

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



**Ověření určování velikosti deformací pomocí
systému ARGUS**

Diplomová práce

Bc. David Mrázek

Vedoucí práce:

Ing František Tatíček, Ph.D.

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne 19. 6. 2015

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Název diplomové práce:	Ověření určování velikosti deformací pomocí systému ARGUS
Autor diplomové práce:	Bc. David Mrázek
Vedoucí diplomové práce:	Ing František Tatiček, Ph.D.
Rozsah diplomové práce:	Počet stran: 71
	Počet obrázků: 55
	Počet tabulek: 13

Anotace:

V první části diplomové práce se věnuji problematice plošného tváření z hlediska zásoby plasticity. Zkouškami, kterými mohu zjistit parametry materiálů a jejich vhodnost pro tvářecí operace. Dále metodou měření deformací během tvářecího procesu. K těmto měřením jsou zapotřebí deformační sítě, které se nanášejí na povrch materiálu. V práci jsou tyto sítě popsány, jejich druhy, způsoby nanášení a způsoby vyhodnocení.

V další části práce se věnuji popisu deformací na malých poloměrech. K popisu materiálu byla zvolena metoda laserového popisování, u které je nutné vyhodnotit čitelnost nanesené sítě, její parametry z hlediska přesnosti nanesených elementů a vliv laseru na materiál.

V poslední části projektu jsem se věnoval verifikaci výstupů z 3D optického vyhodnocovacího systému ARGUS. Tyto výstupy jsem porovnal s jinými konvenčními metodami měření tloušťky materiálu.

TECHNICAL UNIVERSITY OF PRAGUE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Department of mechanical engineering

Branch:	Manufacturing and Materials Engineering		
Theme of MSc work:	Verification of determining the magnitude of deformations using the ARGUS		
Name:	Bc. David Mrázek		
Leader of MSc work:	Ing František Tatiček, Ph.D.		
Immensity of MSc work:	Number of pages:	71	
	Number of pictures:	55	
	Number of tables:	13	

Annotation:

In the first part of my dissertation I devote to the sheet metal forming in terms of store plasticity. Tests, which I can determine parameters of materials and their suitability for forming operations. Further, I write about the method of measuring deformations during the forming process. To these measurements are required deformation networks, which are applied to the material surface. In this work are described these networks, their types, ways of application and evaluation methods.

In the next part of my work I describe the deformation at small radii. To description of the materials was chosen the method of laser marking, in which is necessary to evaluate the readability of the applied networks, its parameters with a respect to accuracy deposited elements and the influence of the laser material.

In the last part of the project I dealt with the verification of results from 3D optical system of ARGUS. These results I compared with other conventional methods of measuring the thickness of material.

Poděkování:

Děkuji Ing Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. za odborné vedení této diplomové práce. Děkuji mu za ochotu při poskytování důležitých informací a podkladů k této práci. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu ve studiu. Za poskytnutí materiálů děkuji společnosti ŠKODA AUTO, a.s..

Použité symboly a jednotky

FLD	- Forming Limit Diagram (Diagram mezních přetvoření)	
R_e	- mez kluzu	[MPa]
R_m	- mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	- smluvní mez kluzu	[MPa]
A	- tažnost	[%]
KUT	- komplexní ukazatel tvařitelnosti	[-]
ρ	- Hustota dislokací	[m ⁻²]
r	- Součinitel plastické anizotropie	[-]
Δr	- Stupeň plošné anizotropie	[-]
\bar{r}	- Vážený průměr součinitele plastické anizotropie	[-]
F	- síla	[N]
$M_{o \max}$	- maximální ohybový moment	[N*mm]
d	- průměr	[mm]
S	- průřez	[mm ²]
n	- exponent deformačního zpevnění	[-]
σ	- napětí	[MPa]
W_o	- průřezový modul v ohybu	[mm ³]
W_k	- průřezový modul v krutu	[mm ³]
φ	- Skutečná deformace	[mm]

Obsah

1	úvod – seznámení s tématem.....	10
2	Problematika tváření	12
2.1	Zásoba plasticity (tvařitelnost).....	13
2.1.1	Mechanické zkoušky	14
2.1.2	Technologické zkoušky	18
2.2	Používané materiály v plošném tváření.....	24
3	Měrné sítě	26
3.1	Druhy měrných sítí.....	27
3.2	Nanášení měrných sítí	28
3.2.1	Metody mechanicky ovlivňující povrch materiálu	28
3.2.2	Metody bez výrazného poškození povrchu materiálu:.....	29
3.3	Možnosti laserového popisu materiálu	31
3.4	Vyhodnocování měrných sítí	34
3.4.1	Limitní diagramy.....	37
3.5	Systém ARGUS	39
3.5.1	Hardware potřebný ke snímání	39
3.5.2	Princip snímání:	40
3.5.3	Vyhodnocení systémem ARGUS.....	41
3.6	Základy metalografie.....	42
4	Popis deformací na malých poloměrech	45
4.1	Laserové nanesení sítě.....	45
4.1.1	Technické požadavky pro popis:.....	45
5	Ověření čitelnosti nanesených sítí.....	48
5.1	Ověření čitelnosti laserem nanesených sítí.....	49
5.1.1	Vyhodnocení čitelnosti sítí:	53

6	Porovnání výsledků měření systému ARGUS s jinými systémy	57
6.1	Zkušební součást	57
6.2	Vyhodnocení ARGUS	58
6.3	Vyhodnocení mikrometrem	60
6.4	Vyhodnocení metalografický výbrus	62
6.5	Celkové porovnání	63
7	Závěrečné zhodnocení.....	65
8	Seznam obrázků	66
9	Literatura	68

1 ÚVOD – SEZNÁMENÍ S TÉMATEM

Tváření materiálů je jedno z nejstarších řemesel lidstva a je tady s námi už několik tisíc let. V moderní době se toto odvětví začalo prohlubovat a daná problematika se stala značně složitější. V automobilovém průmyslu nalezneme jak plošné, tak i objemové tváření. Toto rozdělení je na základě působení vnějších sil na polotovar.

- Objemové tváření – tváření, při němž se výrazně doformuje materiál ve všech třech směrech. Reprezentativními zástupci jsou například kování (volné, zápusťkové), lisování, protlačování, tažení a další.
- Plošné tváření – nejčastěji tvarování plechu, kterým vytváříme daný prostorový předmět. Příklady plošného tváření jsou: hluboké tažení, válcování a další.

Tato diplomová práce má za úkol zaměřit se na problematiku plošného tváření. A to především tváření plechů v automobilovém průmyslu.

Dnes je trh přesycen nabídkou a konkurenční boj jednotlivých firem je běžným jevem. Toto platí i v automobilovém průmyslu. Díky takto konkurenčnímu prostředí se snaží nejen automobilové společnosti minimalizovat náklady, to nutí k využívání všech výrobních prostředků s maximální efektivitou. Tento trend nutí technology tlačit vlastnosti materiálu až na hranice svých možností, tak aby bylo využito co největšího potenciálu. Abychom se mohli, co nejvíce přiblížit k maximálním možnostem musíme určit parametry, které nám popíší chování materiálu.

Komplikace pro výrobu karoserie tvoří především design automobilu. Návrháři se pokouší odlišit od konkurence tím, že se snaží vytvořit zajímavý vzhled. Bohužel, ne vždy tento trend jde ruku v ruce s technologickými možnostmi. V posledních letech je tendence vytvářet na karoseriích tzv. tornádo linie. Principem výroby této linie je ohnutí plechu na velice malém poloměru. Na Obrázek 1 vidíme názornou ukázkou tornádo linií, na novém vozu Škoda Superb.



Obrázek 1 Tornádo linie [31]

Jednou z metod jak zjistit chování výrobku při plošném tváření je nanesení měrné sítě, která nám ukazuje jak moc a v jakých směrech se materiál deformuje. Tato síť je nanášena pomocí rozdílných metod, kde každá z nich má své klady i zápory. Největším trendem v dnešní době je vytvoření sítě pomocí laseru.

Tvářením materiálu dochází v nástroji k otěru povrchu výrobku a tím dochází k poškození nanesené měrné sítě. Tato práce má za úkol určit čitelnost elementů sítě, které mohou být nečitelné z důvodu nevhodného kontrastu, nebo poškozeny díky tvářecímu procesu. Toto poškození z hlediska vyhodnocení je nepřijatelné.

Software Argus, kterým se vyhodnocování provádí, je jeden z nejefektivnějších systémů pro vyhodnocení deformací skrz měrné sítě. Tento software potřebuje k úspěšnému analyzování vysokou vizuální kvalitu nanesené sítě. Dále je nutné, zjistit s jakou přesností daný systém ARGUS dokáže vyhodnotit deformace. K tomuto kroku poslouží porovnání ARGUSU s jinými konvenčními metodami měření. [6]

2 PROBLEMATIKA TVÁŘENÍ

Tvářecí proces je děj, při němž určitou silou deformujeme materiál. Tato síla musí vyvolat dostatečné napětí, které překoná vnitřní odpor materiálu vůči přetvoření (deformaci). Takto vyvolaným napětím můžeme materiál přetvářet do požadovaných tvarů. Abychom trvale změnili tvar, musíme pracovat v oblastech plastické deformace. Plastická deformace se nachází mezi mezí kluzu R_e a porušením materiálu. Procesy mohou probíhat buď za tepla, nebo za studena a to podle toho, zda se pohybujeme nad teplotou krystalizace nebo pod teplotou krystalizace. Plošné tváření může probíhat v obou případech. V automobilovém průmyslu se nejčastěji s plošným tvářením setkáme u karoserií automobilů. Tento proces probíhá za studena a k deformacím dochází za pokojové teploty. Jediným zdrojem tepla je tření vznikající mezi nástrojem a polotovarem.

Existují výrobní postupy, kde chceme překonat pevnost materiálu a tím porušit jeho celistvost. Tímto postupem je například stříhání. Ve většině případů ale chceme spíše zabránit porušení materiálu, nebo jakékoliv iniciaci trhlin způsobené výrobním procesem.

Každý materiál má své specifické vlastnosti, díky nim je vhodný k různým druhům zpracování. O těchto vlastnostech rozhoduje především to, o jaký druh materiálu se jedná a dále jeho chemické složení, tepelné zpracování a způsob vyrábění polotovaru. Musíme si uvědomit, na jaké zpracování budeme daný materiál používat a tím i jaké parametry sledovat.

U plošného tváření jsou pro nás důležité například vlastnosti:

- Mez kluzu: R_e [MPa]
- Mez pevnosti: R_m [MPa]
- Tažnost: A [%]
- Kontrakce: Z [%]
- Součinitel plastické anizotropie: r
- Exponent deformačního zpevnění: n

Pomocí těchto parametrů dokážeme určit chování materiálu během tvářecího procesu, dimenzovat stroj, určit nástroje a zvolit celkový vhodný technologický postup. [18]

2.1 Zásoba plasticity (tvařitelnost)

Zásoba plasticity je vlastnost materiálu, která nám ukazuje, do jaké míry ho můžeme deformovat, aniž by došlo k iniciaci trhliny. Velikost plasticity (tvařitelnost) ovlivňují metalurgické, mechanické a technologické vlastnosti. Čím větší zásoba plasticity tím lepší tvařitelnost. [1],[3]

Faktory ovlivňující tvařitelnost [1],[3]:

➤ Metalurgické faktory:

- *Chemické složení a čistota materiálu* – Lepší tvařitelnost vykazují čisté kovy než slitiny.
- *Počet fází* – Karbidy, které se nerozpadly během tepelných změn v průběhu zpracování materiálu, zhoršují tvařitelnost. Vměstky, intermetalické fáze zhoršují také tvařitelnost a je důležité v jaké míře a tvarech se v materiálu vyskytují.
- *Druh krystalové mřížky*
 - Kubická prostorově středěná
 - Kubická plošně středěná – tato mřížka má nejlepší tvařitelnost
 - Hexagonální
- *Dislokace a jejich množství* – Čárové poruchy. Množství nebo-li hustota dislokací ρ , závisí na míře plastického přetvoření materiálu.
 - Hranové
 - Šroubové

➤ Mechanické faktory:

- *Rychlost deformace* – Čím vyšší rychlost deformace, tím větší pravděpodobnost porušení materiálu. V automobilovém průmyslu se snaží co nejvíce zkracovat výrobní časy, takže rychlost tváření materiálů se zvyšuje. Díky tomu stoupá rychlost deformace.
- *Stav napjatosti*
 - Tahová napětí
 - Tlaková napětí – Pokud jsou v materiálu tlaková napětí, vykazuje lepší tvařitelnost než u ostatních napětí
 - Kombinace tahových a tlakových napětí
- *Velikost deformace*

- Technologické vlastnosti
 - *Tvářecí zařízení*
 - *Rozmezí tvářecích teplot*

K tomu abychom určili tvařitelnost potřebujeme zkoušky a ty následně vyhodnotit. V praxi se používají dva druhy zkoušek, mechanické a technologické.

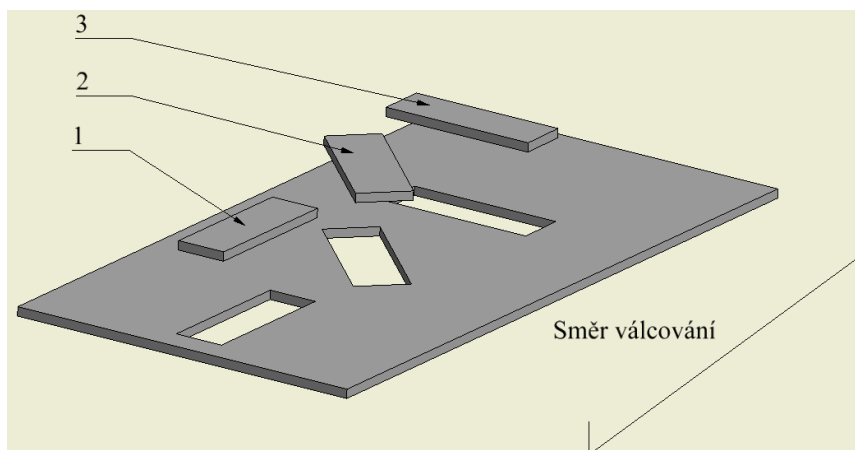
2.1.1 Mechanické zkoušky

Zjišťování tvařitelnosti plechů pomocí mechanických vlastností materiálu se nejčastěji provádí tahovou zkouškou.

Mechanické zkoušky [1],[7],[8],[9]:

- Tahová zkouška
 - Tažnost: $A[\%]$; $A = \frac{L-L_0}{L_0} * 100$
 - U hlubokotažných plechů by měla být co nejvyšší
 - Dnešní hlubokotažné oceli mají tažnost přes 50%
 - Mez kluzu: R_e [MPa] – hranice kde se deformace stává z elastické plastickou
 - Mez pevnosti: R_m [MPa]
 - poměr meze kluzu a meze pevnosti: Čím je hodnota poměru nižší, tím je tvařitelnost lepší.
 - $R_e / R_m \in <0,55 \div 0,65> \Rightarrow$ vynikající plastické vlastnosti
 - $R_e / R_m \in <0,65 \div 0,75> \Rightarrow$ horší plastické vlastnosti
 - Případně komplexní ukazatel tvařitelnosti: $KUT = R_m/R_{p0,2} * A_{50}$
 - Součinitel plastické anizotropie r (ČSN ISO 10113 Kovové materiály. Stanovení součinitele plastické anizotropie plechů a pásů): $r = \frac{\varphi_b}{\varphi_t}$
 - φ_b (skutečná deformace šířky), φ_t (skutečná deformace tloušťky)
 - $\varphi_b = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right)$; $\varphi_t = \ln\left(\frac{t_1}{t_0}\right)$
 - b_0 [mm] (počáteční šířka), b_1 [mm] (konečná šířka), t_0 [mm] (počáteční tloušťka), t_1 [mm] (konečná tloušťka)
 - Součinitel je závislý na směru působící síly vzhledem ke směru válcování plechu

- K tomu abychom zahrnuli vliv anizotropie je potřeba spočítat vážený průměr součinitele plastické anizotropie \bar{r} a stupeň plošné anizotropie Δr .
 - $\bar{r} = 0,25 (r_0 + 2r_{45} + r_{90})$
 - $\Delta r = 0,5(r_0 - 2r_{45} + r_{90})$
 - r_0, r_{45}, r_{90} jsou součinitele plastické deformace v různých směrech vzhledem k válcování



Obrázek 2 Ukázka výstřižků pod různým úhlem vzhledem k válcování r_0 (1), r_{45} (2), r_{90} (3)

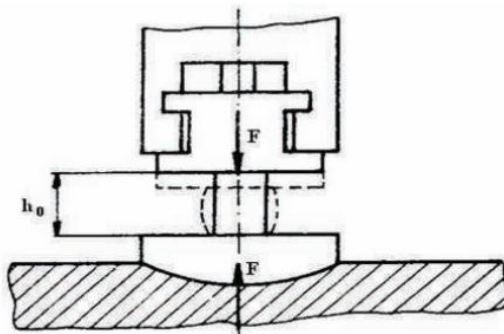
[19]

- Plošná Δr anizotropie nám určuje vznik cípů na výtažku.
- Exponent deformačního zpevnění n (ČSN ISO 10275 Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem)
 - Exponent deformačního zpevnění je odvozen ze vztahu:
 $\sigma = C * \varphi^n; n_s = 0,25 (n_0 + 2n_{45} + n_{90})$.
 - $n_0, 2n_{45}, n_{90}$ značí exponenty zpevnění ve směrech $0^\circ, 45^\circ$ a 90° ke směru válcování.
 - $n_s < 0,215$ špatná plastičnost
 - $n_s = 0,215 - 0,250$ dobrá plastičnost
 - $n_s > 0,250$ velmi dobrá plastičnost

Dalšími zkouškami, kterými se dá určit tvařitelnost jsou:

➤ Zkouška pěchovací

- Cílem zkoušky je zjistit mez pevnosti v tlaku $R_{mt} = \frac{F_{mt}}{S_0} [MPa]$



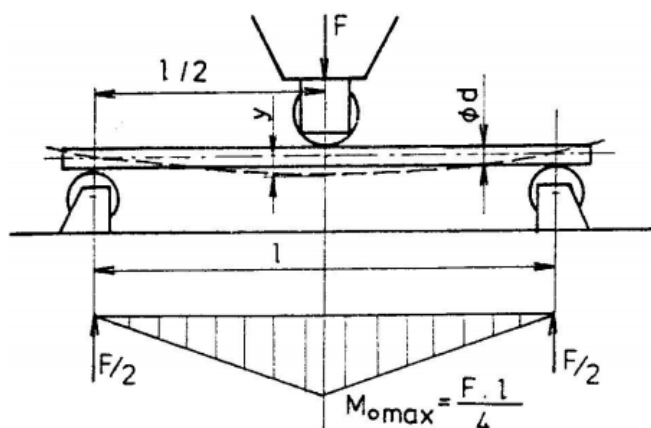
Obrázek 3 Schéma zkoušky pěchovací [9]

Symbolsy a jednotky pro zkoušku pěchovací:

- F_{mt} – tlaková síla [N]
- h_0 – Počáteční výška [mm]
- S_0 – Počáteční průřez [mm^2]

➤ Zkouška ohybem

- Cílem zkoušky je zjistit pevnost v ohybu $R_{mo} = \frac{M_{o\ max}}{W_o} [MPa]$
- Maximální ohybový moment $M_{o\ max} = \frac{F \cdot l}{4} [N \cdot mm]$



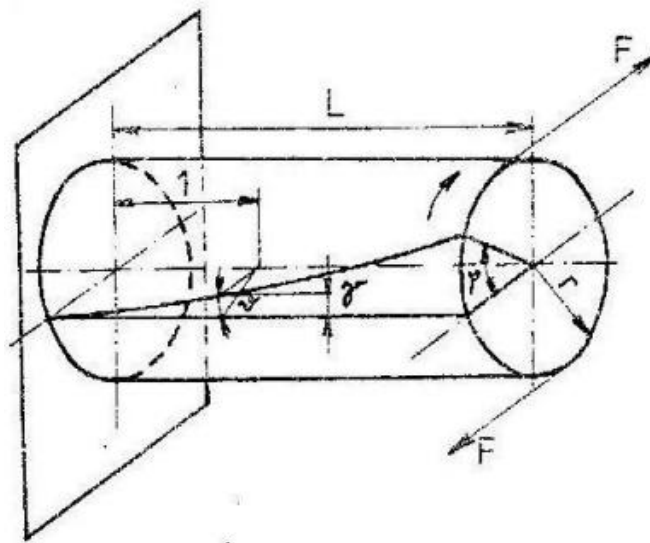
Obrázek 4 Schéma zkoušky ohybem [9]

Symbols a jednotky pro zkoušku ohybem:

- F – síla [N]
- $\varnothing d$ – průměr zkušebního tělesa [mm]
- l – délka podpor [mm]
- $M_{o\max}$ – maximální ohybový moment [N.mm]
- W_o – průřezový modul v ohybu [mm³]

➤ Zkouška krutem

- Cílem zkoušky je zjistit maximální napětí v krutu: $R_{mk} = \frac{M_{k\max}}{W_k}$ [MPa]

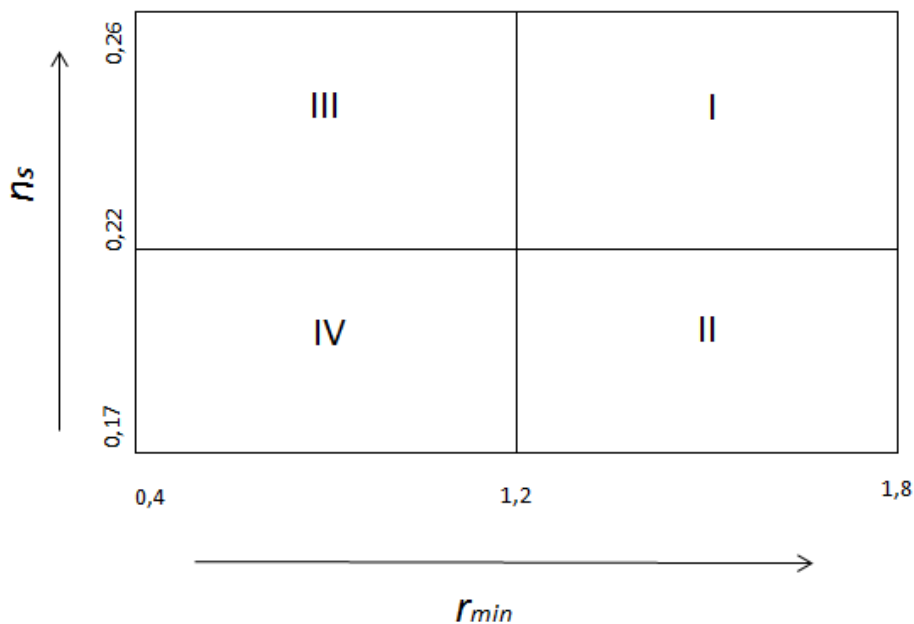


Obrázek 5 Schéma zkoušky krutem [9]

Symbols a jednotky pro zkoušku krutem:

- F – síla [N]
- r – poloměr zkušebního tělesa [mm]
- L – délka zkušebního tělesa [mm]
- $M_{k\max}$ – maximální ohybový moment [N.mm]
- W_k – průřezový modul v krutu [mm³]

Jedním ze způsobů jak vyhodnotit vhodnost plechů k tváření je Liletův diagram. Tento diagram porovnává součinitele plastické anizotropie r a exponentu deformačního zpevnění n . Tyto hodnoty získáme ze zkoušky tahem. U obou parametrů platí, že čím vyšší tím lepší tvařitelnost.

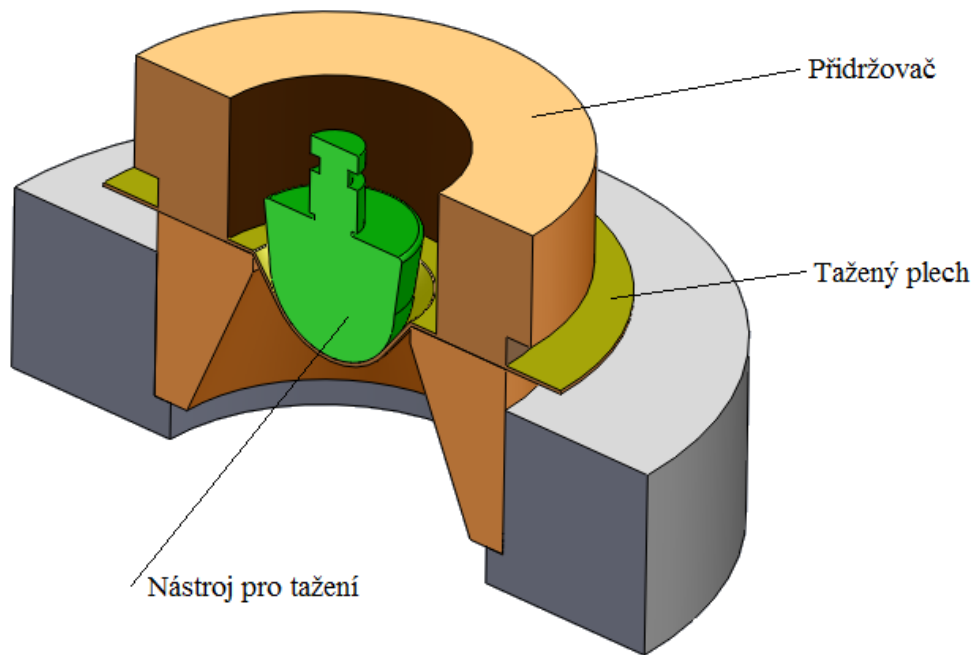


Obrázek 6 Liletův diagram

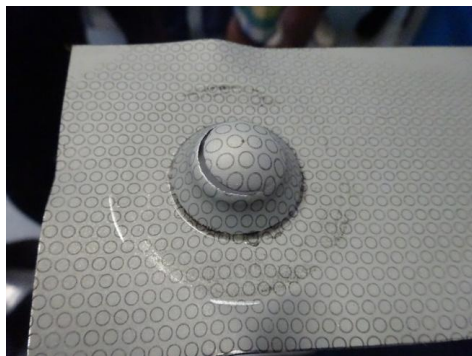
- I. Plechy s výbornou tvařitelností
- II. Plechy pro případ převažující tlakové napjatosti
- III. Plechy vhodné pro případ kde převládá dvojosá napjatost
- IV. Plechy nevhodné pro hluboké tažení

2.1.2 Technologické zkoušky

- Zkoušení hloubením dle Erichsena
 - Při této zkoušce ocelová kulička o daném průměru deformuje plech tím, že se do něj vtlačuje určitou silou.
 - Zkouška končí iniciací trhliny
 - Měří se vzdálenost od prvního doteku kuličky do vzniku trhliny
 - Čím je tato vzdálenost větší tím je tvařitelnost daného materiálu větší
 - Pokud se trhliny šíří v sousledných kružnicích je materiál velice vhodný pro tvářecí operace a pokud se šíří paprskovitě od středu je materiál nevhodný pro tváření. [1]

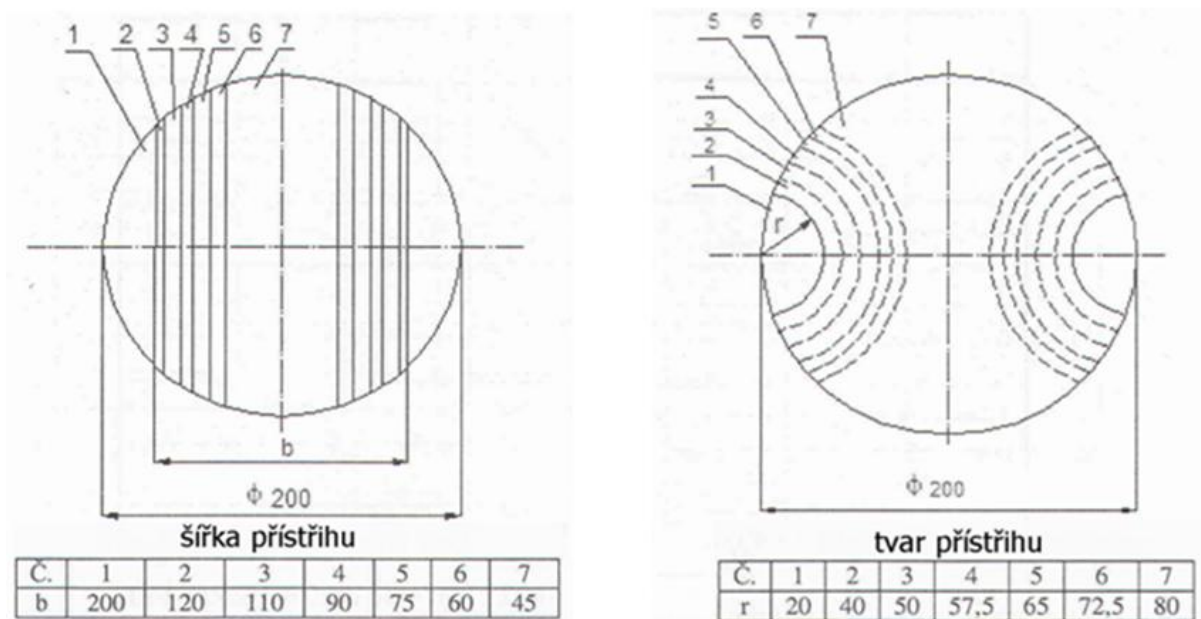


Obrázek 7 Řez testovacího stroje pro zkoušku dle Erichsena



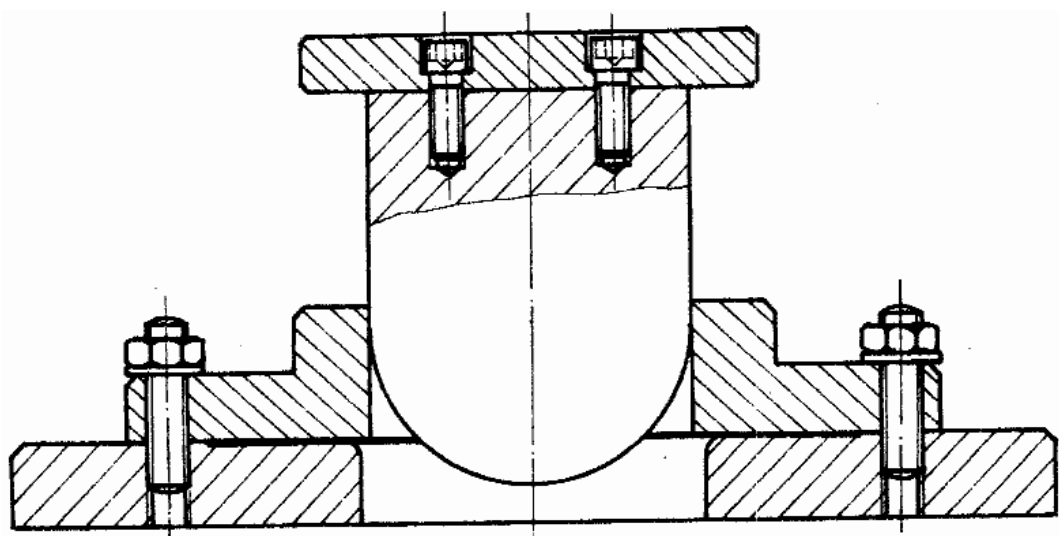
Obrázek 8 Výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena

- Tažná zkouška s polokulovitým tažníkem [1]
 - Díky této zkoušce můžeme vykreslit celý průběh mezních křivek.
 - U této zkoušky používáme různé tvary a velikosti přístřihů, kvůli tomu abychom dokázali zakreslit obě strany FLD diagramu.
 - Zkouška má výhodu tření nástroje s materiálem, tím se dokážeme přiblížit reálným podmínkám.

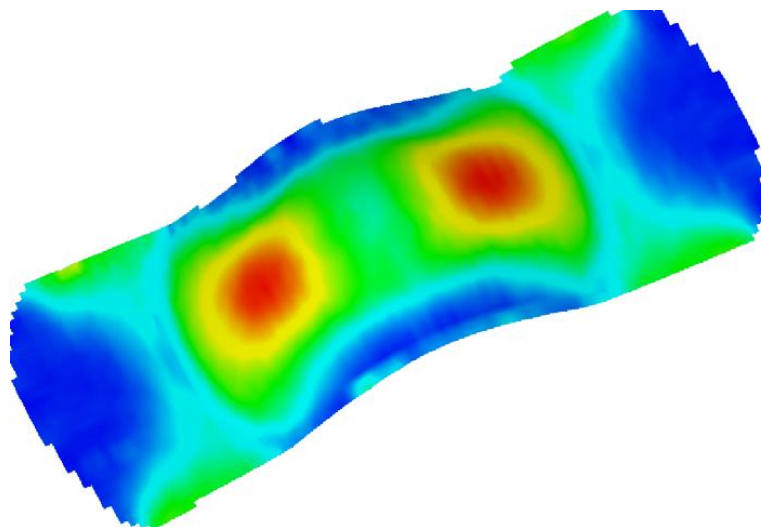


Obrázek 9 Tvary přístřihů pro zkoušku polokulovým tažníkem, b – šířka přístřihu [mm]

[1]

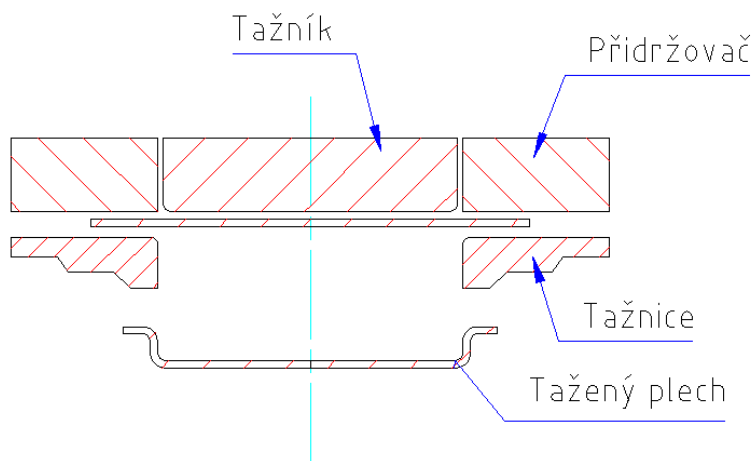


Obrázek 10 Schéma přípravku pro tažení [1]



Obrázek 11 Příklad vyhodnocení zkoušky polokulovým tažník systémem ARGUS [28]

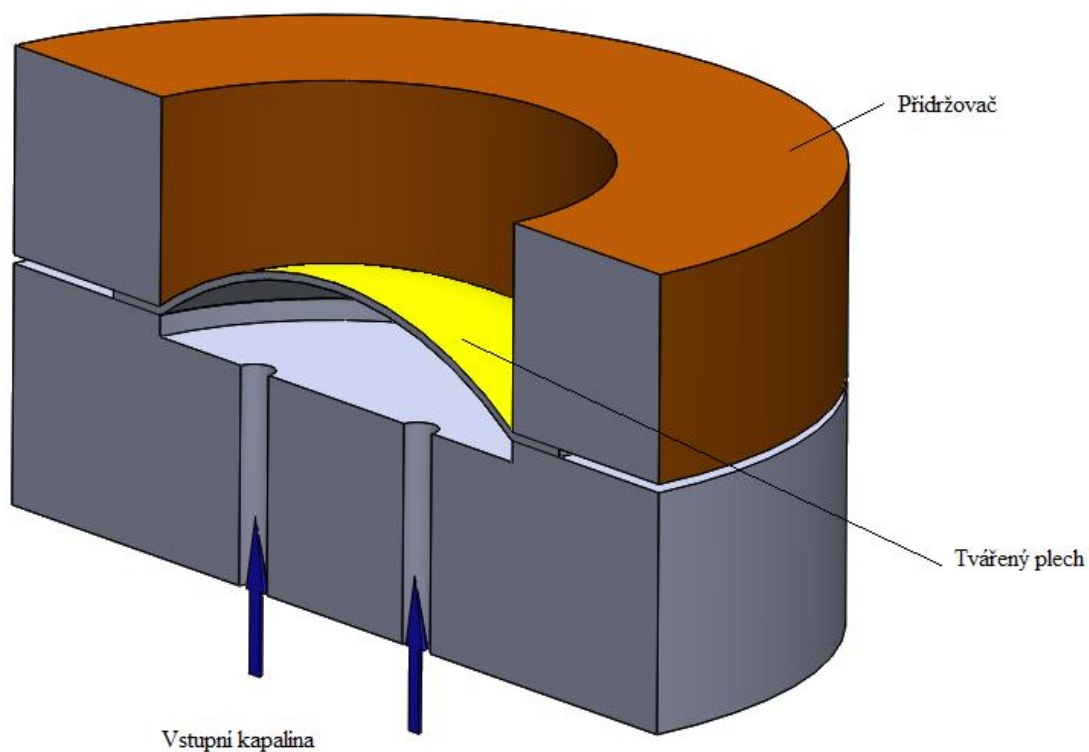
- Zkouška kalíškovací
 - Zkouška určuje vhodnost materiálu pro hluboké tažení. [1]



Obrázek 12 Schéma kalíškovací zkoušky

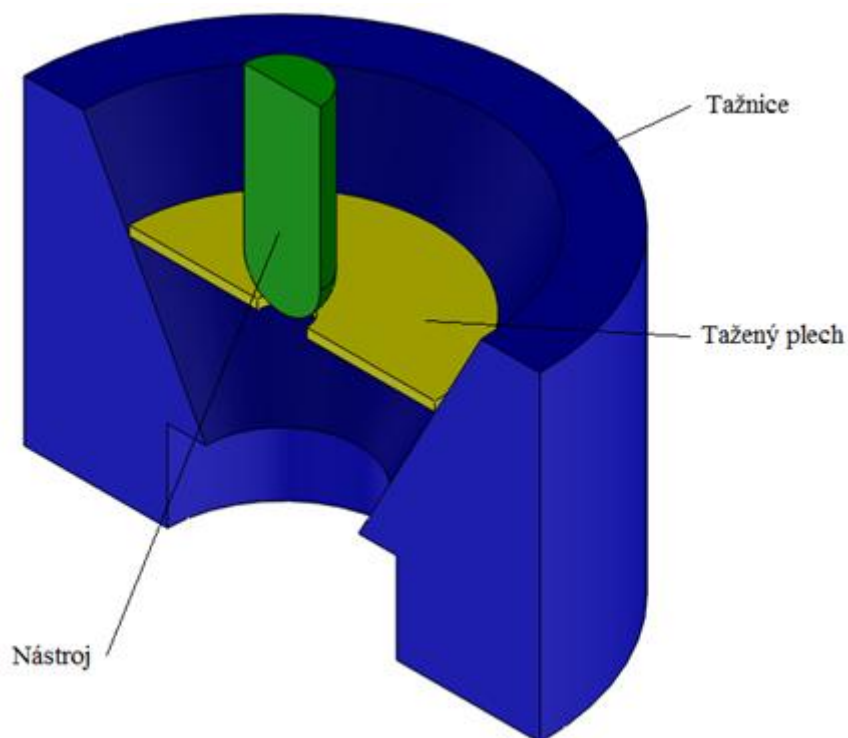
- Zkouška hydrostatická vyboulovací

Při této zkoušce se zkoušený plech uchytlí přidržovačem a poté je ze spodu přiváděná kapalina (nejčastěji olej) a tím vypínáme plech do vzniku trhliny. Nevýhodou této zkoušky je znečištění okolí po vzniku trhliny a rozstříknutí přívodního media oleje. Díky této zkoušce můžeme vykreslit pouze pravou část FLD diagramu. [1]

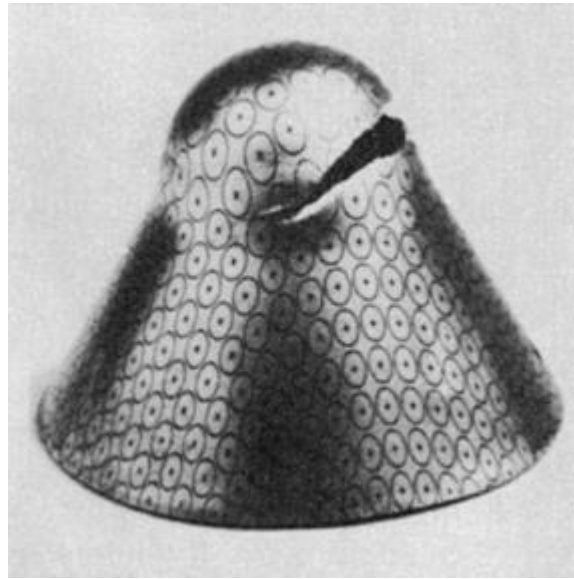


Obrázek 13 Schéma zkoušky hydraulické vyboulovací

- Zkouška Fukuiho – zkouška tažením v kuželové tažnici
 - Zkouška může být s vyvrtaným otvorem v plechu, nebo bez něj.



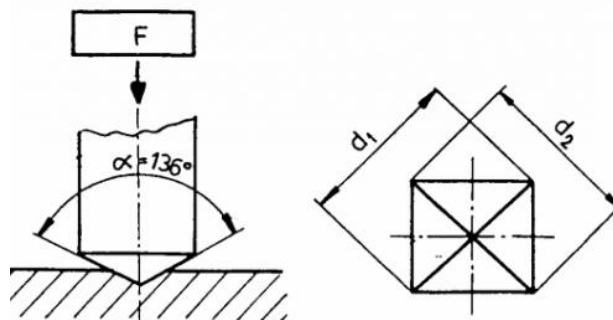
Obrázek 14 Princip zkoušky podle Fukuiho



Obrázek 15 Výsledek zkoušky dle Fukuiho [30]

➤ Zkouška mikrotvrdomosti [1]

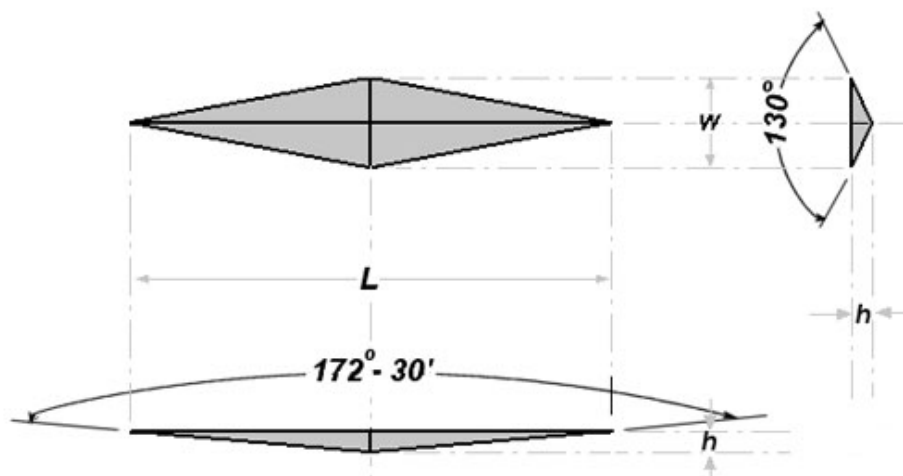
- Měřením mikrotvrdomosti v trhlíně a mikrotvrdomosti v okolním materiálu můžeme určit, do jaké míry byla vyčerpaná zásoba plasticity.
- Zkušební těleso je ve tvaru čtyřbokého jehlanu, neboli zkouška dle Vickerse případně dle Knoopa. Zkušebním zařízením je mikrotvrdoměr.
- Zatěžovací síla od 0,01N do maximálně 2N.



Obrázek 16 Ukázka zkoušení tvrdosti (mikrotvrdomosti) dle Vickerse [29]

Symboly a jednotky:

- d_1, d_2 – velikost úhlopříček čtyřbokého jehlanu zkušebního tělesa [mm]
- F – zatěžující síla [N]



Obrázek 17 Ukázka zkoušení tvrdosti (mikrotvrdosti) dle Knoop [29]

Symboly a jednotky:

- L – délka jehlanu [mm]
- W – šířka jehlanu [mm]
- h – výška jehlanu [mm]

2.2 Používané materiály v plošném tváření

Abychom dokázali zkoušky adekvátně vyhodnotit, je nutné znát počáteční podmínky. To zahrnuje především rozměry zkušebního tělesa a také mechanické vlastnosti. Materiály používané k plošnému tváření v automobilovém průmyslu, musejí mít výbornou tvařitelnost, tak abychom mohli tvářet materiál do tvarů, které potřebujeme. Nejčastější použití plechů je třídy DC(01-06) a třídy HX (170, 180, 220), tyto materiály se používají především na pohledové části. Dále potom například vysoko-pevné oceli použité na sloupky, nosné části karoserie a deformační zóny.

Značení daných ocelí [13], [14]:

➤ Příklad ocele třídy DC

○ DC06+ZE50/50-B-PO

- DC06 – Označení oceli (pro oceli DC máme označení 01-06). Číselné označení nám určuje mechanické vlastnosti a jejich rozptyl.
- ZE50/50 – Elektrolyticky pozinkovaný materiál, kde číslo 50 udává tloušťku zinkové vrstvy, v tomto případě 5 μ m.
- B – Kvalita povrchu

- PO – Určuje jak je povrch plechu dále upravený, tato značka říká, že povrch je fosfátovaný a olejovaný.
- Příklad ocele třídy HX
 - HX180YD-Z100-M-C-O+NIT
 - HX180 – Označení oceli. Číslo 180 nám označuje minimální smluvní mez kluzu.
 - Z100MCO – Žárově zinkovaný povrch
 - M – Malý zinkový květ.
 - C – Kvalita povrchu
 - O – Povrch je olejovaný

Tabulka 1 mechanické vlastnosti oceli třídy DC06 [ČSN EN 10152]

Označení		Symbol	Definice a klasifikace oceli podle EN 10020:2000	Dezoxidace oceli	Doba platnosti mechan. Vlastností	Jakost povrchu	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%] min.	r_{90} min.	n_{90} min.
Značka oceli	Číselné označení										
DC06	1.0873	+ZE	legovaná jakostní ocel	úplně ukladněná	6 měsíců	A, B	-/180 ^e)	270 - 350	41	2,1	0,21

Tabulka 2 Chemické složení oceli DC06 [15]

C	Mn	P	S	Ti
max 0,02%	max 0,25%	max 0,02%	max 0,02%	max 0,3%

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti pro ocel HX 180[15]

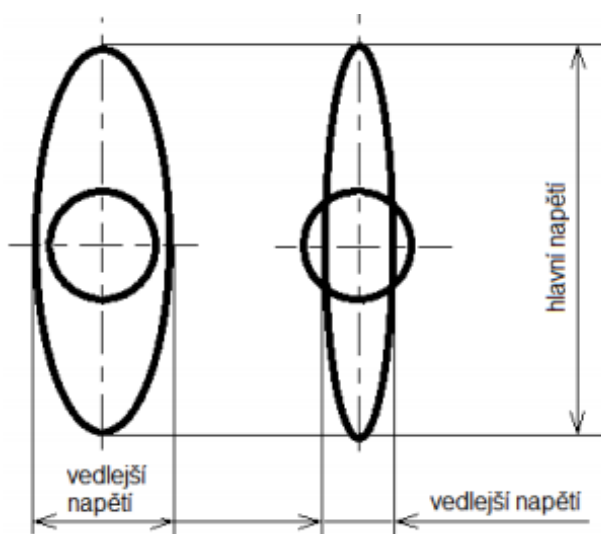
Označení		Symboly pro druhy dodávaných povlaků	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Index Bake-Hardening BH ₂ [MPa] min.	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%] min.	Součinitel plastické anizotropie r_{90} min.	Exponent deformačního zpevnění n_{90} min.
Značka oceli	Číselné označení							
HX180YD	1.0921	+Z, +ZF, +ZA, +AZ, +AS	180-240	-	330-390	34	1,7	0,18

3 MĚRNÉ SÍTĚ

Měrné sítě slouží k vyhodnocování velikosti deformace plechu při plošném tváření. Deformaci, která vznikne během tváření je nutno změřit a toto měření se provádí pomocí elementů, které jsou součástí měrné sítě.

Výlisek, část karoserie, je lisován za pomoci lisovacího stroje, kterým je například hydraulický lis. Polotovarem pro tuto výrobní operaci je plech, který se odvíjí ze svitku. Při lisovacím procesu nástroj, skládající se z tažníku a tažnice, působí silou na materiál a vyvolává v něm napětí. Takovéto napětí se skládá převážně z dvou složek a to hlavního napětí (větší) a vedlejšího napětí (nižší).

Hlavní napětí je ve většině případů tahové a je způsobeno tečením materiálu kolem nástroje. Tření vznikající mezi nástrojem a materiálem způsobuje prodlužování a zároveň snižování tloušťky lisovaného materiálu. Na obrázku č.12 vidíme znázorněné hlavní a vedlejší napětí pomocí kruhového elementu a jeho deformace do elipsy.

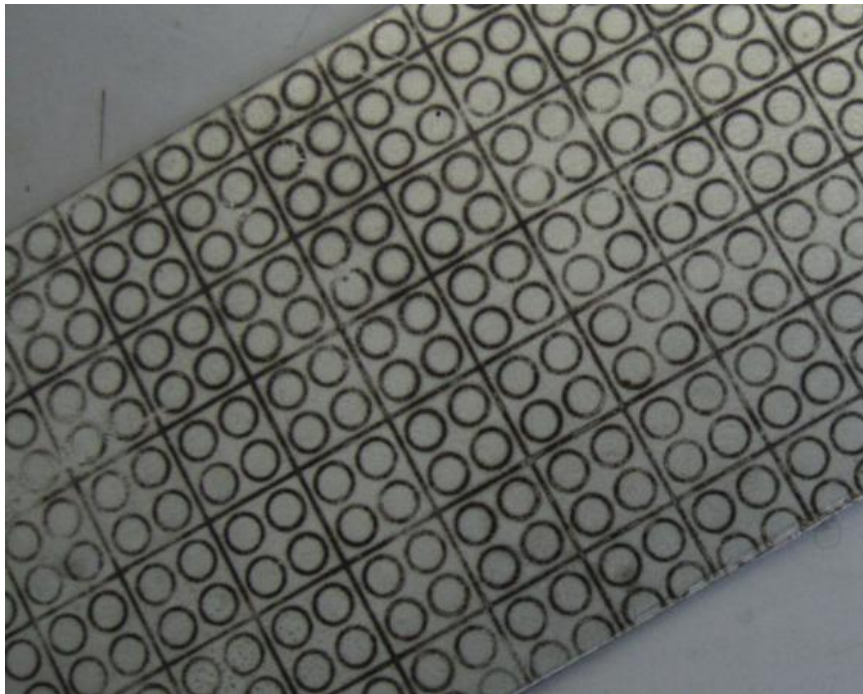


Obrázek 18 obrázek hlavních a vedlejších napětí ukázaných na deformaci elementu [4]

Pokud jedno z napětí vytvoří menší elipsu (element), než byla výchozí kružnice, tak to znamená, že v daném místě v daném směru působilo tlakové napětí.

Lisovaný materiál (plech) má určité vlastnosti, díky kterým lze dosáhnout například vysoce rozmanitých tvarů, jenž můžeme vidět u karoserií některých automobilů. Jednou z nejdůležitějších vlastností při plošném tváření je tažnost. Na té nejvíce záleží, do jaké míry můžeme materiál deformovat, než vznikne trhлина.

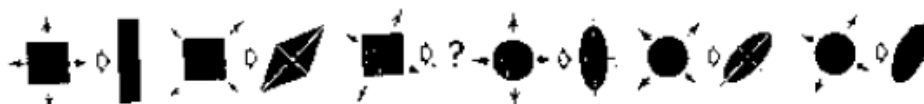
Pokud na polotovar (plech) před samotným lisovacím procesem nanese deformální měrnou síť viz. Obrázek 19. Dokážeme po zdeformování materiálu určit, v jakých směrech působilo hlavní a vedlejší napětí a jakou mělo intenzitu viz. Obrázek 18.



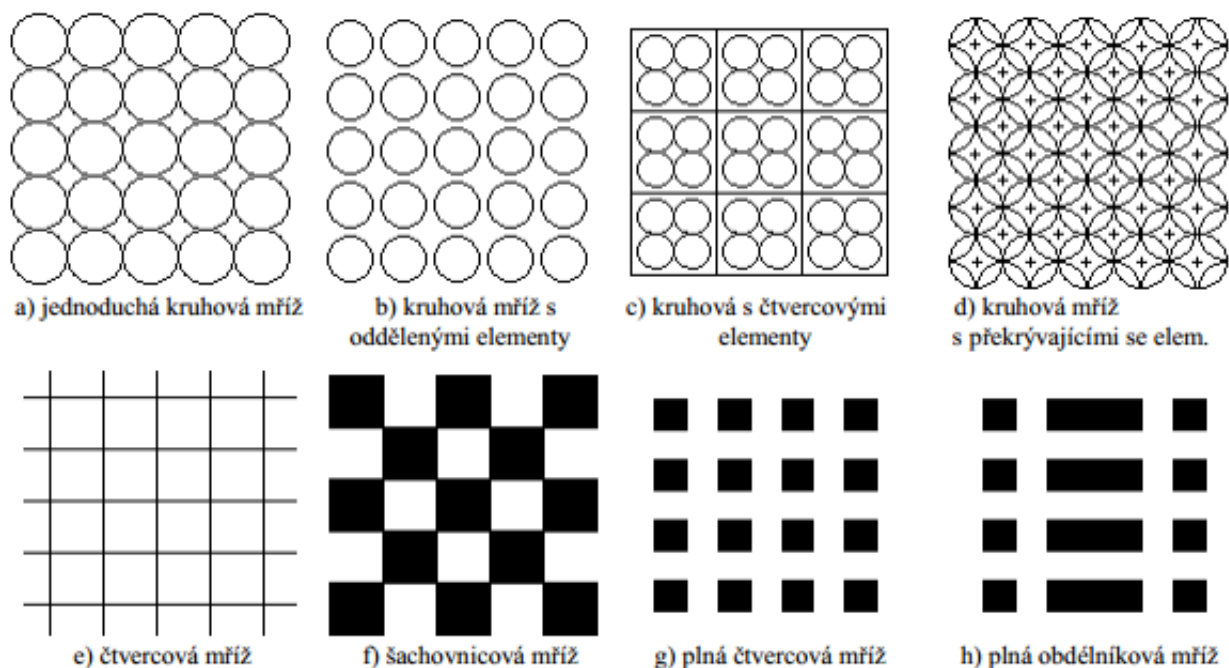
Obrázek 19 Elektrochemicky nanesená měrná síť [19]

3.1 Druhy měrných sítí

Existuje mnoho druhů měrných sítí, které se nanášejí na materiál. V praxi se nejčastěji používá síť s kruhovými elementy. Kružnice se vždy deformuje do elipsového tvaru a tím je jednoduché určit hlavní a vedlejší napětí. Velikosti elementů se standardními metodami dosahuje dvou milimetrů. Rozteč mezi středy jednotlivých elementů je 3 – 4 mm. Při menších rozměrech by síť vytvořená konvenčními metodami nedosahovala potřebné přesnosti a kvality. Podle potřeby lze kombinovat různé tvary sítí.



Obrázek 20 Různé tvary elementů na měrné síti [4]



Obrázek 21 Měrné sítě [5]

3.2 Nanášení měrných sítí

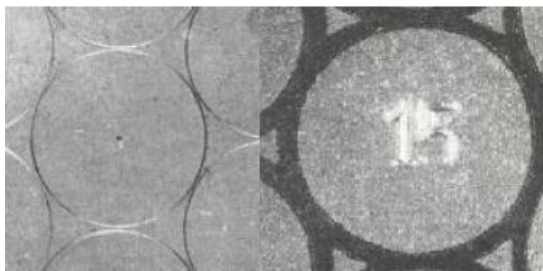
Metoda, kterou zvolíme pro nanášení sítě, nám rozhoduje o kvalitě, čitelnosti a odolnosti sítě proti opotřebení. Dalším faktorem je ovlivnění povrchu zkoušeného materiálu. Metoda by měla být spolehlivá, opakovatelná a na tolik univerzální aby se dala použít na co nejvíce povrchů v různých velikostech.

3.2.1 Metody mechanicky ovlivňující povrch materiálu

Tyto metody poškodí povrch materiálu a tím dají zárodky k iniciaci trhlin. Díky tomu může dojít k porušení materiálu dříve, než by ve skutečnosti bez nanášení sítě došlo. Další nevýhodou je malá rychlost vytváření. Velkou výhodou jsou nízké pořizovací náklady.

Druhy mechanicky nanášených sítí [5], [10]:

- Orýsování jehlou, nebo kružítkem
- Ražení měrných sítí



Obrázek 22 Vlevo snímek sítě zhotovený rytím a vpravo element vyražený razítkem [2]

3.2.2 Metody bez výrazného poškození povrchu materiálu:

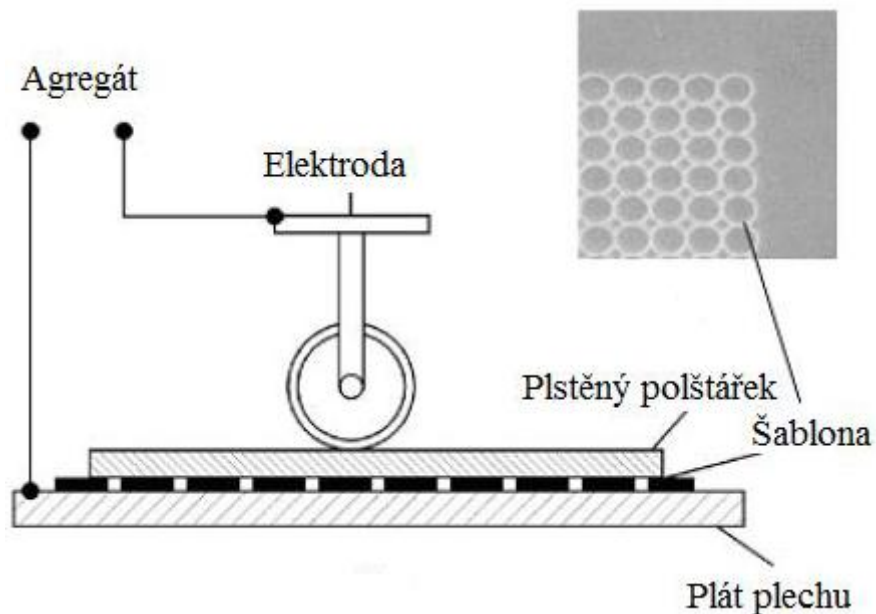
Metody fungují na principu nanesení barvy na povrch nebo chemické naleptání, čímž dostanu čitelnou síť. Tyto metody jsou dražší než předešlé, ale mají větší efektivitu a dosahuje se s nimi přesnějších výsledků. Ovlivnění povrchu je daleko menší než u předešlých metod.

- Sítotiskem [23]
 - Nanášení sítě přes průhlednou hedvábnou folii pomocí inkoustu.
 - Nejstarší metoda vytvoření sítě



Obrázek 23 Deformační síť nanesená sítotiskem

- Fotografická metoda
- Fotografická metoda se zaleptáním
- Fotochemické leptání sítí
- Elektrochemická metoda [23]
 - V dnešní době v praxi nejpoužívanější metoda.
 - Tato metoda je efektivní, rychlá a síť je odolná proti opotřebení během tváření.



Obrázek 24 Schéma nanášení sítě elektrochemickou metodou [21], [22], [23]

- Metoda nanášení sítí laserem

Tabulka 4 Porovnání jednotlivých metod [21], [23], [37]

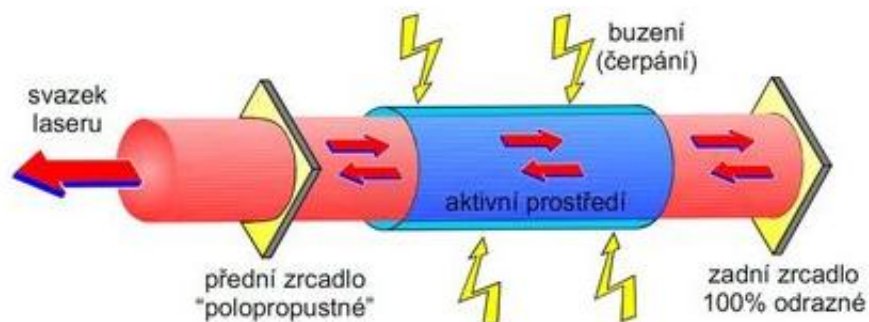
Metoda nanesení měrných sítí	Sledované parametry					
	Přesnost	Rychlost nanášení	Odolnost proti otěru	Cena metody	Mobilita	Napojení sítí na sebe
Sítotisk	C	C	D	B	C	E
Fotochemické leptání	C	C	B	D	C	E
Elektrochemické leptání	B	B	A	C	B	E
Laserem nanesené sítě	A	B	A	E	D	A

Popisky: A – výborné, B – velmi dobré, C – Dobré, D – dostačující, E – nedostačující

3.3 Možnosti laserového popisu materiálu

Základní dělení a princip laseru:

Laser stimuluje fotony do koncentrovaného pulsu, tím je generováno elektromagnetické záření. Laser je využíván pro mnoho účelů. Laserem můžeme například dělit materiál, tepelně (povrchově) zpracovávat a nebo popisovat materiály. V následující kapitole se budu věnovat především laserům, které se používají k popisování materiálů. [26]



Obrázek 25 Základní schéma laseru [26]

Základní dělení laserů podle media nacházejícího se v aktivním prostředí [11], [26]:

- Vláknové lasery – Buzení probíhá pomocí laserových diod, kde jejich záření pomocí optického vlákna vedeme do aktivního prostředí, které je tvořeno také optickým vláknem. Aktivní prostředí je podporováno atomy prvku erbia (Er) nebo atomy prvku yterbia (Yr). Tento druh laseru byl použit jako součást diplomové práce pro popis deformační sítě.
- Plynové lasery – Plyn, který tvoří aktivní prostředí laseru je buzen elektricky, opticky nebo radio-frekvenčními vlnami. Pro skupinu jsou dva typičtí představitelé CO₂ nebo He-Ne lasery.
- Pevno-látkové lasery – u těchto laserů buzení nejčastěji probíhá opticky například laserovými diodami. Aktivní prostředí je pevný krystal a představitelem skupiny je Nd:YAG laser.
- Chemické lasery – budícím prostředkem je chemická reakce
- Polovodičové (diodové lasery) – aktivní prostředí je čerpaná polovodičová dioda. Výhodou těchto laserů je vysoká účinnost, ale nevýhodou je nízká kvalita výstupního paprsku.

- Barvičkové lasery – aktivním prostředím je organické barvivo.
- Excimer lasery

Dělení podle vlnové délky [11]:

- Lasery s krátkou vlnovou délkou – UV lasery využívající tzv. studený proces popisu materiálu (Cold-marking proces). Vlnová délka těchto laserů se pohybuje 1-380nm. V této kategorii nalezneme například excimerový laser. Využití v popisu především velmi tenkých materiálů, a velmi malých součástí, jako jsou kabely atd.
- Lasery s viditelnou vlnovou délkou – principem popisu je působení tepla nebo tlaku na materiál. Nejčastěji se používají k popisu kovových materiálů. Představiteli mohou být například pevno-látkové lasery. Vlnová délka 400-750nm.
- Lasery s dlouhou viditelnou délkou – infračervené lasery. Do této kategorie spadají plynové lasery. Jsou vhodné pro popis organických materiálů (kůže, dřevo...). Vlnová délka 750-3000nm.

Dělení podle režimu práce [26]:

- Pulzní – použití například pro laserové svařování
- Kontinuální – použití při řezání, kalení atd.

Metody laserového popisování:

Laserové popisování slouží k vytvoření určitého vzoru na povrchu materiálu. Metoda se volí podle druhu materiálu, přesnosti popisu, případně ovlivnění povrchu materiálu.

Laserové popisování můžeme rozdělit do dvou skupin [11]:

➤ Přímé metody

- Laser annealing – změnění barvy povrchu, tím že ho žíhám. Tato metoda je použitelná pro kovy.
- Laser coloring – tato metoda nijak neovlivňuje povrch daného materiálu z hlediska teplot nebo úběru. Nízko-výkonový paprsek prochází materiálem a za pomalé rychlosti díky tomu velice kvalitní a kontrastní popis. Popis může mít vliv na materiály s dřívějším tepelným zpracováním popřípadě snížení korozní odolnost u korozivzdorných materiálů. Popisování se nedoporučuje pro součásti tenčí než 2,5mm. Dále pro korozivzdorné a uhlíkové materiály.
- Laser etching – změna barvy díky povrchovému tavení. Možnost použití na kovy. Princip je podobný jako u laser coloring, ale paprsek dodá povrchu více energie a tím ho lokálně nataví. Trhliny, které vzniknou během chladnutí materiálu, se mohou šířit například při cysklickém namáhání dále do materiálu. Tato metoda není doporučena pro součásti tenčí než 1,3mm.
- Laser engraving – změna textury povrchu odpařováním materiálu. Výhodou je vysoká rychlost popisu. Dochází k nižšímu poškození než u laserového leptání.
- Laser shock peening – vytvoří popis za pomoci rázové vlny. Proces je vhodný pro popis kovů. Metoda nechává v místě působení zbytkové napětí, což je vhodné u materiálů namáhané na únavu.

➤ Nepřímé metody

- Laser bonding – laserové spojování
- LENS proces – mikro-navarování laserem. Pomocí laserového paprsku se nataví povrch materiálu a do roztaveného kovu se vstříkne kovový prášek. Během procesu vzniká malá tepelně ovlivněná oblast.

Tabulka 5 Porovnání jednotlivých metod popisu [11]

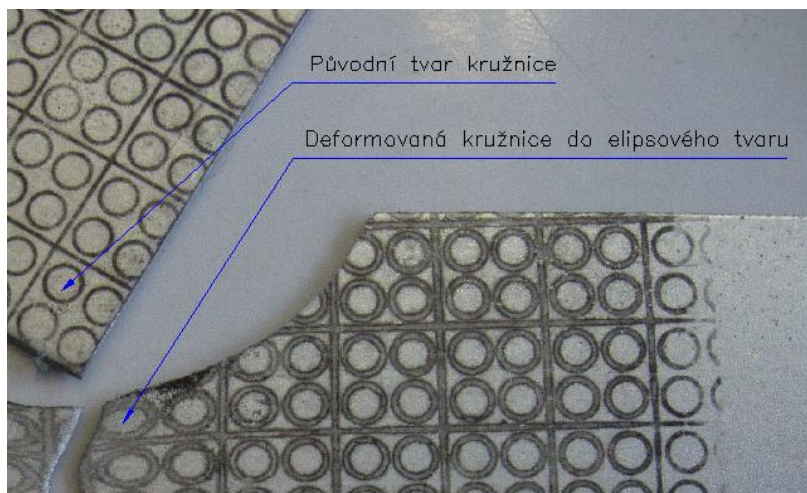
Porovnání jednotlivých metod popisu					
Metoda	Typ laseru	Rychlost popisu	Kvalita popisu	Odolnost popisu	Úběr materiálu
Laser coloring	Nd:YAG	Pomalá	Výborná	Výborná	NE
Laser etching	Nd:YAG	Rychlá	Velmi dobrá	Výborná	ANO
Laser engraving	Nd:YAG	Rychlá	Dobrá	Výborná	ANO
Laser shock peening	Nd:glass	Rychlá	Dobrá	Výborná	NE

Nd:YAG laser je jeden z nejpoužívanějších pevno-látkových laserů. Laser může budit záření v impulsivním i kontinuálním režimu.

Vhodnou metodou pro popis plechů v automobilovém průmyslu by mohla být laserová metoda Laser coloring. Kvalita popisu je výborná a zároveň odolná proti otěru, takže během tvářecího procesu bude odolná proti působení nástroje a poté bude čitelná. Výhodou je, že během nanášení deformační sítě nedojde k úběru materiálu.

3.4 Vyhodnocování měrných sítí

Vyhodnotit deformační síť je nutné pro další analýzu a chování materiálu v procesu tváření. Deformace plechu, která provází tvářecí operaci, se projeví na síti, která je na povrchu aplikovaná a deformuje daný element jak lze vidět na Obrázek 26.

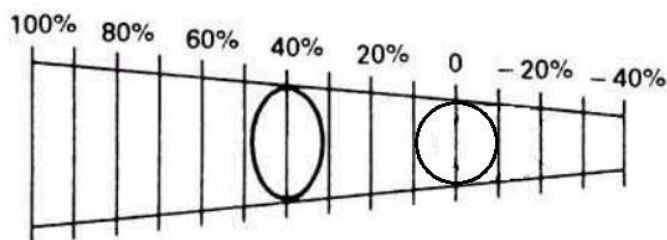


Obrázek 26 Porovnání deformované a nedeformované sítě [19]

Vyhodnocení zdeformované sítě se může vyhodnocovat buď ručně, nebo automatizovaně strojně.

➤ Ruční vyhodnocování

Tato metoda je neefektivní a pomalá, takže v dnešním průmyslu se takřka nepoužívá. K vyhodnocování se používá tzv. Mylarova páska, podle které určujeme velikost zdeformovaného elementu.



Obrázek 27 Princip Mylarovy pásky [21], [36]

➤ Strojní automatizované vyhodnocení

Automatizované vyhodnocování je v dnešní době nejpoužívanější způsob pro práci s měrnými sítěmi. Automatické měřicí systémy fungují většinou na principu fotogrammetrie. Výlisek je nasnímán fotoaparátem nebo natočen kamerou z určitého množství pohledů a poté se pomocí příslušného softwaru vyhodnocuje deformace nanesené sítě. Následné systémy jsou nejběžnější v dnešní moderní výrobě.

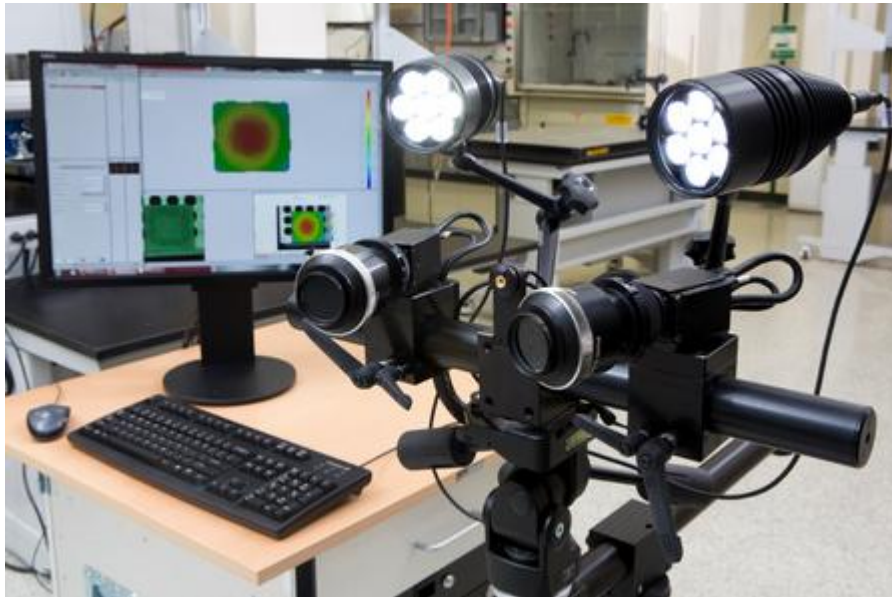
○ Měřicí systém ARGUS

3D Optický měřicí systém.

Bližší popsání v kapitole 3.5

○ Měřicí systém ARAMIS

Bezkontaktní měřicí systém od firmy GOM. Před lisovacím procesem se na povrch nanese kontrastní vzor pomocí spreje. Objekt je snímán dvěma CCD kamerami v jednotlivých fázích lisování. Poté jsou ze snímků pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice, bodů které leží na povrchu součásti. SW vypočítá porovnáním 3D posuvy, ze kterých zjistí tvar a deformaci objektu.



Obrázek 28 3D měřicí kamery systému ARAMIS [25]

- Měřicí systém MODEL 100U [5]

2D měřicí systém, který je určen pro měření kruhových nebo čtvercových elementů, mající velikost ideálně 2mm. Měření na různých poloměrech bude značně zkresleno, protože snímání probíhá pouze ve dvou rozměrech.



Obrázek 29 Ukázka snímání pomocí MODEL 100U [24]

- Měřicí systém ASAME Target model

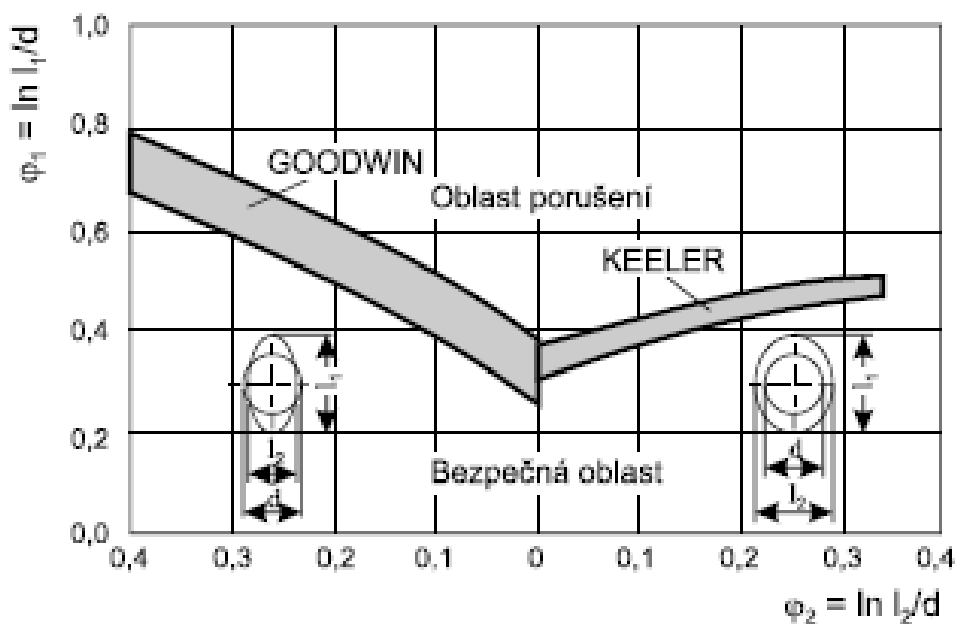
Další z řady bezkontaktních 3D měřících systémů. Jedná se o statické snímání, protože snímací zařízení je fotoaparát. Na povrch je umístěna krychle, díky které dokážeme určit velikosti deformace.



Obrázek 30 Příkladná ukážka systému ASAME Target model [24]

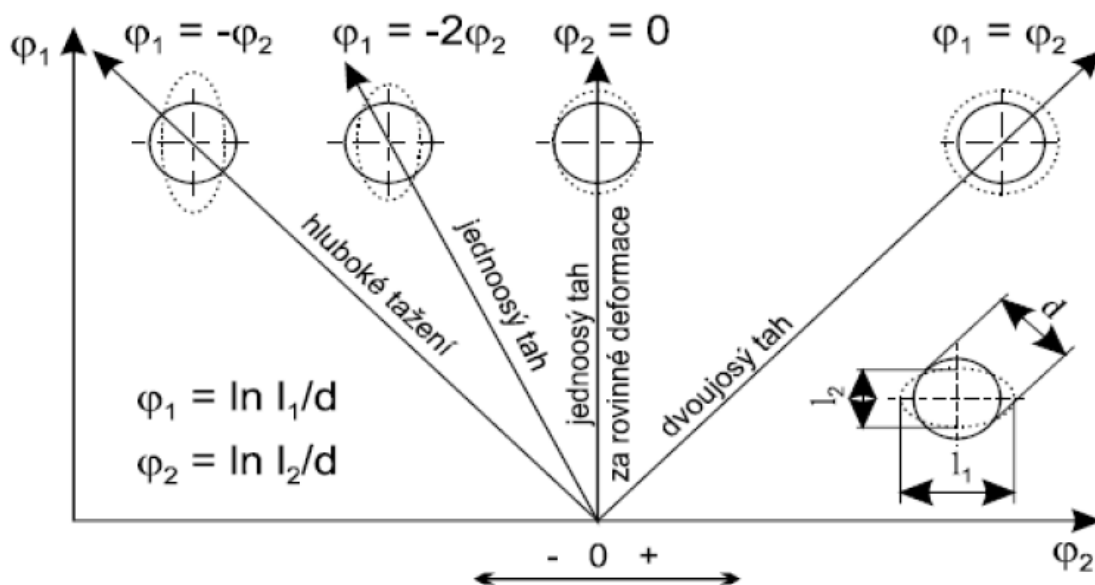
3.4.1 Limitní diagramy

Abychom dokázali popsat zásobu plasticity, potrebujeme nástroj k vyhodnocení síti zmíněných výše. Jeden z možných a nejčastěji používaných postupů jak, vyobrazit zásobu plasticity materiálu je vykreslení FLD (forming limit diagram) diagramu. [4]



Obrázek 31 KEELER-GOODVINŮV limitní diagram ve skutečných deformacích [4]

Tento diagram nám ukazuje, jak moc se může materiál deformovat, než dojde k jeho porušení. Šedé oblasti v diagramu jsou oblasti s náhodným výskytem trhlin. Zde může, ale také nemusí porušení vzniknout. K tomu abychom dokázali vykreslit daný FLD diagram nám slouží technologické a mechanické zkoušky. [4]



Obrázek 32 Deformace elementů znázorněna graficky

Hodnoty φ_1 , φ_2 nám ukazují stav plošné deformace. Podle hodnot φ_1 , φ_2 se nám utváří samotný KEELER-GOODVINŮV limitní diagram.

Technologickými zkouškami, které jsem popisoval v předešlých kapitolách, můžeme popsat různé části FLD.

- Pouze levá část: Tahová zkouška
- Pouze pravá část: Zkouška dle Erichsena, Hydrostatická vyboulovací
- Obě části: Tažná zkouška polokulovým tažníkem

3.5 Systém ARGUS

3D Optický systém pro měření deformací, který funguje na principu fotogrammetrie. Fotogrammetrie je obor, který se zabývá polohou, velikostí útvarů, které jsou na fotografických snímcích. [16]

3.5.1 Hardware potřebný ke snímání

K snímání a dalšímu vyhodnocování potřebujeme určitý hardware, který nám umožní analyzovat daný vzorek.

Součásti systému ARGUS:

- Kameny – Tyto kameny, jinak taky nazývané kódované značky, jsou umístěny pomocí magnetu na snímaný objekt. Každý kámen má specifický a jedinečný symbol na každé ze svých třech stran. Kameny mohou mít různé velikosti a volí se podle toho, jakou velikost má daný výrobek. Dále mohou být černé s bílými značkami, nebo bílé s černými značkami.
- Kódované měřky – Díky těmto měrkám dokáže software z fotografie rozpoznat vzdálenosti.
- Fotoaparát nebo kamera s pevnou ohniskovou vzdáleností.
- Počítač pro vyhodnocení fotografií.



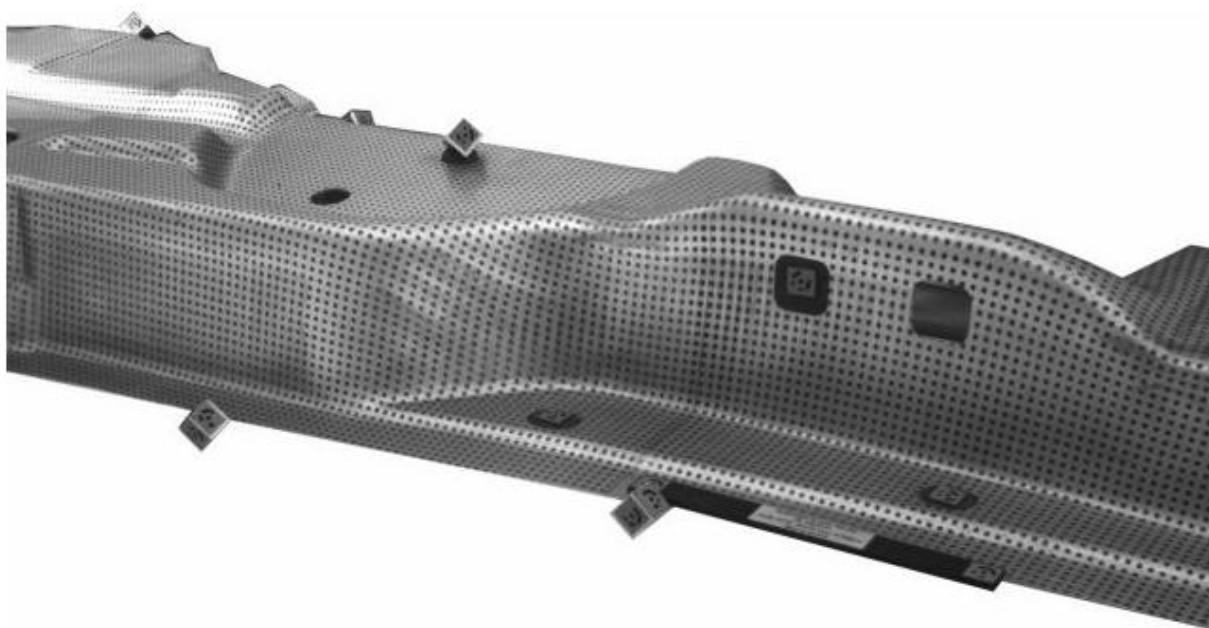
Obrázek 33 Kódované značky – kameny [17]

3.5.2 Princip snímání:

Na vylisovaný plech, na který před mechanickým zpracováním byla nanosená měrná síť, umístíme kódované značky viz. Obrázek 33. Počet, velikosti a umístění kamenů je individuální a záleží na zkušenosti obsluhy. Software si sám určí fotografie, které mu vyhovují a na které by se měli například přidat kameny, nebo zlepšit světelné podmínky. Každý kámen umístěný na výrobku musí být zaznamenán alespoň na třech fotografiích.

Další nedílnou součástí jsou kalibrované měrky, ty mají daný rozměr a svojí unikátní značku. Podle této značky software rozpozná, o kterou měrku se jedná. Tyto měrky jsou umístěny vždy dvě k výrobku a musejí být na sebe kolmo umístěné.

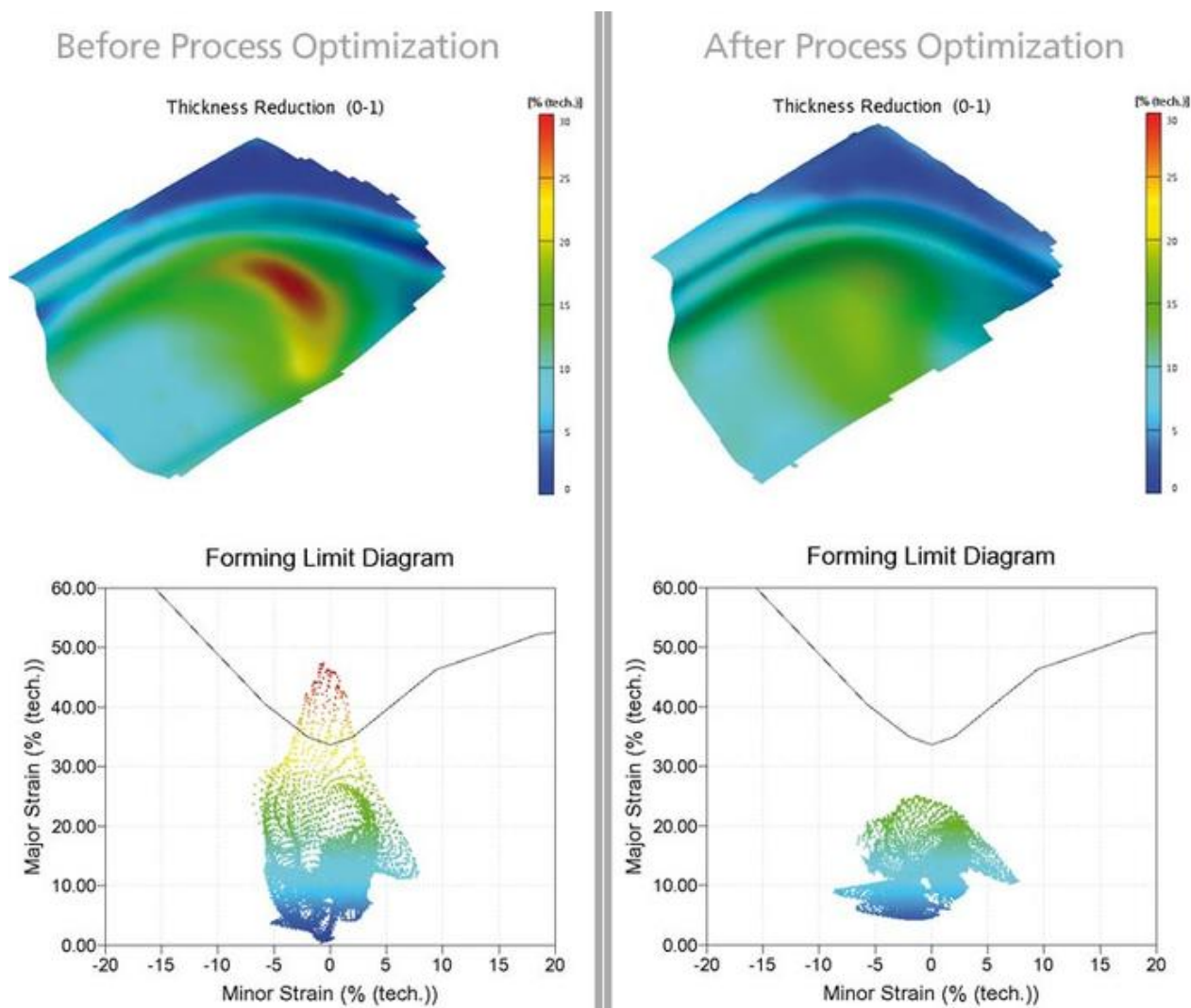
Během focení se už s měrkami ani kameny nesmí nijak pohybovat. Teplota v místnosti musí být stálá a musí se zaznamenat kvůli tepelné roztažnosti materiálů.



Obrázek 34 Příklad umístění kamenů a měřky na vylisovaném dílu [17]

3.5.3 Vyhodnocení systémem ARGUS

Po nafocení objektu spolu s kameny a měrkami dojde k nahrání fotografií do softwaru, ve kterém dojde k vyhodnocení. SW umí vyhodnotit ztenčení materiálu, vykreslit FLC limitní diagram viz. Obrázek 35, ukázat kritická místa i místa bez deformace. Systém ARGUS dokáže pracovat s širokou škálou velikostí dílů. Rozměry součástí se mohou pohybovat desítkách milimetrů až po několik metrů.



Obrázek 35 Vykreslení FLD limitního diagramu systémem ARGUS [27]

3.6 Základy metalografie

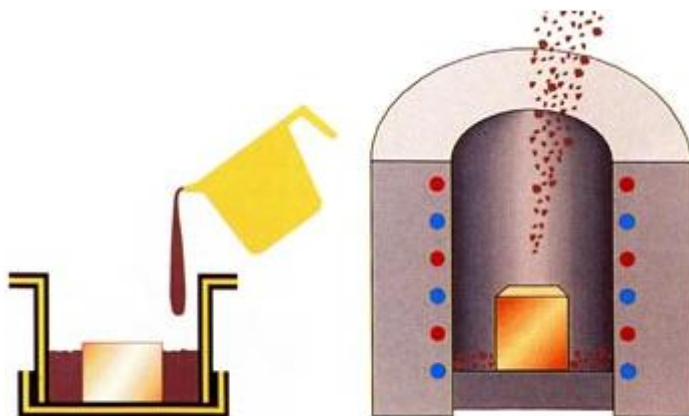
Metalografie je věda, zabývající se vnitřní stavbou kovů. Zkoumá strukturu kovů případně jejich slitin. K tomu abychom mohli sledovat strukturu materiálu pomocí optického nebo elektronového mikroskopu, musíme daný materiál předem upravit. Této úpravě se říká metalografický výbrus. Kovy, případně jejich slitiny jsou neprůhledné materiály, proto k jejich pozorování musíme využít odrazivost světla od povrchu. Abychom dosáhli potřebné odrazivosti, je nutné připravit vzorek s dokonale hladkou a rovnou plochou. V mé diplomové práci jsem použil metalografický výbrus ke kontrole tloušťky plechu v jednotlivých bodech, tak abych ověřil přesnost měření systému ARGUS. [32], [33]

Pomocí metalografie dokážeme definovat:

- Porovnání struktury materiálu s jeho vlastnostmi.
- Kontrola a sledování materiálu v průběhu výroby (kontrola mezi jednotlivými fázemi výroby).
- Nalezení vad výrobků, případné zjištění důvodu selhání zařízení.
- Určení velice přesně rozměry určitých výrobků.

Příprava vzorku [32], [33]:

- Odběr vzorku
- Preparace vzorku – používáme pro manipulaci s malými vzorky. Vzorek se zalévá kapalinou, která ztuhne, nebo práškem, který se roztaví a obklopí vzorek. O metodě preparace rozhoduje, zda preparujeme za tepla, nebo za studena.

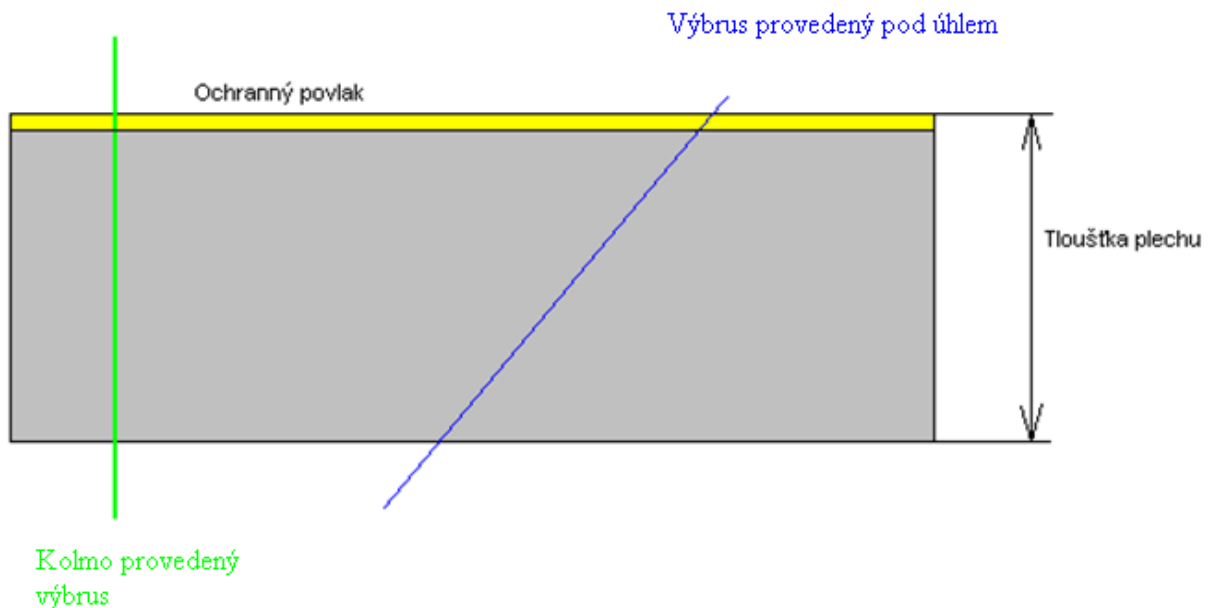


Obrázek 36 Vlevo preparace za studena (kapalina) vpravo za tepla (prášek) [33]

- Broušení – rozdělujeme podle velikosti a tvaru částic brusiva:
 - Velmi hrubé (1000-100 μ m)
 - Hrubé (100-10 μ m)
 - Jemné (10-1 μ m)
 - Velmi jemné (1-0,1 μ m)
- Leštění
 - Mechanické
 - Elektrolytické
 - Chemické

- Naleptávání – slouží k zviditelnění struktury
 - Leptání na hranice zrn
 - Plošné leptání
 - Selektivní leptání
- Pozorování
 - Optický mikroskop
 - Elektronový mikroskop

V mém případě jsem využil metalografický výbrus ke zjištění tloušťky plechu v místech, které jsem vyhodnotil ARGUSEM. Důležité je provedení řezu a jeho úhlu vůči povrchu. Mohou se provádět dva druhy výbrusů kolmo k povrchu materiálu, nebo pod určitým úhlem. Pod úhlem se dělají, pokud chceme zvětšit sledovanou plochu, například ochranného povlaku. U těchto výbrusů je nutné znát velikost úhlu, abychom dokázali dopočítat skutečnou šířku.



Obrázek 37 Ukázka metalografického výbrusu

4 POPIS DEFORMACÍ NA MALÝCH POLOMĚRECH

Jak jsem už zmínil v předchozích kapitolách konvenční metody vytváření měrných sítí jako je sítotisk, elektrochemická metoda, fotografická metoda a další, jsou nedostatečné z hlediska popisu malých poloměrů. Těmito metodami nedokážeme vytvořit dostatečně malé elementy a rozteč mezi nimi, tak abych zachoval výbornou čitelnost potřebnou k vhodnému vyhodnocení. Z těchto důvodů je nutné hledat metody, které by nám vyhovovaly. Jednou z metod, která by pravděpodobně dokázala s dostatečnou přesností popsat materiál, je laserové nanášení deformační sítě.

4.1 Laserové nanesení sítě

Daná metoda je použita jako součást práce. Je nutné zhodnotit její výhody a nevýhody v praktickém použití. Metoda nanášení laserem má relativně vysokou produktivitu a přesnost. Dokážeme vytvořit body o malých průměrech (0,1 mm) a tím dokážeme popsat i velice malé poloměry a prvky, na které ostatní metody nestačí. Požadavky pro nanesení sítí pomocí laserové technologie určila společnost Škoda Auto. Důležitým požadavkem na vytvořenou síť je její čitelnost, která je nutná pro vyhodnocení pomocí systému Argus. [11], [12]

4.1.1 Technické požadavky pro popis:

Tyto požadavky byly upřesněny společností Škoda auto. Jsou zadány tak, aby vyhovovaly výrobním specifikacím, při lisování karoserie automobilu.

- Materiály, na které se má síť nanést:
 - Žárově pozinkovaný materiál
 - Elektrolyticky pozinkovaný materiál
 - Materiál s povlakem zinek - hořčík
- Velikost sítě: minimálně A4
- Možnost vzájemného propojení sítí
- Nutné zamezení teplotního ovlivnění materiálu
- Možnost změny parametrů deformační sítě
 - Velikost elementů
 - Rozteč elementů
- Mobilní řešení – možnost použití ve výrobních podmínkách
- Zajištění potřebného zabezpečení a ochrany zdraví, podle použití laserů vyšší výkonové třídy [11], [12]



Obrázek 38 Ukázka příkladu nanesené sítě laserem bod o průměru 0,5mm a rozteč 1mm [11]

Tabulka 6 Základní parametry laseru použitého pro popis zkušebních vzorků [36]

Model		MD-F3020W
Popisovací metoda		XYZ 3-osé simultánní skenování
Popisovací laser	typ	Vláknový laser - třída 4 (IEC60825-1,FDA (CDRH) Část 1040.10)
	vlnová délka	1090 nm
	výkon	30 W
Frekvence		60 to 120 kHz
Velikost plochy pro značení		300 x 300 x 42 mm
Standartní pracovní vzdálenost (\pm variabilní vzdálest)		300 mm (\pm 21 mm)



Obrázek 39 Laser MD-F3020W [36]

Závěr:

Metoda nanášení sítí laserem se jeví jako vhodná volba pro popis deformací na malých poloměrech. Pomocí laseru dokážeme vytvořit velmi malé elementy o rozměrech až 0,1mm. Dalším krokem je zhodnotit čitelnost nanášené sítě, její přesnost, opakovatelnost a odolnost proti opotřebení.

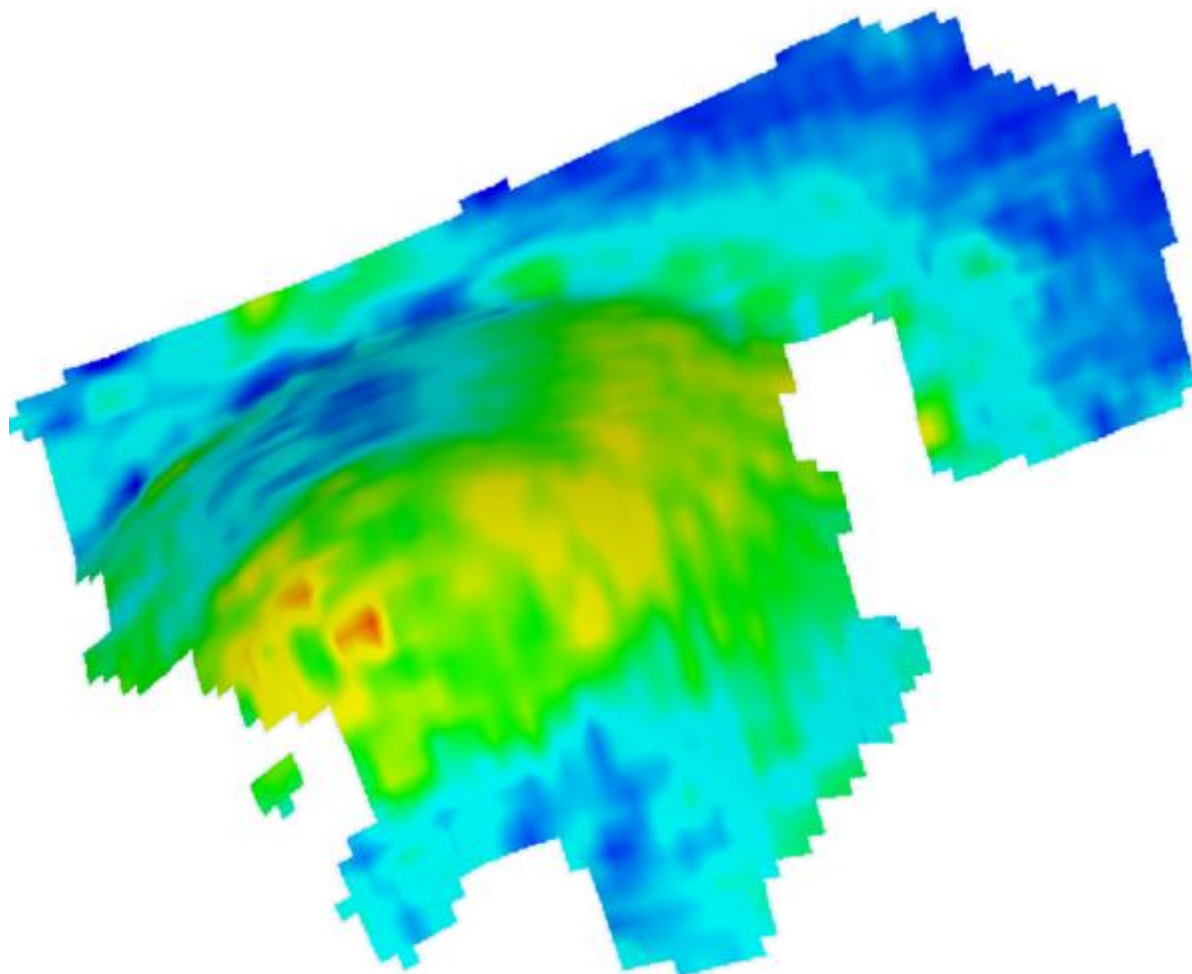
5 OVĚŘENÍ ČITELNOSTI NANESENÝCH SÍTÍ

Čitelnost je velmi důležitá vlastnost měrných sítí. Mohou jí ovlivňovat různé faktory. Sít' čitelná pouhým okem, nemusí být čitelná strojově, protože nesplňuje potřebný kontrast mezi jednotlivými elementy a základním materiálem.

Faktory ovlivňující čitelnost měrné sítě:

- Zvolený základní materiál – ten nám rozhoduje především když, zvolenou metodou popisování porušíme povrchovou úpravu a tím se dostaneme na základní materiál.
- Povrchová úprava materiálu
 - Tloušťka vrstvy
 - Metoda nanesení
- Metoda vytvoření sítě – jakou technologií sít nanášíme
 - Parametry vytváření
- Před-úprava povrchu – očištění od hrubých nečistot, odmaštění.
- Tvary elementů (nejčastěji se používají kruhové elementy – snadné zjištění směru hlavního a vedlejšího napětí)
 - Velikost elementů
 - Rozteč mezi elementy
- Světelné podmínky
 - Použití blesku při fotografování
 - Použití měkkého světla (fotografický deštník, světelná stan, softbox)

Pokud zvolíme nevhodnou metodu nanesení sítě, nebo zanedbáme některý z výše uvedených faktorů, může se stát, že sít' nebude čitelná. Dále sít' musí být odolná proti vnějšímu mechanickému poškození. Pokud je sít' poškozená nebo není dostatečně čitelná kvůli kontrastu na výsledném vyhodnocení a vykreslení tělesa budou volná místa. Tyto nepřechtené části můžeme nechat softwarem dopočítat, ale musíme počítat s určitou odchylkou. Nepřesnost bude záležet na tom, kolik a jak velké části se budou muset dopočítávat.



Obrázek 40 Příklad částečně nečitelné sítě [28]

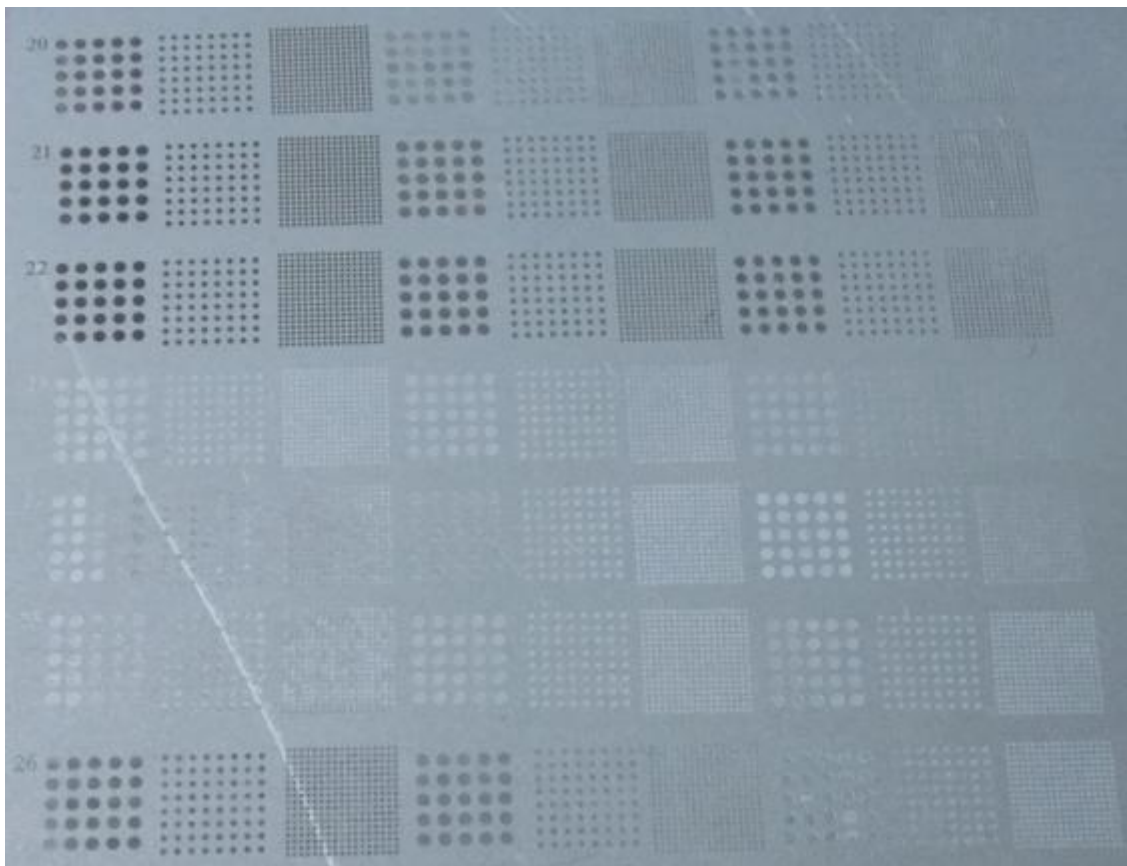
5.1 Ověření čitelnosti laserem nanesených sítí

Na vybrané druhy materiálů byla nanesená deformační síť, u které se mělo posoudit, zda je vhodná pro aplikaci do výroby. Jako zkušební vzorky se použili různě pozinkované plechy, kde se použily různé parametry.

Materiály, na které byla nanesená síť laserem:

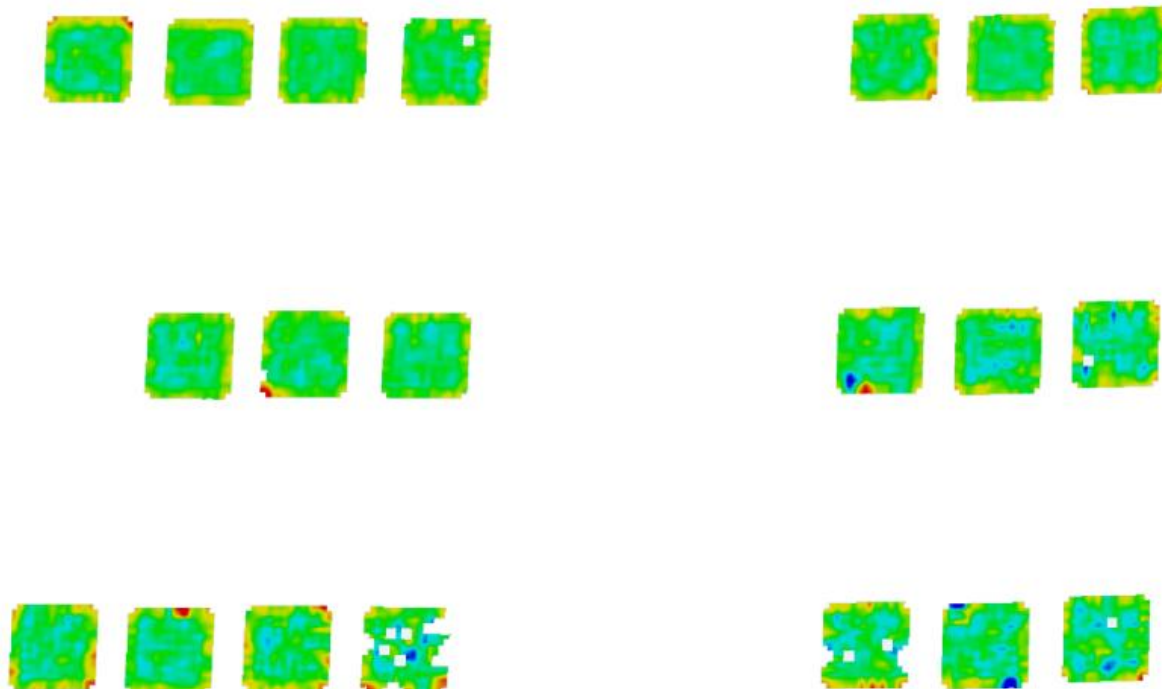
- Žárově pozinkovaný materiál – HDG
 - Základní materiál: ocel
- Elektrolyticky pozinkovaný materiál – EG
 - Základní materiál: ocel
- Materiál s povlakem zinek – hořčík – ZM
 - Základní materiál: ocel

Takto nanesené sítě bylo nutné porovnat mezi sebou. Jakou mají čitelnost a to především systémem ARGUS. Různé sítě se liší v kontrastu, podle toho jaké parametry byly nastaveny na laseru.



Obrázek 41 laserem nanesené měrné sítě

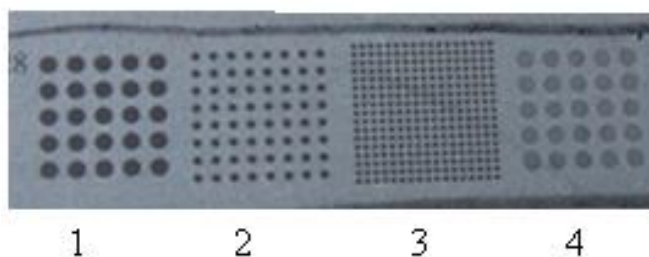
Na Obrázek 42 vidíme příklad vyhodnocení jednotlivých sítí systémem ARGUS. V některých čtvercích můžeme vidět bílá místa. Na těchto pozicích systém neměl potřebný kontrast sítě. Sítě s nejlepšími kontrastními vlastnostmi jsem podrobil dalším testům, abych zjistil vhodnost použití laseru.



Obrázek 42 Příklad čitelnosti laserem nanesené sítě

Následující obrázky jsou sítě, které nejlépe vyhovovali optickým požadavkům. K nim jsou přiřazené tabulky, které porovnávají velikosti a tvary elementů. Každá z nanesené sítě je vyhodnocená stejným způsobem viz. Obrázek 46.

ZM



Obrázek 43 Vybraná laserem nanesená síť na materiálu s povlakem zinek – hořík

Tabulka 7 Parametry elementů pro povlak zinek - hořčík

Parametr	REÁLNÉ HODNOTY NANASENÉ MĚRNÉ SÍŤE			
	ZM			
	1	2	3	4
Ø vypálené první kružnice [mm]	1,003838	0,512	0,334613	1,001988
Ø vypálené poslední kružnice [mm]	1,004948	0,505896	0,334613	1,014012
rozteč mezi kružnicemi 1 a 2 [mm]	1,468301	0,979422	0,479075	1,476994
Rozteč přes mezi 1 a 3 kružnicí [mm]	0	1,94904	0,961295	0
Rozteč přes mezi 1 a 4 kružnicí [mm]	0	0	1,447584	0
Průměrná rozteč mezi kružnicemi	1,468301	0,976971	0,48075	1,476994

HDG



1

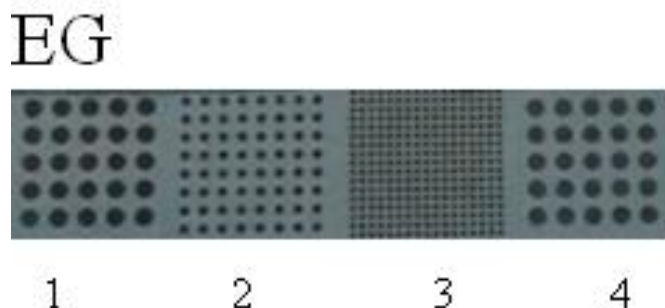
2

3

Obrázek 44 Vybraná laserem nanesená síť na žárově pozinkovaném materiálu

Tabulka 8 Parametry elementů pro materiál s žárovým zinkem

Parametr	REÁLNÉ HODNOTY NANASENÉ MĚRNÉ SÍŤE		
	HDG		
	1	2	3
Ø vypálené první kružnice [mm]	1,006983	0,535676	0,352184971
Ø vypálené poslední kružnice [mm]	0,996809	0,529942	0,358104046
rozteč mezi kružnicemi 1 a 2 [mm]	1,468301	0,987561	0,472416185
Rozteč přes mezi 1 a 3 kružnicí [mm]	0	1,967168	0,957040462
Rozteč přes mezi 1 a 4 kružnicí [mm]	0	0	1,443699422
Průměrná rozteč mezi kružnicemi	1,468301	0,985572	0,477389852



Obrázek 45 Vybraná laserem nanosená síť na elektrolyticky pozinkovaném materiálu

Tabulka 9 Parametry elementů pro elektrolyticky pozinkovaný materiál

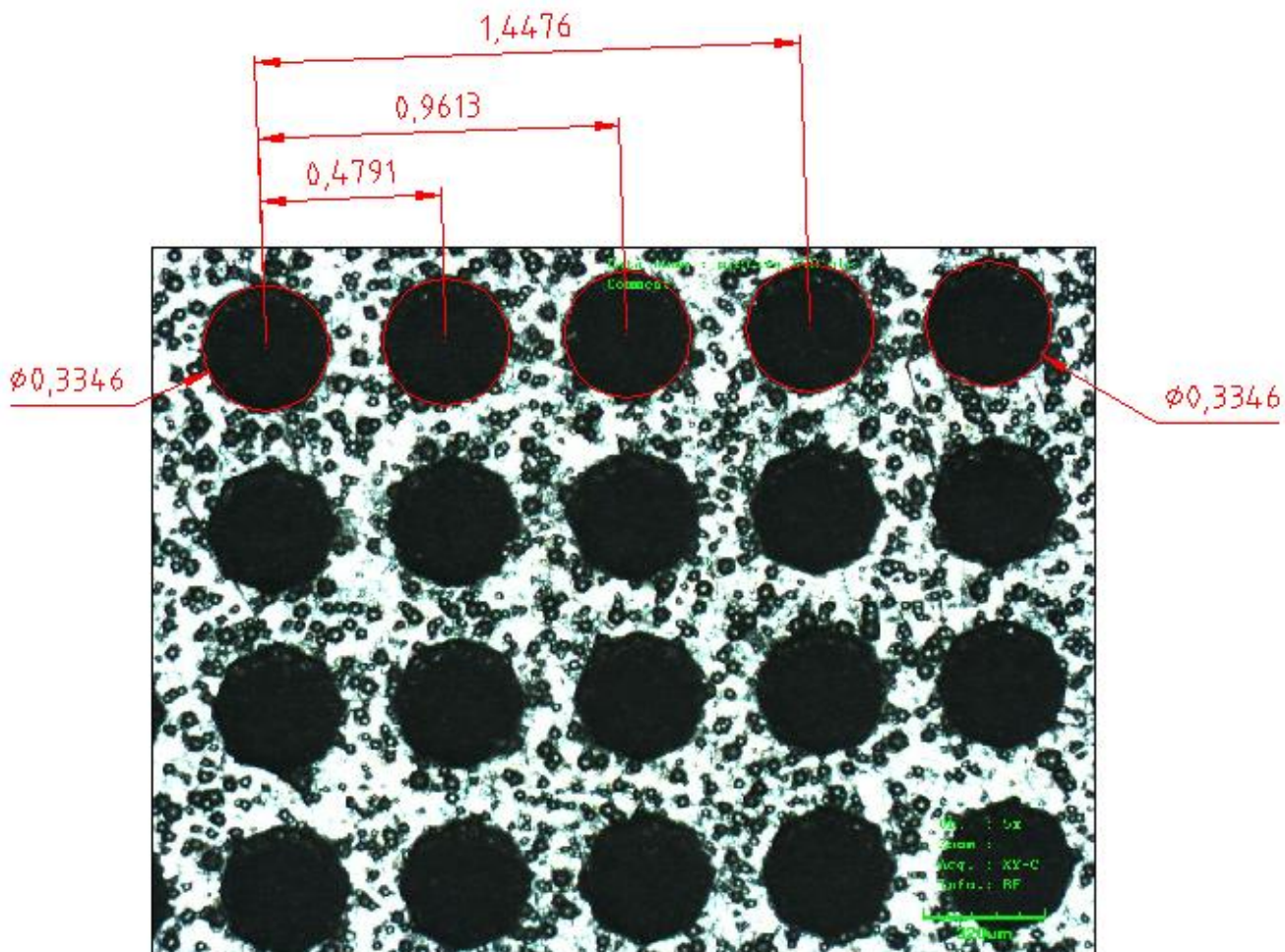
Parametr	REÁLNÉ HODNOTY NANASENÉ MĚRNÉ SÍŤE			
	EG			
	1	2	3	4
Ø vypálené první kružnice [mm]	1,007168	0,499977	0,32148	1,001618
Ø vypálené poslední kružnice [mm]	0,988671	0,504231	0,32	0,997179
rozteč mezi kružnicemi 1 a 2 [mm]	1,470335	0,979607	0,486289	1,472185
Rozteč přes mezi 1 a 3 kružnicí [mm]	0	1,960879	0,960185	0
Rozteč přes mezi 1 a 4 kružnicí [mm]	0	0	1,43815	0
Průměrná rozteč mezi kružnicemi	1,470335	0,980023	0,481922	1,472185

5.1.1 Vyhodnocení čitelnosti sítí:

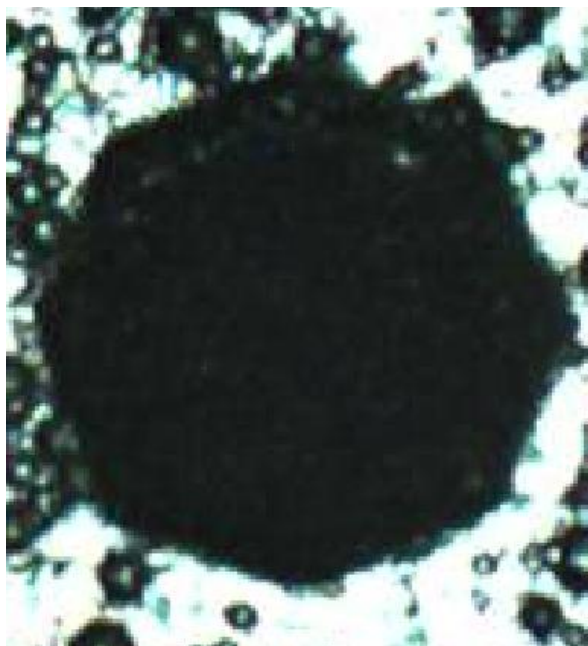
V rámci diplomové práce jsem vyhodnocoval pouze první čtyři nanosené sítě. První tři sítě zleva jsou nanosené stejnými parametry laseru a liší se pouze ve velikosti elementů a jejich roztečích. Čtvrtá síť má parametry jednotlivých elementů jako první, pouze se liší v způsobu geometrické tvorby elementu.

Je nutné zhodnotit kvalitu sítě z hlediska geometrie elementů, vzdálenosti mezi elementy a to jak mezi sousedními tak i průměrnou vzdálenost přes několik elementů. Toto vyhodnocení je nutné k ověření, že laser dokáže opakovaně nanášet kvalitní bodovou síť, která je použitelná při zjišťování deformací.

Hodnocení probíhalo tak, že jsem nanosené síť nasnímal mikroskopem a pomocí SW AutoCAD Mechanical zjistil parametry nanosené sítě, které jsem následně podle měřítka přepočítal na skutečné hodnoty.

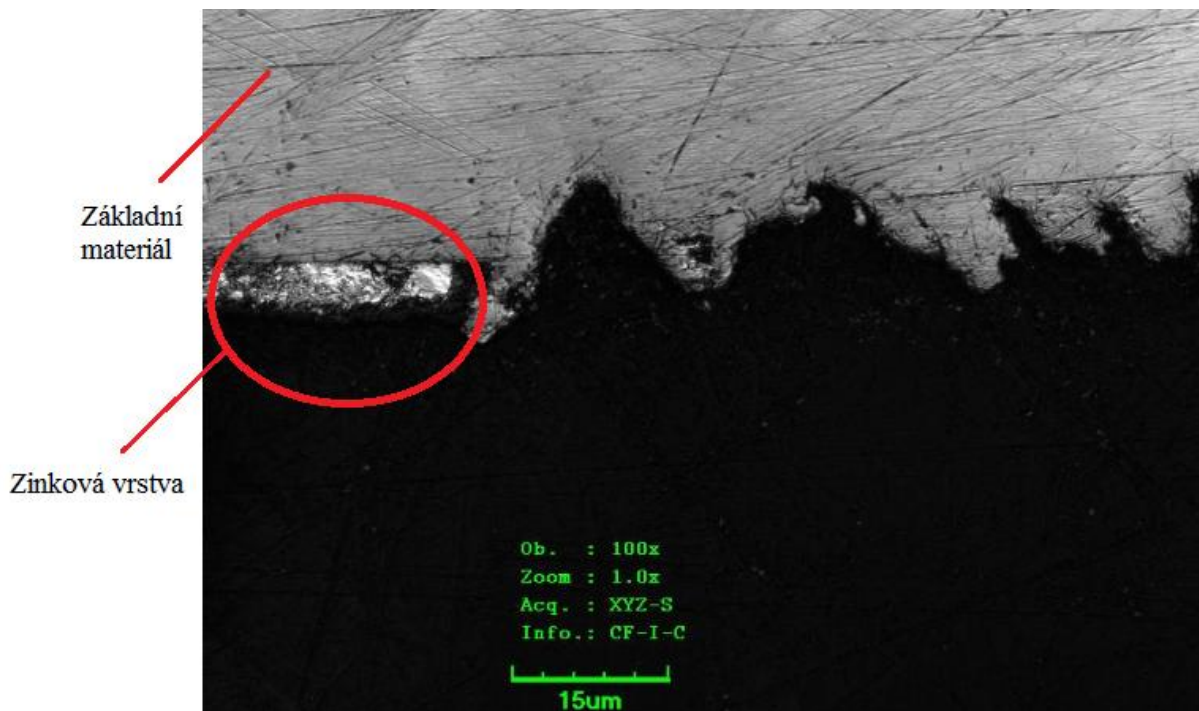


Obrázek 46 Příklad vyhodnocení vyfocené sítě mikroskopem a zjištění rozměrů

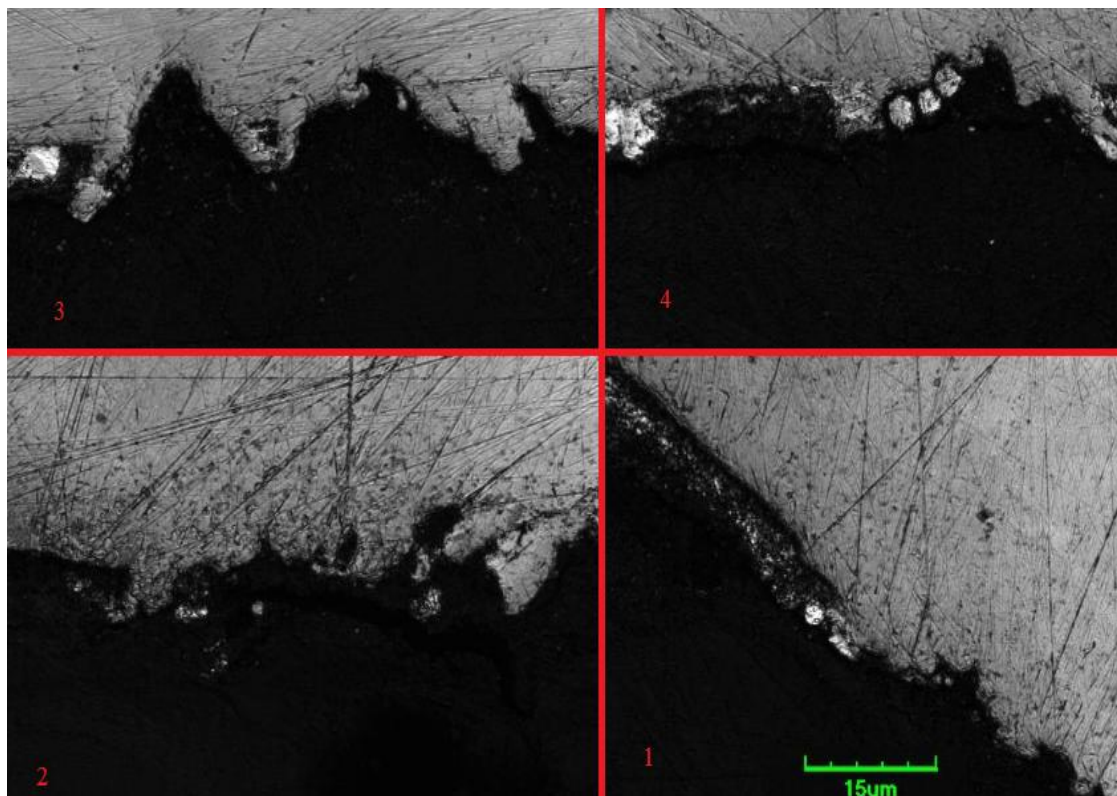


Obrázek 47 tvar kruhového elementu

Dalším parametrem, který bylo potřeba zjistit je zásah laseru do struktury. Zda popis ovlivní pouze zinkovou vrstvu, nebo i základní materiál.



Obrázek 48 Metalografický výstup laserem nanesené sítě



Obrázek 49 Zásah laseru do struktury u různých velikostí elementů

Závěr:

Důležitou součástí v této části bylo potvrzení viditelnosti sítě pro systém ARGUS. Tato viditelnost byla potvrzena pro všechny velikosti elementů (1;0,5;0,3mm) i pro všechny materiály s danými povlaky, jako je vidět z Obrázek 42 .

Hodnocení sítí jsem provedlo za pomoci optického mikroskopu a AutoCAD Mechanical. Při zmenšování průměrů, především elementy s průměrem 0,3mm, docházelo k nepravidelnosti kružnic, ze kterých vznikaly mnoho úhelníky. Tento jev je dán nejspíše pohybem laseru a tím jak samotné kružnice vytváří z úseček, z kterých je tvořena křivka. Tento problém by bylo možné eliminovat lepším nastavením laseru, případně zvolením jiného popisovacího zařízení s lépe nastavitelnými parametry.

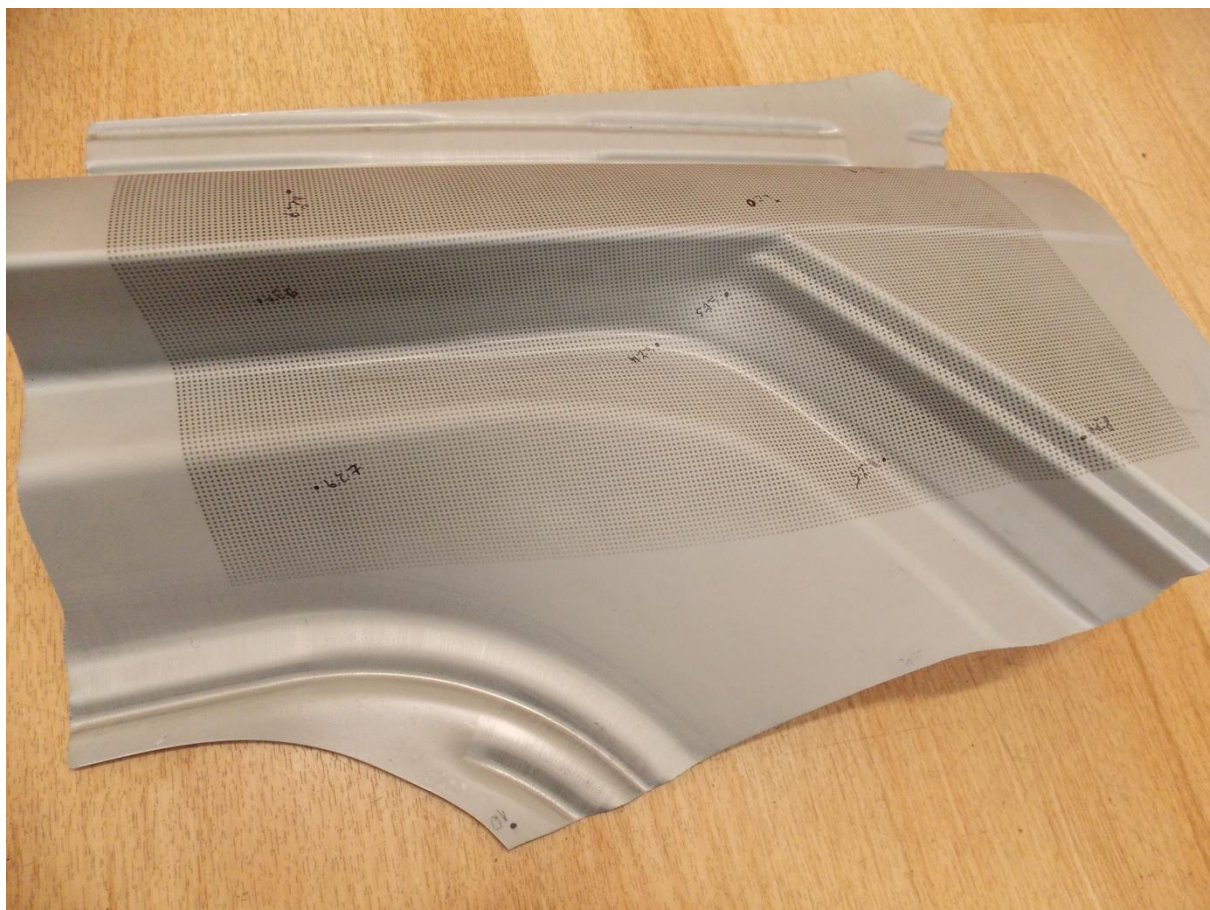
Na Obrázek 48 je možné vidět, že laser zasáhl do základního materiálu, což může ovlivnit vlastnosti materiálu a tím zkreslit vyhodnocování. Takto zasaženy byly všechny materiály, na kterých byla tímto způsobem nanesená měrná síť viz. Obrázek 49. Abychom zabránili poškození základního materiálu, musíme volit jinou metodu laserového nanášení. Vhodná metoda by mohla být například laser coloring (barvení laserem), při které nedochází k úběru materiálu.

6 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ SYSTÉMU ARGUS S JINÝMI SYSTÉMY

Porovnával jsem systém ARGUS s dalšími metodami zjišťování tloušťky povrchu. Tento krok měl určit spolehlivost měření a vhodnost ARGUSU pro vyhodnocování laserem nanesených sítí.

6.1 Zkušební součást

Jako zkušební součást byla vybraná část C - sloupku ze Škoda Fabia. Materiál plechu: DC06+ZE50/50-B-PO, s počáteční tloušťkou 0,7 mm. Mechanické vlastnosti daného materiálu viz.kapitola2.2 Kvalita povrchu B, fosfátovaný a olejovaný. Povrch je elektrolyticky pozinkován se jmenovitou tloušťkou 5 μ m. Na plech byla před lisovacím procesem nanášena elektrochemicky měrná síť. Tento plech byl vylisován do příslušného tvaru.



Obrázek 50 Vylisovaná postranice s nanesenou deformační sítí

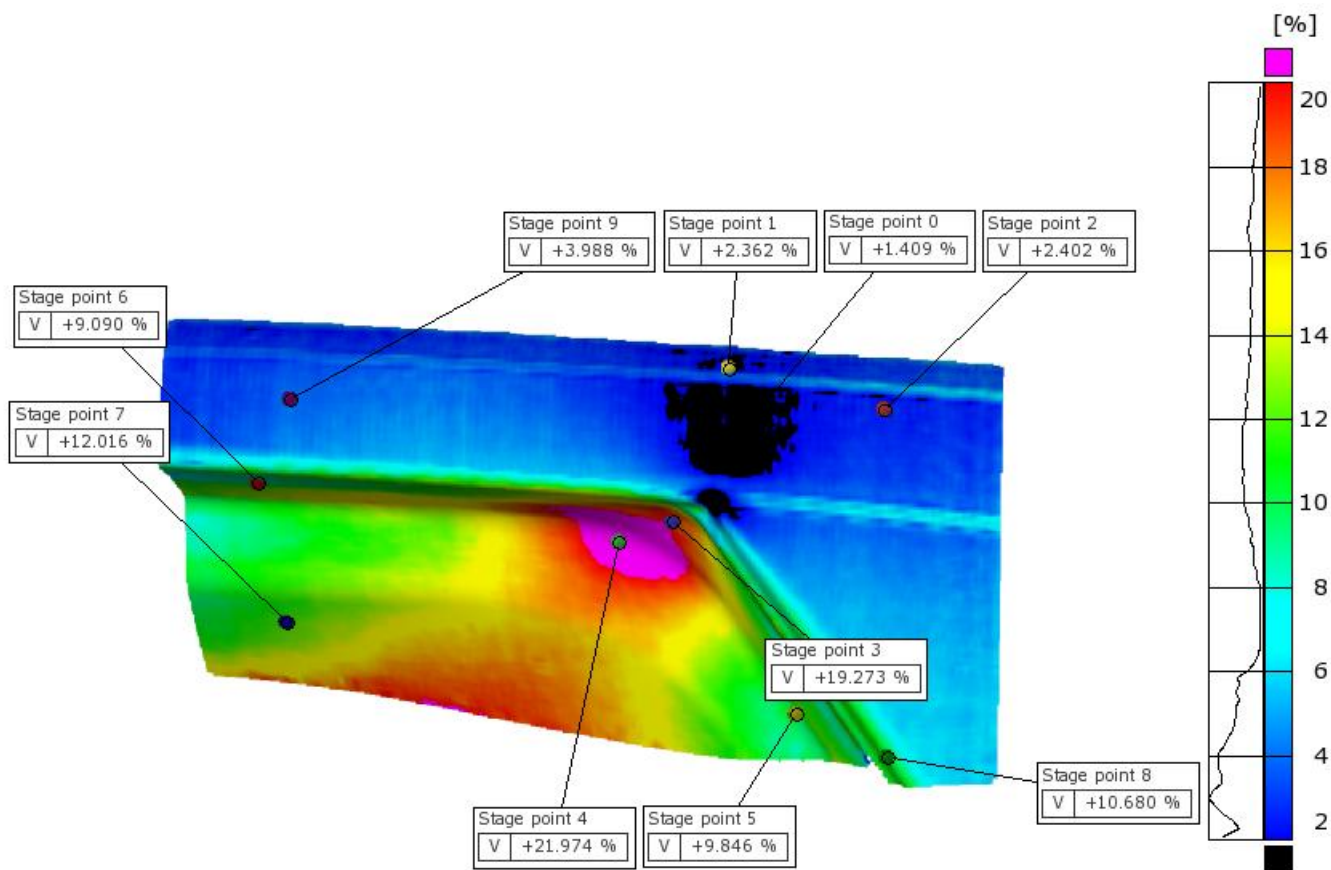


Obrázek 51 Umístění zkušební součásti na automobilu [31]

6.2 Vyhodnocení ARGUS

Na povrch vylisované součásti jsme umístili kameny (kódované značky) a kalibrační měrky. Součást jsme poté vyfotili potřebným počtem snímků z různých úhlů, tak abychom obsáhli všechny kameny. Fotografie jsme vložili do softwaru, který je součástí systému ARGUS a slouží k vyhodnocování fotografií.

Na síti jsme vytipovali osm bodů (0-7) v různých částech prolisů. Body jsou zvoleny tak, abychom jsme s nimi obsáhli celou deformační síť. Body jsme vybrali v různých částech deformační sítě dostatečně daleko od sebe, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Tyto body byly určeny až po samotném lisovacím procesu.



Obrázek 52 Vyhodnocení deformační sítě systémem ARGUS

Na obrázku vidíme výstup ze systému ARGUS. Největší deformace probíhá v okolí bodu č.4, kde je jedno z nejvíce problémových míst výlisku. Změny velikosti deformací můžeme sledovat pomocí barevné škály. Všimněme si černých míst, které se nacházejí především kolem bodu č.1 a 0, to jsou oblasti výlisku, které mají deformaci menší než 2%, což je nežádoucí. V těchto místech nebude materiál dostatečně zpevněný. Naopak růžová místa, nacházející se kolem bodu č.4 mají deformaci větší než 20%. U deformací, které přesahují 20%, hrozí riziko porušení celistvosti materiálu a vzniku trhliny.

6.3 Vyhodnocení mikrometrem

Poté co byly deformace změřeny pomocí systému ARGUS, se daná součást rozstříhala na menší části, tak aby se k daným bodům dalo dostat s ostatními měřicími přístroji. Za pomoci mikrometru jsem změřil reálné tloušťky plechu ve stejných bodech, kde je změřil systém ARGUS. Poté jsem tloušťku plechu přepočítal na procentuální ztenčení materiálu.

Každý bod jsem změřil pětkrát a vypočítal vážený průměr, tak aby se co možná nejvíce eliminovala chybovost během měření. Faktor, který mohl velice ovlivnit měření, může například být přiložení kontaktních ploch mikrometr na materiál.

Tabulka 10 výsledky ztenčení jednotlivých bodů podle mikrometru

bod	Mikrometr - ostrá měřící tělíska	Mikrometr - oblá měřící tělíska
	ztenčení materiálu [%]	ztenčení materiálu [%]
0	2,7	2,0
1	3,4	3,5
2	3,9	3,7
3	19,7	19,7
4	23,0	22,8
5	10,8	8,4
6	9,8	9,4
7	12,0	12,3



Digitální mikrometr

Možné tvary
tělísek použitelné
pro měření

Obrázek 53 Digitální mikrometr



Obrázek 54 Ostrá měřící tělíska s vrcholovým úhlem 60°



Obrázek 55 Oblá měřicí tělíska

6.4 Vyhodnocení metalografický výbrus

Metalografický výbrus, jak už jsem zmínil v kapitole 3.6, mi sloužil pro zjištění tloušťky plechu v určených bodech. Toto vyhodnocení by mělo sloužit jako referenční a získané hodnoty se nejvíce blížit k realitě.

Tabulka 11 Ztenčení materiálu zjištěné metalografickým výbrusem

bod	Metalografický výbrus
	ztenčení materiálu [%]
0	1,4
1	1,0
2	4,2
3	20,4
4	23,1
5	9,4
6	9,5
7	12,2

6.5 Celkové porovnání

Celkové porovnání nám ukáže odchylky jednotlivých systémů měření. Počáteční tloušťka materiálu je 0,7mm.

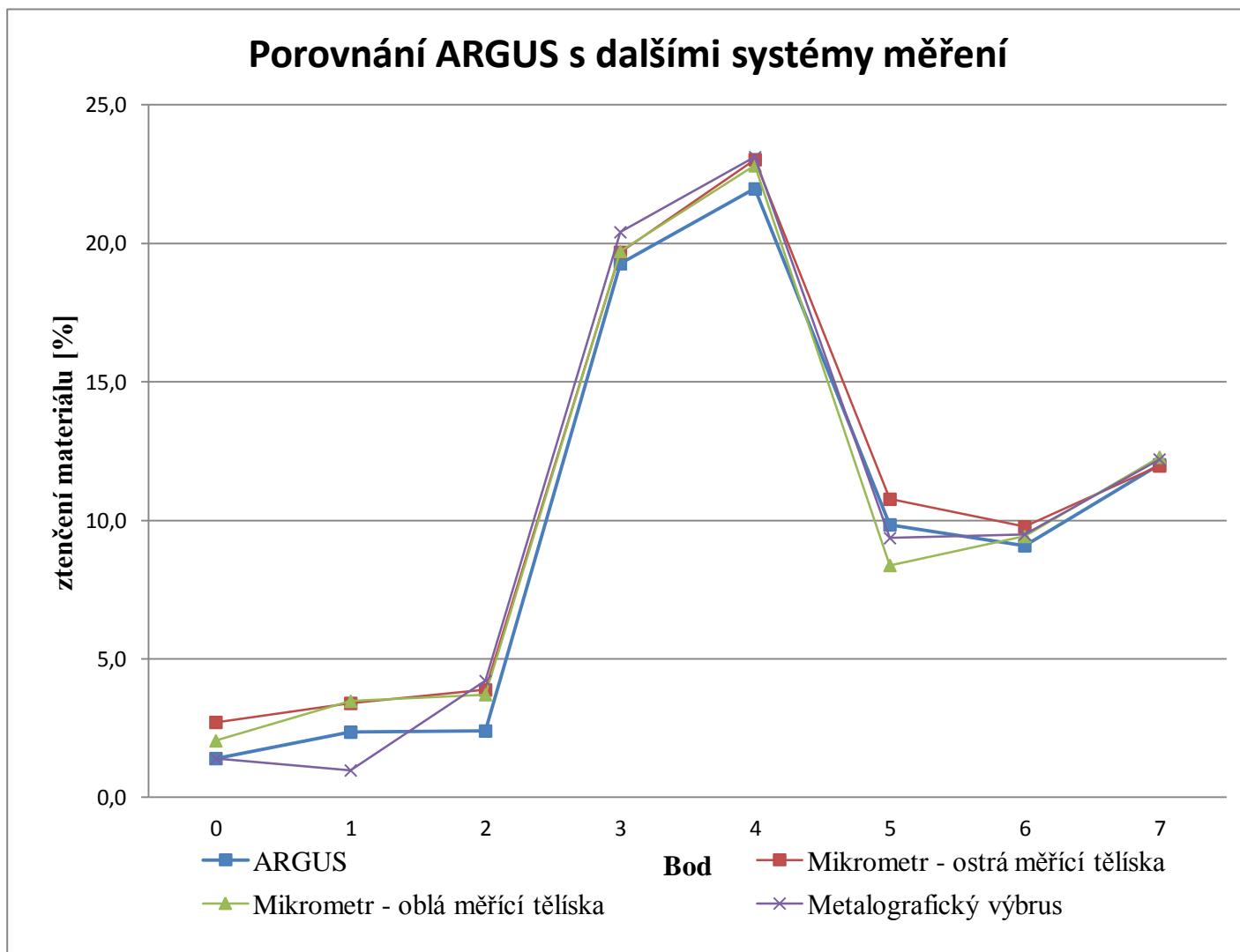
Tabulka 12 Porovnání jednotlivých systémů měření

Bod	Měřicí systém			
	ARGUS	Mikrometr - ostrá měřící tělíska	Mikrometr - oblá měřící tělíska	Metalografický výbrus
	ztenčení materiálu [%]	ztenčení materiálu [%]	ztenčení materiálu [%]	ztenčení materiálu [%]
0	1,4	2,7	2,0	1,4
1	2,4	3,4	3,5	1,0
2	2,4	3,9	3,7	4,2
3	19,3	19,7	19,7	20,4
4	22,0	23,0	22,8	23,1
5	9,8	10,8	8,4	9,4
6	9,1	9,8	9,4	9,5
7	12,0	12,0	12,3	12,2

Tabulka nám znázorňuje procentuální ztenčení naměřené jednotlivými metodami. Mikrometr a metalografický výbrus měří tloušťku materiálu, kterou bylo nutné podle rozměru původního plechu, přepočítat na ztenčení. Systém ARGUS nám rovnou zobrazí hodnoty v procentech, takže není nutný přepočet. Přepočítání jsem udělal z následující tabulky.

Tabulka 13 reálné tloušťky konvenčních měřících metod

Bod	Mikrometr - ostrá měřící tělíska	Mikrometr - oblá měřící tělíska	metalografický výbrus
	Průměrný rozměr [mm]	Průměrný rozměr [mm]	tloušťka [mm]
0	0,681	0,686	0,69019
1	0,676	0,676	0,69316
2	0,673	0,674	0,67055
3	0,562	0,562	0,55713
4	0,539	0,540	0,53817
5	0,625	0,641	0,63445
6	0,632	0,634	0,63351
7	0,616	0,614	0,61456



Graf 1 grafické porovnání naměřených hodnot

Závěr:

Z výsledků porovnání vidíme, že se žádná z metod výrazně neodchyluje od ostatních. U bodu č.1 vidíme odchylku metalografického výbrusu od ostatních, zde bychom mohli předpokládat, že chyba vznikla během metalografického výbrusu, nebo jeho následného měření. Abychom těmto chybám zamezili, museli bychom udělat kontrolní měření, kterými by došlo k zpřesnění výsledků.

Pokud porovnáme pouze metalografický výbrus a systém ARGUS vidíme největší rozdíl ve výsledcích 1,8% v bodě č.2. 1.8% v našich rozměrech znamená chybu 0,01mm.

7 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

V diplomové práci jsem měl za úkol určit metody nanesení deformačních sítí s cílem popisu malých poloměrů. Tuto metodu bylo nutné ověřit s ohledem na softwarovou čitelnost, tak aby vyhodnocovací systémy bez problému dokázali určit deformace. Hlavním systémem na vyhodnocování, na který jsem se v práci zaměřil, byl optický systém ARGUS.

Pro popis malých poloměrů byla zvolena metoda laserového nanášení deformačních sítí. Tato metoda se ukázala jako velice vhodná a schopná vytvořit elementy s velice malými rozměry, které dosahují až 0,1mm. Nanesená síť vykazuje velmi dobré rozměrové parametry. Průměry kružnic se liší v řádech tisícín nebo setin milimetrů, průměrná rozteč kružnic je v řádech setin milimetrů. Tyto hodnoty mohou být ovlivněny také metodou vyhodnocování. Kruhové elementy, které jsou o rozměrech 0,3 a menší vykazují nepravidelný obrys, který je spíše mnohoúhelníkem. Tento jev bychom mohli eliminovat nastavením laseru, nebo zvolením jiného laserového zařízení s lepšími parametry. Značnou nevýhodou zvolené metody popisu v této práci je zásah do základního materiálu několik mikrometrů. Takovéto porušení materiálu může způsobit ovlivnění chování materiálu při tvářecí operaci a zkreslení výsledků. Eliminovat toto poškození můžeme volbou jiné metody laserového popisu (například barvení pomocí laseru). Důležitým kritériem je čitelnost sítě systémem ARGUS. Toto kritérium bylo splněno a síť je ARGUSEM čitelná.

V poslední části diplomové práce bylo nutné verifikovat výstupy ze systému ARGUS. Tuto verifikaci jsem provedl porovnáním výstupních hodnot s jinými konvenčními metodami měření tloušťky. ARGUS nám dává výstupy v podobě procentuálního ztenčení materiálu v daném bodě, kdežto ostatními metodami dokážeme změřit tloušťku materiálu. Pokud znám původní tloušťku materiálu dokážu vypočítat procentuální ztenčení. Poté mohu porovnat metody, jako je měření mikrometrem, nebo metalografický výbrus, s výstupními hodnotami 3D optického systému ARGUS. Rozdíly mezi jednotlivými metodami dosahovali několik procent. Bude nutné udělat kontrolní měření, aby se výsledky více zpřesnily a eliminovalo se co možná nejvíce chyb během vyhodnocování nebo přípravy vzorků. Pokud by rozdíl zůstal stejný i po dalších měřeních, je nutné zvážit, zda nám taková přesnost ARGUSU stačí, nebo je nutné zvolit jiný měřicí systém.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Tornádo linie [31].....	11
Obrázek 2 Ukázka výstřížků pod různým úhlem vzhledem k válcování r_0 (1), r_{45} (2), r_{90} (3) [19]	15
Obrázek 3 Schéma zkoušky pěchovací [9]	16
Obrázek 4 Schéma zkoušky ohybem [9]	16
Obrázek 5 Schéma zkoušky krutem [9].....	17
Obrázek 6 Liletův diagram	18
Obrázek 7 Řez testovacího stroje pro zkoušku dle Erichsena	19
Obrázek 8 Výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena	19
Obrázek 9 Tvary přístříhů pro zkoušku polokulovým tažníkem, b – šířka přístříhu [mm] [1] 20	20
Obrázek 10 Schéma přípravku pro tažení [1]	20
Obrázek 11 Příklad vyhodnocení zkoušky polokulovým tažník systémem ARGUS [28].....	21
Obrázek 12 Schéma kalíškovací zkoušky.....	21
Obrázek 13 Schéma zkoušky hydraulické vyboulovací	22
Obrázek 14 Princip zkoušky podle Fukuiho	22
Obrázek 15 Výsledek zkoušky dle Fukuiho [30]	23
Obrázek 16 Ukázka zkoušení tvrdosti (mikrotvrdosti) dle Vickerse [29]	23
Obrázek 17 Ukázka zkoušení tvrdosti (mikrotvrdosti) dle Knoopu [29]	24
Obrázek 18 obrázek hlavních a vedlejších napětí ukázaných na deformaci elementu [4]	26
Obrázek 19 Elektrochemicky nanesená měrná síť [19].....	27
Obrázek 20 Různé tvary elementů na měrné síti [4]	27
Obrázek 21 Měrné síť [5]	28
Obrázek 22 Vlevo snímek sítě zhotovený rytím a vpravo element vyražený razítkem [2]	29
Obrázek 23 Deformační síť nanesená sítotiskem.....	29
Obrázek 24 Schéma nanášení sítě elektrochemickou metodou [21], [22], [23]	30
Obrázek 25 Základní schéma laseru [26]	31
Obrázek 26 Porovnání deformované a nedeformované sítě [19].....	34
Obrázek 27 Princip Mylarovy pásky [21], [36]	35
Obrázek 28 3D měřicí kamery systému ARAMIS [25]	36
Obrázek 29 Ukázka snímání pomocí MODEL 100U [24]	36
Obrázek 30 Příkladná ukázka systému ASAME Target model [24].....	37
Obrázek 31 KEELER-GOODVINŮV limitní diagram ve skutečných deformacích [4]	37

Obrázek 32 Deformace elementů znázorněna graficky.....	38
Obrázek 33 Kódované značky – kameny [17]	40
Obrázek 34 Příklad umístění kamenů a měrky na vylisovaném dílu [17].....	41
Obrázek 35 Vykreslení FLD limitního diagramu systémem ARGUS [27].....	42
Obrázek 36 Vlevo preparace za studena (kapalina) vpravo za tepla (prášek) [33].....	43
Obrázek 37 Ukázka metalografického výbrusu	44
Obrázek 38 Ukázka příkladu nanesené sítě laserem bod o průměru 0,5mm a rozteč 1mm [11]	46
Obrázek 39 Laser MD-F3020W [36]	47
Obrázek 40 Příklad částečně nečitelné sítě [28]	49
Obrázek 41 laserem nanesené měrné sítě	50
Obrázek 42 Příklad čitelnosti laserem nanesené sítě.....	51
Obrázek 43 Vybraná laserem nanesená síť na materiálu s povlakem zinek – hořčík.....	51
Obrázek 44 Vybraná laserem nanesená síť na žárově pozinkovaném materiálu	52
Obrázek 45 Vybraná laserem nanesená síť na elektrolyticky pozinkovaném materiálu	53
Obrázek 46 Příklad vyhodnocení vyfocené sítě mikroskopem a zjištění rozměrů	54
Obrázek 47 tvar kruhového elementu.....	54
Obrázek 48 Metalografický výstup laserem nanesené sítě	55
Obrázek 49 Zásah laseru do struktury u různých velikostí elementů.....	55
Obrázek 50 Vylisovaná postranice s nanesenou deformační sítí	57
Obrázek 51 Umístění zkušební součásti na automobilu [31].....	58
Obrázek 52 Vyhodnocení deformační sítě systémem ARGUS	59
Obrázek 53 Digitální mikrometr	61
Obrázek 54 Ostrá měřící tělíska s vrcholovým úhlem 60°	61
Obrázek 55 Oblá měřící tělíska.....	62

9 LITERATURA

- [1] PAGÁČ, Aleš. POUŽITÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK TVAŘITELNOSTI PŘI TVÁŘENÍ. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] Německé inovace ocelí 2012. MM Průmyslové spektrum. 2012, 2012/11. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nemecke-inovace-oceli-2012.html>
- [3] MARCINIAK, Zdzislaw. Teorie tváření plechů. Vše Vlad Jandura. 1. vyd. Praha : SNTL, 1964. 260 s.
- [4] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost kovových materiálů*. In: Tvařitelnost kovových materiálů [online]. 9.1.2007 [cit. 2013-07-25]. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/TvCELEupr.pdf>
- [5] HOVAD, Jan. *Deformační sítě a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] Meziplyn. In: Nová Škoda Fabia je tu! [online]. 19.8.2014 [cit. 2015-01-23]. Dostupné z: <http://www.meziplyn.cz/2014/08/nova-skoda-fabia-je-tu.html>
- [7] ČSN ISO 10113. Kovové materiály. Stanovení součinitele plastické anizotropie plechů a pásů. Praha: Český normalizační institut, 1994, Zář 1994.
- [8] ČSN ISO 10275. Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem. Praha: Český normalizační institut, 2008, Leden 2008.
- [9] Statické zkoušky [online]. [s.l.] : [s.n.], 2009 [cit. 2011-05-04]. Dostupné z WWW: <http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>
- [10] Technická univerzita v Liberci studijní materiály [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupný z: WWW: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/flid.pdf
- [11] BIČIŠŤOVÁ, Ing. Radka. FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AV ČR, v. v. i. LASEROVÉ POPISOVÁNÍ PLECHŮ PRO POTŘEBY DEFORMAČNÍ ANALÝZY. Praha, 2015.

- [12] VOLKSWAGEN. Lasermarkiergerät/Formänderungsanalyse. Wolfsburg, 2.12.2013.
- [13] ČSN EN 10152. Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena - Technické dodací podmínky. Praha: Český normalizační institut, Listopad 2004.
- [14] ČSN EN 10346 (420110). Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky – Technické dodací podmínky. Praha: Český normalizační institut, Listopad 2009.
- [15] European Steel and Alloy Grades. European Steel and Alloy Grades [online]. © 2011- 2013 [cit. 2013-07-25]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=203
- [16] FOTOGRAMMETRIE. Ostrava, 2002. Dostupné také z: <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>. Učební texty.
- [17] Argus. MCAE 3D Digitální technologie [online]. 2015 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/argus>
- [18] Tváření kovů. Technická univerzita Liberec: Technologie II [online]. [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [19] Vliv polohy FLD na rychlost deformace pro vybrané jakosti materiálu. Praha, 2013. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing František Tatiček, Ph.D.
- [20] DRASTÍK, František, ELFMARK, Jaroslav. Plastometry a tvařitelnost kovů. 1. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977. 392 s. DT 539.214.07.
- [21] OZTURK, Fahrettin, Murat DILMEC, Mevlut TURKOZ a Huseyin S. HALKACI. Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability [online]. Aydın TURKEY, 2009 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://www.hidrokillendirme.com/docs/yayinlar/5_Grid_marking_and_measurement.pdf
- [22] Fracture Measurements using Grid Stitching. FMTI Systems Inc. [online]. 2010, 18.6 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.fmtisystems.com/fracture.htm>

- [23] KUČERA, Radek. VÝZNAM DEFORMAČNÍ SÍŤE V OBLASTI TVÁŘENÍ. BRNO, 2012. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [24] Forming Measurement Tools Inovations. FMTI Systems Inc. [online]. 2010, 5.10 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.fmtisystems.com/>
- [25] ASAME TECHNOLOGY LLC. ASAME Target Model [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: www.asametech.com/dwn/factsheets/target.pdf
- [26] SERIÁL NA TÉMA LASERY: ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. Lasery a optika [online]. 2011 [cit. 2015-06-05]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [27] Gom. ARGUS [online]. 2015 [cit. 2015-06-05]. Dostupné z: <http://www.gom.com/3d-software/argus-software.html>
- [28] RYBKA, Pavel. Analýza malých deformací v plošném tváření. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ.
- [29] Tvrdost (mikrotvrdost) – významná mechanická vlastnost materiálů. CHEMPOINT [online]. 2015 [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdost-mikrotvrdost>
- [30] CADDELL, Robert M. Formability Tests. [online]. [cit. 2012-05-24].
Dostupné z: <http://www.globalspec.com/reference/70327/203279/chapter-18-formability-tests>.
- [31] New Skoda Fabia Displayed at the Paris Motor Show in Hatchback Guise - Live Photos. Autoevolution [online]. 2015 [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://www.autoevolution.com/news/new-skoda-fabia-displayed-at-the-paris-motor-show-in-hatchback-and-estate-guise-live-photos-87230.html#>
- [32] JONŠTA, Petr, Vojtěch HRUBÝ a Arnošt SILBERNAGEL. Praktická metalografie. Ostrava: Kovosil, 2008, 173 s. ISBN 978-80-903694-3-6. ISSN 978-80-903694-3-6.

- [33] Holeček S., Franěk A.: Návody k laboratorním cvičením oboru I, skriptum VŠCHT Praha, 1. vydání, 1989
- [34] BINGHAMTON university. ENGINEERING AND SCIENCE RESEARCH LABS AND EQUIPMENT [online]. 2013 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: http://www.binghamton.edu/watson/research/equipment/image_correlation_system.html
- [35] Nový Superb. Arservis [online]. 2014 [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: <http://www.arservis.cz/skoda-superb.php>
- [36] MD-F3020W. Keyence.com [online]. 2015 [cit. 2015-06-11]. Dostupné z: <http://www.keyence.com/products/marker/fiber-yvo4-yag-laser/md-f3000/models/md-f3020w/index.jsp>
- [37] JOSHI, Amit Mukund. Strain Studies In Sheet Metal Stampings. [online]. s. 8 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <<http://www.metalwebnews.com/howto/sheet-metal/sheetmetal-study.pdf>>.