCHINDLER, I. a P. KAWULOK. *Deformační chování materiálu: studijní opora* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: [http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin\\_Animace/Opory/02\\_Metalurgicke\\_inzenyrstvi/13\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu/Schindler\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/13_Deformacni_chovani_materialu/Schindler_Deformacni_chovani_materialu.pdf). Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
- [17] ČADA, Radek. *Tvařitelnost materiálu a nekonvenční metody tváření, plošná tvařitelnost: (návod do cvičení)*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0019-5.
- [18] KLÍBER, J. *Teorie tváření: (studijní opory)* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: [https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/teorie-tvareni/Kliber\\_Teorie-tvareni.pdf](https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/teorie-tvareni/Kliber_Teorie-tvareni.pdf). Studijní materiály. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství.
- [19] ŘEZNÍČEK, J., Pružnost a pevnost I, II, [přednášky], Praha: ČVUT 2016
- [20] GULT, M. *Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vysokých rychlostech deformace*. Liberec, 2009. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci
- [21] *STUDY THE METHOD S TO GET FORMING LIMIT DIAGRAM FROM EXPERIMENTAL DATA* [online]. Nanded, Indie: SHRI GURU GOBIND SINGHJI INSTITUTE OF ENGG & TECHNOLOGY DEPARTMENT OF PRODUCTION ENGINEERING [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://prod.sgg.ac.in/sites/default/files/Study%20of%20methods%20to%20get%20forming%20limit%20diagram-practical-8.pdf>

- [22] ČSN EN ISO 12004 -2: *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení křivek mezní tvářitelnosti – Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři*. Květen 2009. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [23] MAREČEK, J. *Energetické porovnání dynamického a statického porušení materiálu*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [24] MECA, J. *Sledování životnosti nástroje s ostrou designovou hranou*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce F. Tatiček
- [25] ČUBEN, D. *Ekonomické zhodnocení investičního projektu laserového popisování plechů*. Mladá Boleslav, 2015. Bakalářská práce. Škoda Auto Vysoká škola O.P.S.
- [26] PAGÁČ, Aleš. *Použití technologických zkoušek tvářitelnosti při tváření*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství
- [27] LIBOCHOVÁ, Soňa. *Technologie výroby součásti tvářením*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [28] PETRUŽELKA, J. a R. BŘEZINA. *Tvářitelnost kovových materiálů*. Ostrava, 2001. Skriptum. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [29] *Studium, škola, wiki: Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-maturita.blogspot.cz/2011/10/maturitni-otazka-c-7a.html>
- [30] *ELUC elektronická učebnice: Strojírenství* [online]. Olomouc, 2014 [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1568>
- [31] *Kovy a kovové konstrukce* [online]. Praha, 2006 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://mech.fd.cvut.cz/members/malinovsky/teorie-konstrukci/Kovy.pdf>. Studijní materiál k přednášce.
- [32] PETRUŽELKA, J. a R. BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava, 2001. Skriptum. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [33] *Mlgeardesigns: Válcování* [online]. 2015 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1504/valcovani>

Příloha č.1 – Naměřené hodnoty tloušťky vzorků pro Erichsena

























č.	t [mm]	h [mm]		t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
A1	0,80	13,12	A2	0,82	13,04	A3	0,79	12,87
	0,81			0,78			0,82	
	0,84			0,82			0,81	
	0,81			0,82			0,82	
	0,81			0,81			0,82	
	Øt			0,814			Øt	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
A4	0,84	12,97	B1	0,79	12,57	B2	0,82	11,80
	0,81			0,81			0,82	
	0,81			0,83			0,83	
	0,82			0,81			0,80	
	0,80			0,81			0,79	
	Øt			0,816			Øt	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
B3	0,81	12,87	B4	0,81	12,49	C1	0,78	12,92
	0,78			0,78			0,79	
	0,81			0,82			0,77	
	0,83			0,79			0,77	
	0,81			0,81			0,80	
	Øt			0,816			Øt	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
C2	0,75	13,06	C3	0,79	12,97	C4	0,79	12,99
	0,75			0,73			0,77	
	0,73			0,74			0,77	
	0,77			0,78			0,81	
	0,76			0,77			0,79	
	Øt			0,752			Øt	

























č.	t [mm]	h [mm]		t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
D1	0,79	12,44	D2	0,78	12,84	D3	0,79	12,74
	0,79			0,78			0,75	
	0,81			0,82			0,80	
	0,82			0,79			0,78	
	0,79			0,79			0,79	
	Øt   0,80			Øt   0,792			Øt   0,782	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
D4	0,76		E1	0,77	12,68	E2	0,82	12,78
	0,78			0,77			0,83	
	0,82			0,80			0,80	
	0,75			0,77			0,81	
	0,82			0,79			0,79	
	Øt   0,782			Øt   0,78			Øt   0,81	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
E3	0,83	12,64	E4	0,79	12,10	F1	0,81	12,18
	0,78			0,78			0,81	
	0,79			0,74			0,77	
	0,81			0,80			0,81	
	0,75			0,79			0,81	
	Øt   0,792			Øt   0,78			Øt   0,802	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
F2	0,81	12,43	F3	0,76	12,57	F4	0,77	12,31
	0,78			0,79			0,77	
	0,75			0,79			0,82	
	0,75			0,81			0,80	
	0,82			0,81			0,81	
	Øt   0,782			Øt   0,792			Øt   0,794	

















č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
G1	0,84	12,31	G2	0,76	12,22	G3	0,80	12,16
	0,78			0,82			0,79	
	0,83			0,78			0,83	
	0,81			0,80			0,81	
	0,78			0,76			0,80	
	Øt			0,808			Øt	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
G4	0,79	12,46	H1	0,81	12,30	H2	0,80	12,28
	0,82			0,80			0,80	
	0,80			0,80			0,78	
	0,79			0,77			0,79	
	0,79			0,79			0,79	
	Øt			0,798			Øt	
č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]	č.	t [mm]	h [mm]
H3	0,78	12,28	H4	0,81	11,58			
	0,79			0,81				
	0,78			0,81				
	0,81			0,74				
	0,76			0,76				
	Øt			0,784		Øt	0,786	Øt















Příloha č.2 – Změřené rozměry deformovaných sítí dle Erichsena

A1			A2			A3		
$l_1$ [mm]	2,8	3,2	$l_1$ [mm]	2,7	3,5	$l_1$ [mm]	2,8	3,4
$l_2$ [mm]	2,8	2,9	$l_2$ [mm]	2,8	3,0	$l_2$ [mm]	2,6	2,8
$l_3$ [mm]	2,7	2,7	$l_3$ [mm]	2,7	2,8	$l_3$ [mm]	2,5	2,7
$p_1$ [mm]	2,6	3,0	$p_1$ [mm]	2,5	2,9	$p_1$ [mm]	2,6	3,0
$p_2$ [mm]	2,4	2,5	$p_2$ [mm]	2,4	2,8	$p_2$ [mm]	2,4	2,7
$p_3$ [mm]	2,2	2,4	$p_3$ [mm]	2,2	2,7	$p_3$ [mm]	2,2	2,5
A4			B1			B2*		
$l_1$ [mm]	2,7	3,5	$l_1$ [mm]	2,5	3,1	$l_1$ [mm]	2,5	3,5
$l_2$ [mm]	2,6	2,8	$l_2$ [mm]	2,6	2,6	$l_2$ [mm]	2,8	2,8
$l_3$ [mm]	2,5	2,6	$l_3$ [mm]	2,6	2,6	$l_3$ [mm]	2,6	2,7
$p_1$ [mm]	2,5	3,0	$p_1$ [mm]	2,4	3,0	$p_1$ [mm]	2,2	2,9
$p_2$ [mm]	2,3	2,8	$p_2$ [mm]	2,2	2,5	$p_2$ [mm]	2,3	2,6
$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,0	2,4	$p_3$ [mm]	2,1	2,5
B3			B4			C1		
$l_1$ [mm]	2,7	3,2	$l_1$ [mm]	2,5	3,2	$l_1$ [mm]	2,6	3,4
$l_2$ [mm]	2,8	2,9	$l_2$ [mm]	2,8	3,0	$l_2$ [mm]	2,7	2,8
$l_3$ [mm]	2,6	2,8	$l_3$ [mm]	2,7	3,0	$l_3$ [mm]	2,7	2,7
$p_1$ [mm]	2,6	2,9	$p_1$ [mm]	2,9	3,1	$p_1$ [mm]	2,5	2,9
$p_2$ [mm]	2,4	2,7	$p_2$ [mm]	2,5	2,8	$p_2$ [mm]	2,4	2,6
$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,3
C2			C3			C4		
$l_1$ [mm]	2,5	3,5	$l_1$ [mm]	2,8	3,4	$l_1$ [mm]	2,6	3,3
$l_2$ [mm]	2,7	2,9	$l_2$ [mm]	2,8	2,9	$l_2$ [mm]	2,7	2,8
$l_3$ [mm]	2,7	2,7	$l_3$ [mm]	2,8	3,0	$l_3$ [mm]	2,8	2,8
$p_1$ [mm]	2,5	2,6	$p_1$ [mm]	2,5	2,6	$p_1$ [mm]	2,6	2,6
$p_2$ [mm]	2,3	2,6	$p_2$ [mm]	2,2	2,6	$p_2$ [mm]	2,2	2,7
$p_3$ [mm]	2,2	2,3	$p_3$ [mm]	2,2	2,4	$p_3$ [mm]	2,2	2,4

D1			D2			D3		
$l_1$ [mm]	2,6	3,2	$l_1$ [mm]	2,7	3,3	$l_1$ [mm]	2,8	3,2
$l_2$ [mm]	2,6	2,7	$l_2$ [mm]	2,7	2,8	$l_2$ [mm]	2,6	2,8
$l_3$ [mm]	2,6	2,7	$l_3$ [mm]	2,7	2,8	$l_3$ [mm]	2,7	2,9
$p_1$ [mm]	2,7	2,7	$p_1$ [mm]	2,4	3,0	$p_1$ [mm]	2,6	2,7
$p_2$ [mm]	2,3	2,5	$p_2$ [mm]	2,2	2,6	$p_2$ [mm]	2,5	2,6
$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,4	$p_3$ [mm]	2,3	2,3
D4			E1			E2		
$l_1$ [mm]	2,6	3,2	$l_1$ [mm]	2,6	3,4	$l_1$ [mm]	2,8	3,5
$l_2$ [mm]	2,6	2,7	$l_2$ [mm]	2,8	2,9	$l_2$ [mm]	2,7	3,0
$l_3$ [mm]	2,6	3,0	$l_3$ [mm]	2,6	2,6	$l_3$ [mm]	2,8	3,2
$p_1$ [mm]	2,4	3,0	$p_1$ [mm]	2,5	2,7	$p_1$ [mm]	2,7	3,0
$p_2$ [mm]	2,3	2,7	$p_2$ [mm]	2,2	2,5	$p_2$ [mm]	2,4	2,8
$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,5
E3			E4			F1		
$l_1$ [mm]	2,9	3,2	$l_1$ [mm]	2,8	3,1	$l_1$ [mm]	2,8	3,0
$l_2$ [mm]	2,7	2,7	$l_2$ [mm]	2,8	2,9	$l_2$ [mm]	2,8	2,8
$l_3$ [mm]	2,8	3,0	$l_3$ [mm]	2,6	3,3	$l_3$ [mm]	2,8	2,9
$p_1$ [mm]	2,8	3,0	$p_1$ [mm]	2,8	3,0	$p_1$ [mm]	2,6	3,1
$p_2$ [mm]	2,4	2,7	$p_2$ [mm]	2,5	2,6	$p_2$ [mm]	2,3	2,8
$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,3	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,6
F2			F3			F4		
$l_1$ [mm]	2,6	3,3	$l_1$ [mm]	2,7	3,5	$l_1$ [mm]	2,6	3,4
$l_2$ [mm]	2,7	3,0	$l_2$ [mm]	2,8	2,8	$l_2$ [mm]	2,6	2,8
$l_3$ [mm]	2,6	2,9	$l_3$ [mm]	2,7	2,9	$l_3$ [mm]	2,7	2,9
$p_1$ [mm]	2,5	2,8	$p_1$ [mm]	2,5	2,6	$p_1$ [mm]	2,5	2,7
$p_2$ [mm]	2,2	2,5	$p_2$ [mm]	2,4	2,5	$p_2$ [mm]	2,3	2,6
$p_3$ [mm]	2,2	2,4	$p_3$ [mm]	2,2	2,4	$p_3$ [mm]	2,2	2,5

G1			G2			G3		
l <sub>1</sub> [mm]	2,7	3,1	l <sub>1</sub> [mm]	2,7	3,0	l <sub>1</sub> [mm]	2,7	3,1
l <sub>2</sub> [mm]	2,6	2,8	l <sub>2</sub> [mm]	2,7	2,9	l <sub>2</sub> [mm]	2,6	2,9
l <sub>3</sub> [mm]	2,6	2,9	l <sub>3</sub> [mm]	2,8	3,0	l <sub>3</sub> [mm]	2,7	2,9
p <sub>1</sub> [mm]	2,6	2,9	p <sub>1</sub> [mm]	2,7	3,2	p <sub>1</sub> [mm]	2,6	3,1
p <sub>2</sub> [mm]	2,4	2,6	p <sub>2</sub> [mm]	2,3	2,6	p <sub>2</sub> [mm]	2,3	2,8
p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,6	p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,5	p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,5
G4			H1			H2		
l <sub>1</sub> [mm]	2,7	3,3	l <sub>1</sub> [mm]	2,6	3,0	l <sub>1</sub> [mm]	2,6	3,5
l <sub>2</sub> [mm]	2,8	2,8	l <sub>2</sub> [mm]	2,7	2,8	l <sub>2</sub> [mm]	2,7	2,9
l <sub>3</sub> [mm]	2,8	2,9	l <sub>3</sub> [mm]	2,6	3,0	l <sub>3</sub> [mm]	2,6	3,0
p <sub>1</sub> [mm]	2,6	2,9	p <sub>1</sub> [mm]	2,4	2,8	p <sub>1</sub> [mm]	2,5	2,6
p <sub>2</sub> [mm]	2,4	2,6	p <sub>2</sub> [mm]	2,2	2,6	p <sub>2</sub> [mm]	2,2	2,4
p <sub>3</sub> [mm]	2,3	2,5	p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,5	p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,3
H3			H4					
l <sub>1</sub> [mm]	2,7	3,3	l <sub>1</sub> [mm]	2,6	3,2			
l <sub>2</sub> [mm]	2,7	2,7	l <sub>2</sub> [mm]	2,7	2,7			
l <sub>3</sub> [mm]	2,7	2,8	l <sub>3</sub> [mm]	2,6	2,7			
p <sub>1</sub> [mm]	2,5	2,5	p <sub>1</sub> [mm]	2,6	2,6			
p <sub>2</sub> [mm]	2,4	2,4	p <sub>2</sub> [mm]	2,4	2,5			
p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,3	p <sub>3</sub> [mm]	2,2	2,3			

Příloha č.3 – Změřené rozměry deformovaných sítí na experimentálním zařízení

Kl 1			Kl 2			Kl 3		
$l_1$ [mm]	2,6	3,1	$l_1$ [mm]	2,6	3,5	$l_1$ [mm]	2,4	3,0
$l_2$ [mm]	2,7	2,7	$l_2$ [mm]	2,7	2,9	$l_2$ [mm]	2,5	2,6
$l_3$ [mm]	2,6	2,8	$l_3$ [mm]	2,7	2,7	$l_3$ [mm]	2,5	2,6
$p_1$ [mm]	2,5	2,8	$p_1$ [mm]	2,5	2,7	$p_1$ [mm]	2,6	2,8
$p_2$ [mm]	2,4	2,6	$p_2$ [mm]	2,3	2,5	$p_2$ [mm]	2,5	2,5
$p_3$ [mm]	2,3	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,3	$p_3$ [mm]	2,4	2,4
Kl 4			Kl 5			Kl 6		
$l_1$ [mm]	2,9	3,2	$l_1$ [mm]	2,5	2,9	$l_1$ [mm]	2,9	3,0
$l_2$ [mm]	2,9	3,0	$l_2$ [mm]	2,6	2,6	$l_2$ [mm]	2,6	2,8
$l_3$ [mm]	2,8	2,8	$l_3$ [mm]	2,5	2,6	$l_3$ [mm]	2,4	2,9
$p_1$ [mm]	2,9	2,9	$p_1$ [mm]	2,5	2,6	$p_1$ [mm]	2,6	2,9
$p_2$ [mm]	2,5	2,7	$p_2$ [mm]	2,3	2,3	$p_2$ [mm]	2,4	2,7
$p_3$ [mm]	2,2	2,5	$p_3$ [mm]	2,2	2,2	$p_3$ [mm]	2,3	2,4