



Využití fotogrammetrie pro výzkum deformace materiálu v oblasti mezních přetvoření

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Petr Pilař

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Využití fotogrammetrie pro výzkum deformace materiálu v oblasti mezních přetvoření

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Pilař**
Osobní číslo: S17000248
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Základní materiály používané pro konstrukci karoserie automobilu
2. Stanovení mezních stavů deformace pro hlubokotažné materiály (diagramy mezních přetvoření)
3. Metody bezkontaktní analýzy deformace
4. Experimentální zjištění vlivu použité metody pro definici mezních stavů deformace s ohledem na stav napjatosti
5. Statistické vyhodnocení naměřených dat
6. Diskuze a závěr

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

tabulky, grafy
cca 50
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
- [2] POLMEAR, I. *Ligth Alloy – From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.
- [3] ASM HANDBOOK. *Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [4] HOSFORD, W.F., CADDEL, R. *Metal Forming (Mechanics and Metallurgy)*. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007. s. 312. ISBN 978-0-521-88151-0.
- [5] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [6] TSCHAETSCH, H. *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [7] LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

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

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



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

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

10. června 2020

Bc. Petr Pilař



Anotace

Tato diplomová práce se zabývá využitím bezkontaktní analýzy deformace pro zjišťování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu DX57D Z100MBO používaného v automobilovém průmyslu pro stavbu karoserie. V teoretické části diplomové práce jsou uvedeny základní informace o metodách bezkontaktní analýzy deformace s využitím fotogrammetrie a stručný přehled používaných systémů. Dále jsou zde uvedeny základní způsoby získávání diagramů mezních přetvoření (DMP) a stručný popis hlubokotažných materiálů využívaných v automobilovém průmyslu. Experimentální část zahrnuje základní materiálové testy pomocí statické zkoušky tahem a stanovení křivek mezních přetvoření. Pro tyto účely byly zvoleny dvě metody testování. První metoda vycházela z normalizované zkoušky vypínáním polokulovým tažníkem (tzv. Nakajima test), v druhém případě byla testována možnost zjištění křivky mezních přetvoření pomocí deformace vzorků s vruby na biaxiálním zařízení instalovaného na KSP TU v Liberci.

Klíčová slova: fotogrammetrie, diagramy mezních přetvoření, statická zkouška tahem, Nakajima test, hlubokotažný materiál

Annotation

This diploma thesis deals with application of non-contact deformation analyse to define forming limits deformation of deepdrawing sheet metal DX57D Z100 which is usually used in automotive industry for chassis. The theoretical part of thesis describes the basic information about non-contact analyse methods of deformation with photogrammetry application and brief review of used systems. In next step are mentioned basic ways to obtain forming limits diagram and brief description of deepdrawing materials used in automobile industry. Experimental part of thesis is focused on tensile strength test and determination forming limit curves. Two experimental methods were used for this purpose. The first method is describes by Nakajima test – normalized test by plunger in shape of hemisphere. In the second case was used experiment with possibility to find out forming limit curves by deformation of samples with notches on biaxial testing machine at laboratory of TU Liberec.

Key words: photogrammetry, forming limits diagram, tensile strength test, Nakajima test, deepdrawing material

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, věcné připomínky a velké množství podnětů při vypracování zvoleného tématu.

Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za cenné připomínky nejen v průběhu experimentálního měření, ale především při přípravě této práce.

Na závěr je také mojí milou povinností poděkovat mým rodičům za jejich trpělivost a podporu, kterou mi vyjadřovali během studia. Také bych chtěl poděkovat svým spolužákům a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu studia.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2019-5015 *"Výzkum a vývoj pro inovace materiálů a výrobních technologií s aplikačním potenciálem ve strojírenství"*.

Obsah

1	ÚVOD.....	11
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	Fotogrammetrie	12
2.1.1	Princip fotogrammetrie	12
2.1.2	Proces pořízení a vyhodnocení snímku	15
2.1.3	Rozdělení fotogrammetrie	16
2.1.4	Aplikace fotogrammetrie	17
2.1.5	Optické měřicí systémy	20
2.2	Diagramy mezních přetvoření.....	26
2.2.1	Určování DMP početními metodami.....	30
2.2.2	Určování DMP experimentálním způsobem.....	31
2.2.3	Faktory ovlivňující DMP	34
2.2.4	Určení mezního stupně přetvoření.....	35
2.2.5	Určování mezního stupně přetvoření pomocí normy ISO/DIS 12004-2	36
2.3	Materiály v automobilovém průmyslu	42
2.3.1	Oceli používané pro hluboké tažení.....	43
2.3.2	IF oceli bez interstici.....	43
2.3.3	IF oceli vykazující BH efekt.....	43
2.3.4	Mikrolegované oceli (HSLA).....	44
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	45
3.1	Cíl diplomové práce	45
3.2	Zkoumaný materiál	46
3.3	Statická zkouška tahem	47
3.3.1	Příprava vzorků.....	47
3.3.2	Vlastní měření.....	49
3.3.3	Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení.....	50
3.4	Zkouška vypínáním pevným polokulovým tažníkem (tzv. Nakajima test)	54
3.4.1	Příprava vzorků.....	54
3.4.2	Vlastní měření a vyhodnocení výsledků.....	56
3.5	Experiment pro zjištění levé části DMP.....	60
3.5.1	Příprava zkušebních vzorků.....	61
3.5.2	Vlastní měření a vyhodnocení výsledků.....	62

3.6	Statistické vyhodnocení experimentu	69
4	DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	73
5	ZÁVĚR	76
6	POUŽITÁ LITERATURA	77

Seznam použitých symbolů a zkratek

A_{80mm}	[%]	tažnost
b	[mm]	šířka můstku zkušební vzorku
b_0	[mm]	počáteční měřená šířka tyče
C	[MPa]	modul monotónního zpevnění
d_0	[mm]	počáteční měřená délka
d_1	[mm]	konečná délka v oblasti definovaného mezního stavu
d_2	[mm]	konečná délka v oblasti definovaného mezního stavu
D	[mm]	průměr zkušebních těles
F	[N]	síla zaznamenaná v průběhu zkoušky
L_0	[mm]	původní délka tyče před zkouškou
L_e	[mm]	počáteční měřená délka extenzometru
ΔL	[mm]	absolutní prodloužení tyče
R	[MPa]	smluvní napětí
R_m	[MPa]	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	okamžitá plocha příčného průřezu zkušební tyče
S_0	[mm ²]	počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče
t	[mm]	parametr zeslabení popisující rozdíly v tloušťce plechu
t_0	[mm]	počáteční měřená tloušťka tyče
σ	[MPa]	skutečné napětí
σ_1	[MPa]	hlavní napětí v rovině plechu
σ_2	[MPa]	vedlejší napětí v rovině plechu
BH		zvýšení meze kluzu při vypalování laku
FLC		forming limit curve
FLD		forming limit diagram
H_0		vliv faktoru je statisticky nevýznamný
H_1		vliv faktoru je statisticky významný
KMP		křivka mezního přetvoření
KSP		katedra strojírenské technologie
DMP		diagram mezních přetvoření
m		exponent popisující citlivost materiálu na rychlost deformace

m_{σ}	ukazatel stavu napjatosti
n	exponent deformačního zpevnění
n	počet prvků výběru
ppm	počet částic na 1 milion částic
r	poměr plastických přetvoření (normálová anizotropie)
s	směrodatná odchylka
TU	technická univerzita
w	počet bodů
\bar{x}	střední hodnota výběru
x_i	dílčí hodnota i -tého prvku výběru
x_s	směrově střední hodnota
α	hladina významnosti
ε	poměrná délka prodloužení
φ	přetvoření
φ_0	ofsetová deformace
φ_1	hlavní deformace
φ_{1m}	průměrná hodnota krajních bodů φ_1 ,
φ_2	vedlejší deformace
φ_{2m}	průměrná hodnota krajních bodů φ_2 ,
φ_{ik}	kritické mezní přetvoření

1 ÚVOD

Ve všech průmyslových odvětvích je v posledních letech patrná snaha o zavádění nových metod a postupů využívajících numerické podpory technologických procesů, digitalizace a robotizace výrobních operací, jejichž cílem je snížení výrobních nákladů při současném zvýšení flexibility firem. S rozvojem výpočetní techniky jak v oblasti hardware tak i software je patrná snaha firem využívat stále složitější technické systémy umožňující snížit cenu výrobků a zvýšit tím uplatnitelnost na trhu. Trendem posledních let je stále častější používání bezkontaktních optických měřících systémů s vysokou přesností a flexibilitou využití v různých průmyslových aplikacích. Tyto systémy nabízejí velmi přesné a rychlé měření požadovaných veličin bez nutnosti přímého kontaktu se sledovaným objektem.

Spolehlivou metodou pro zjištění materiálových vlastností jsou diagramy mezních přetvoření (DMP). Tyto diagramy charakterizují deformační chování plechů při různých stavech napjatosti a také vymezují oblast bezpečného tváření. Diagramy lze získat experimentálním nebo početním způsobem. Diplomová práce se zaměřuje na možnost experimentálního získávání diagramu mezních přetvoření. V rámci řešení diplomové práce byla testována možnost nahrazení časově náročné normalizované zkoušky vypínání polokulovým tažníkem (tzv. Nakajima test) laboratorní technologickou zkouškou deformace vzorků s vruby zjištění, zda je možné tuto alternativní technologickou zkoušku provádět na biaxiálním zařízení instalovaném v laboratoři KSP TU v Liberci. Pro fotogrammetrickou analýzu deformace byl využíván systém Mercury RT.

V závěru práce bude předloženo vzájemné porovnání výsledků měření z obou použitých zařízení a konečné zhodnocení, zda je možné nahrazení Nakajima testu vzorky s vruby na biaxiálním zařízením.

2 TEORETICKÁ ČÁST

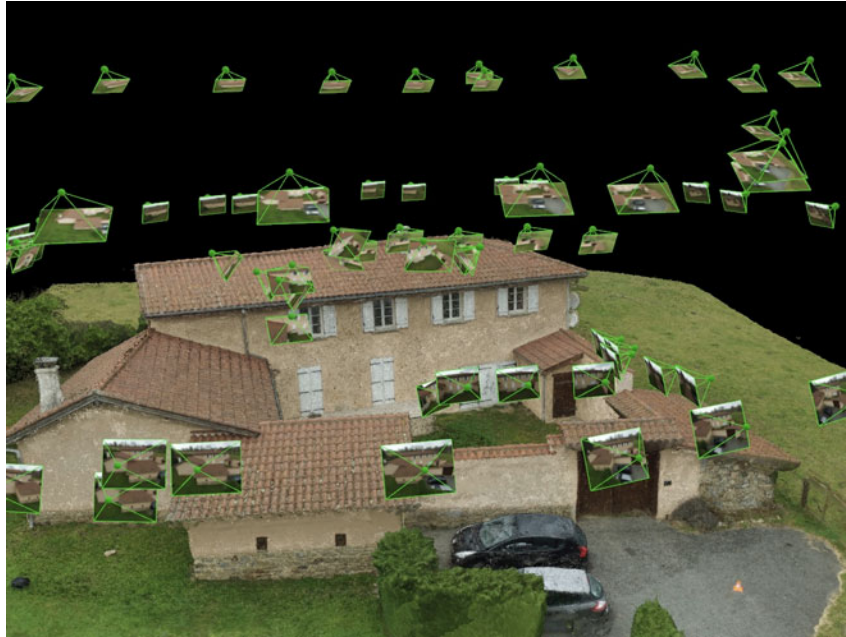
2.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrii můžeme definovat jako vědní obor, který se zabývá zpracováním informací na fotografických snímcích. Konkrétněji se fotogrammetrie zabývá rekonstrukcí tvarů, měřením rozměrů a určováním polohy předmětů, jenž jsou zachyceny na jednom či více fotografických snímcích. Jedná se o bezkontaktní metodu měření, což se dá považovat za jednu z výhod této metody. Fotogrammetrii lze uplatnit v zásadě všude, kde nám podmínky umožní požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit [1].

Historický vývoj fotogrammetrie souvisí s vynálezem fotografie (Niepce a Daguerre – 1839) a sahá až do 30. a 40. let 19. století. Za vynálezce fotogrammetrie jsou považováni francouzský důstojník Aimé Laussedat (1851, „Métrophotographie“) a německý architekt Albrecht Meydenbauer, kteří využili fotografie k měření fasád budov. Následně našla fotogrammetrie využití pro tvorbu topografických map [1, 2].

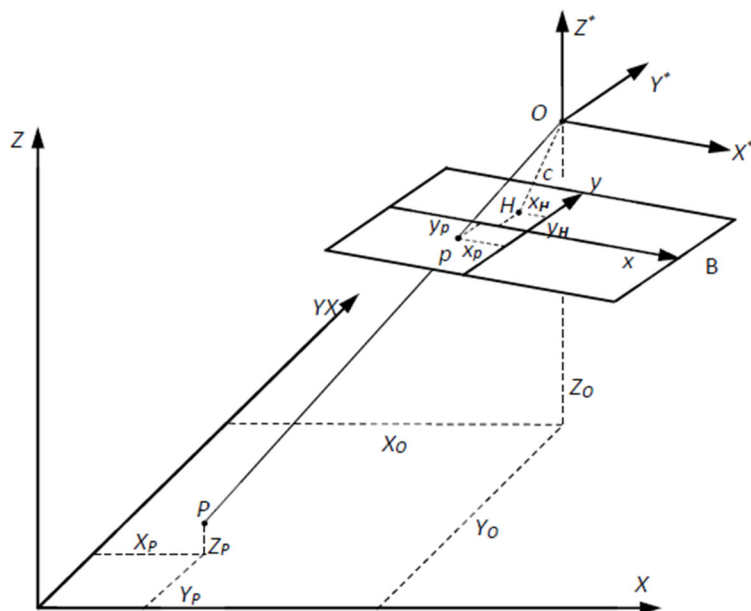
2.1.1 Princip fotogrammetrie

Fotogrammetrie využívá jako základní matematický model k analýze trojrozměrných objektů princip zobrazení centrálních projekcí (viz. Obr. 1). Tvar a poloha objektu jsou určeny rekonstrukcí svazků paprsků. Pro každý obrazový bod P' , spolu s odpovídajícím středem perspektivy O' je dán prostorový směr paprsku k odpovídajícímu bodu P . V případě, že jsou známy zobrazovací parametry fotoaparátu a jeho umístění v prostoru, každý bod (paprsek) může být definován v prostoru. K tomu, abychom mohli odhadnout bod v prostoru, potřebujeme u stereografie 2 snímky, u více snímkových metod fotogrammetrie je počet snímků v zásadě neomezený [1].



Obr. 1 Princip centrální projekce v programu Agisoft

K základnímu popisu projekce objektu na rovinu snímku se využívá tzv. model kamery, kdy se využívá principů paprskové optiky. Měřicí bod $P (X_p, Y_p, Z_p)$, jeho obraz $p (x_p, y_p)$ v rovině snímku B a střed projekce $O (X_o, Y_o, Z_o)$ leží na jedné projekční přímce. Takto popsaná metoda zobrazení je patrné z obrázku Obr. 2 [3].



Obr. 2 Matematický základ fotogrammetrie – model kamery [3]

B	rovina snímku
c	ohnisková vzdálenost
x, y	souřadný systém snímku
x_H, y_H	souřadnice ohniska v rovině snímku
X_P, Y_P	souřadnice měřeného bodu P promítnutého do roviny snímku
X, Y, Z	souřadný systém objektu
X^*, Y^*, Z^*	pomocný souřadný systému
X_O, Y_O, Z_O	souřadnice středu promítání v souřadném systému objektu
X_P, Y_P, Z_P	souřadnice měřícího bodu P v souřadném systému objektu [3]

Vztah mezi souřadnicemi bodu P v souřadném systému objektu a souřadném systému snímku lze vyjádřit rovnicemi (1) a (2) [4],

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = \frac{-c}{Z_p^*} \begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \\ Z_p^* \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_p & - & X_0 \\ Y_p & - & Y_0 \\ Z_p & - & Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

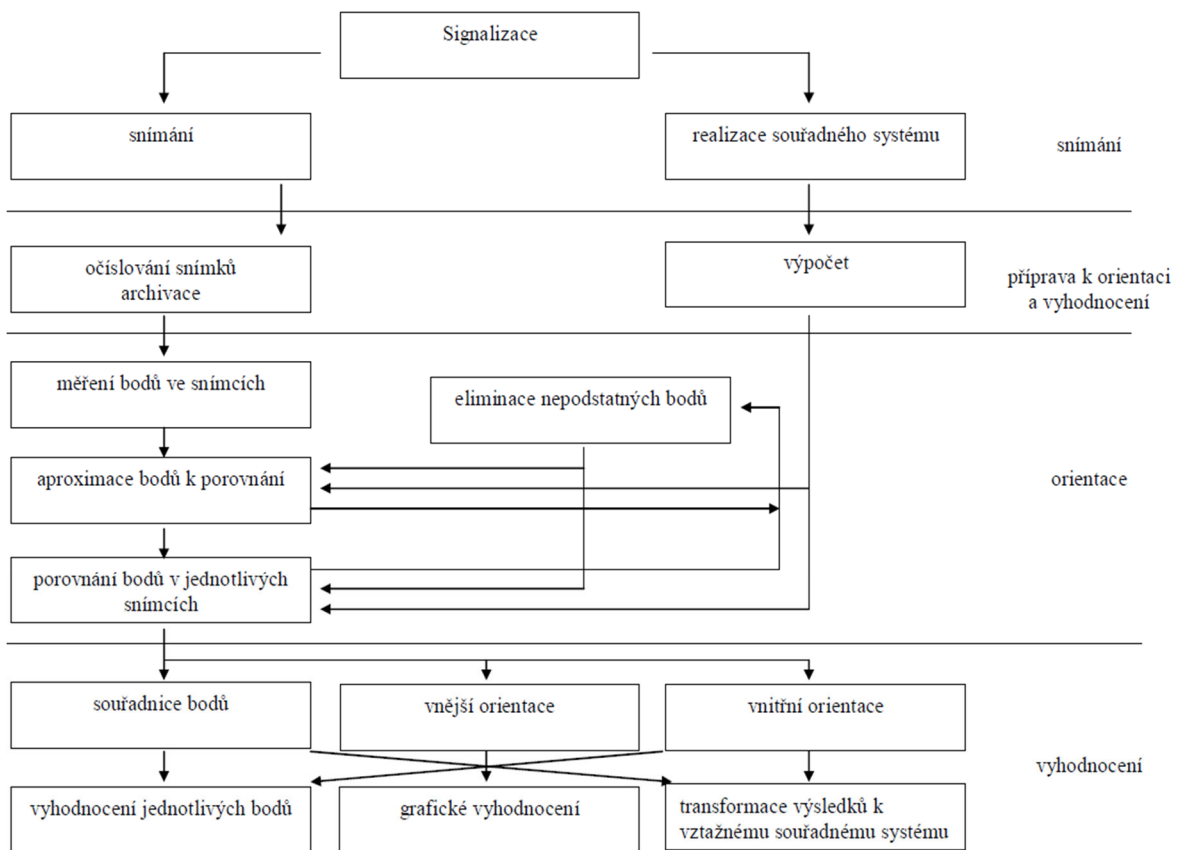
kde: X_p^*, Y_p^*, Z_p^* souřadnice bodu P v pomocném souřadném systému,
 dx, dy zkreslení objektivu,
 R matice rotace [4].

Souřadnice ohniska (x_H, y_H), koeficienty popisující zkreslení objektivu (dx, dy) a ohnisková vzdálenost c nazýváme parametry *vnitřní orientace snímku*. Souřadnice středu promítání (X_0, Y_0, Z_0) a matice rotace R jsou závislé na poloze kamery v globálním souřadném systému a proto je nazýváme parametry *vnější orientace kamery* [4].

Matice R je ortogonální maticí rotace a lze ji vyjádřit tvarem (3) [4].

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.1.2 Proces pořízení a vyhodnocení snímku



Obr. 3 Schéma posloupnosti při fotogrametrii

Popis jednotlivých činností

Snímání

- **signalizace** – definování a označení bodů za účelem zlepšení automatizace a zvýšení přesnosti měření
- **realizace souřadného systému** definováním referenčních bodů
- **záznam obrazu** – analogový nebo digitální obrazový záznam objektu pomocí fotogrammetrického systému

Příprava pro orientaci a vyhodnocení

- **výpočet** souřadnic nebo vzdáleností nasnímaných bodů
- **očíslování snímků** za účelem identifikace jednotlivých záběrů a uložení snímků na úložiště

Orientace

- **identifikace a měření** nasnímaných bodů
- **aproximace bodů** určených k porovnání
- **porovnání bodů v jednotlivých snímcích**
- **odstranění nepodstatných (vadných) bodů**, vzniklých chybnou identifikací bodů (např. odraz, šmouha atd.)

Vyhodnocení

- **souřadnice bodů** – cílem je určení trojrozměrných souřadnic bodů za účelem dalšího numerického zpracování
- **grafické vyhodnocení** požadovaných charakteristik (deformace, útlum atd.)
- **transformace výsledků k požadovanému souřadnému systému** (např. souřadný systém vozu)

Tato posloupnost může být do značné míry automatizována. Za předpokladu, že vlastnosti objektu jsou vhodně označeny a identifikovány pomocí nasnímaných bodů, mohou být počáteční hodnoty vypočteny a odchylky měření (hrubé chyby) odstraněny pomocí metod odhadu [1].

Digitální záznam a zpracování obrazu může poskytnout samostatný a rychlý tok dat od zachycení po vyhodnocení výsledků, takže rozměry objektu jsou k dispozici přímo na místě. Rozlišujeme mezi off-line fotogrammetrickými systémy (jedna kamera, výsledek měření k dispozici po zpracování všech získaných obrazů) a on-line fotogrammetrickými systémy (minimálně dvě kamery současně, okamžitý výsledek měření) [1].

2.1.3 Rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie nachází využití v mnoha oblastech, kde je možné měřený objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit [1].

Fotogrammetrie může být rozdělena podle několika kritérií:

- Podle místa a vzdálenosti pořízeného snímku (h)
 - *Satelitní* – zpracování satelitních snímků, $h > \sim 200$ km
 - *Letecká* – zpracování leteckých snímků, $h > \sim 300$ m

- *Pozemní* – měření z pevně stanoveného místa na zemi
- *Blízká* – zobrazovací vzdálenost $h < 300$ m
- *Makro* – zpracování snímků z mikroskopu [1]

- Podle počtu měřených snímků
 - *Jednosnímková fotogrammetrie*
 - *Dvousnímková (stereo) fotogrammetrie*
 - *Vícesnímková fotogrammetrie* [1]

- Podle způsobu pořízení a vyhodnocení snímku
 - *Snímky pořízené na měřicím stole* – grafické vyhodnocení (do roku 1930)
 - *Analogová fotogrammetrie* – analogové kamery, opticko-mechanické měřicí systémy (do roku 1980)
 - *Analytická fotogrammetrie* – analogové snímky, počítačově řízené vyhodnocení
 - *Digitální fotogrammetrie* – digitální snímky, počítačově řízené vyhodnocení
 - *Video fotogrammetrie* – využití videokamer
 - *Panoramatická fotogrammetrie* – panoramatické zobrazování a zpracování
 - *Liniová fotogrammetrie* – vyhodnocení pomocí přímek [1]

- Podle časové dostupnosti vyhodnocení snímků
 - *Real-time* – záznam a měření dokončené v určitém časovém úseku příslušném pro danou aplikaci. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb...) objektu.
 - *Off-line* – sekvenční, digitální záznam obrazu, časově oddělené snímání a vyhodnocení snímku
 - *On-line* – zároveň probíhající snímání a vyhodnocení snímku, digitální záznam, kamery jsou propojeny s počítačem [1]

2.1.4 Aplikace fotogrammetrie

- Strojírenství

- Proměrování výrobků
- Sledování montáže velkých dílů
- Optické měřicí systémy
- Analýza zkoušek bezpečnosti vozidel (viz. Obr. 4)
- Měření přípravků
- Prostorové simulace [1]



Obr. 4 Aplikace fotogrammetrie v automobilovém průmyslu [8]

- Stavebnictví a architektura
 - Měření a dokumentace staveb (viz. Obr. 5)
 - Měření fasád, deformací
 - Zaměření liniových staveb
 - Mapové podklady pro projekty a rekonstrukce
 - 3D modely měst
 - Pohledové studie, sledování postupu výstavby [1]



Obr. 5 Aplikace fotogrammetrie ve stavebnictví [30]

- Těžební průmysl a ekologie
 - Sledování povrchových dolů a lomů
 - Inventarizace skládek
 - Sledování skládek odpadu a znečištění (např. vodních toků)

- Zemědělství, lesnictví a vodní hospodářství
 - Sledování využití krajiny (dříve osevní plány)
 - Porostové mapy
 - Sledování těžby
 - Kalamity (polomy)
 - Modelování povodí
 - Zjišťování rozsahu záplav

- Forenzní analýza, kriminalistika
 - Záznam dopravních nehod
 - Analýza místa trestného činu [1]

- Medicína
 - Sledování a dokumentace výsledků rehabilitace
 - Stomatologie
 - Analýza pohybu a ergonomie
 - Plastická chirurgie [1]

2.1.5 Optické měřicí systémy

Jak je viditelné z předchozí kapitoly, fotogrammetrie má široké využití v různých oblastech vědy a průmyslu. Principy fotogrammetrie pronikly i do strojírenství, kde se optických metod využívá ke zrychlení, zkvalitnění a zlevnění výroby (příprava a kontrola výroby, výroba prototypů). Optických systémů ve strojírenství využíváme k usnadnění měření rozměrových veličin jako kontrola tvaru a rozměru výlisku. Data z těchto měření můžeme využít pro převod předmětů do digitální podoby a tvorbu CAD modelů. Využitím měření kinematických veličin dokážeme odvodit stavy napjatosti, deformační chování materiálů a zjistit pohybové charakteristiky objektů. Neustále se zvyšující nároky na vývoj a tlak na snižování nákladů v automobilovém průmyslu způsobují, že inovativní metody získávají na stále větší důležitosti [5].

Na trhu lze nalézt několik výrobců optických systémů. Mezi nejznámější výrobce patří firmy GOM GmbH nebo Steinbichler Optotechnik GmbH. Pro oblast tváření jsou velmi často využívány optické systémy ARAMIS, ARGUS a PONTOS od firmy GOM GmbH. Tyto systémy umožňují vyhodnocovat deformační či pohybové procesy. Systém ATOS též od firmy GOM GmbH umožňuje 3D skenování ploch a jejich převod do 3D CAD systémů (např. plochy součástí karoserie a jejich tvarová kontrola). Výše zmíněné systémy napomáhají při dimenzování součástek a při optimalizaci tvářecích procesů.

Bezkontaktní optický měřicí systém ARAMIS

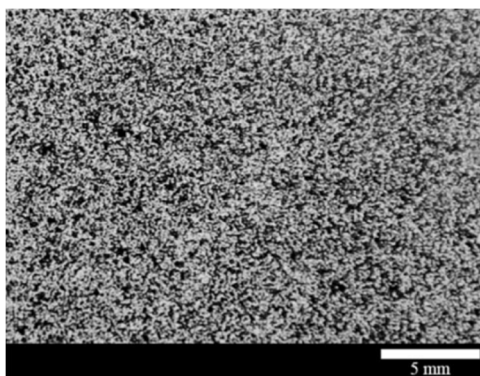
Jedná se o bezkontaktní systém, s jehož pomocí lze bezkontaktně snímat data o 3D povrchu, objemu a reálných deformacích při statickém nebo dynamickém namáhání. Díky tomuto provedení nejsme nuceni použít velké množství tradičních měřicích přístrojů (tenzometrů, extenzometrů), tak jak tomu bylo dříve [5].



Obr. 6 Optický měřicí systém Aramis [6]

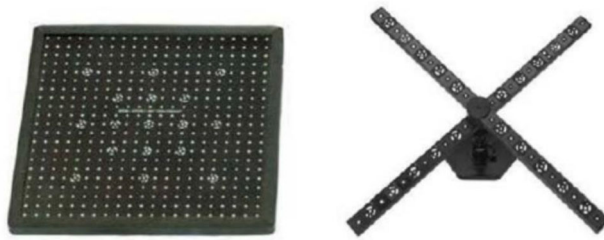
Optický měřicí systém Aramis využívá principu stereo fotogrammetrie, což znamená snímání objektu pomocí 2 kamer. Kamery mají vysoké rozlišení a také disponují vysokou snímkovací frekvencí. Důležitým parametrem pro úspěšné měření je synchronizace obou kamer tak, aby k pořízení snímku došlo ve stejný okamžik. Kamery jsou umístěny na stativu (společné základně) zároveň i s osvětlením, které má za úkol zajistit dostatečnou intenzitu světla v měřené oblasti. Na stativu je také umístěn laser, jenž slouží ke kalibraci přístroje.

System využívá deformační síť na povrchu plechu. Na povrch zkoumaného objektu je nanesen deformační vzor (tzv. pattern), který se deformuje současně s měřeným objektem. Deformační vzor je nejčastěji tvořen bílou a černou barvou, který se nanáší například stříkáním barvy na povrch plechu. Bílá barva slouží jako podklad a je nanášena jako první, po jejím zaschnutí se nanáší druhá vrstva černé barvy. Výsledkem je náhodné uspořádání deformační sítě. Příklad, jak takový pattern může vypadat je uveden na obrázku Obr. 7.



Obr. 7 Ručně nanesený pattern

Pro tento případ je tedy velmi důležité zajistit, aby barva měla dostatečnou přilnavost na základní materiál, ale také aby se deformovala společně s tvářeným materiálem. Dalším krokem měření je kalibrace měřicího systému pomocí kalibrační destičky. Velikost kalibrační destičky se odvíjí od velikosti sledovaného objektu a požadované přesnosti měření. Na kalibrační destičce jsou znázorněny tzv. referenční body, jejichž poloha a vzdálenosti jsou známy. Po pořízení snímků destičky z různých pohledů systém vypočítává měřící objem a chybu měření [5].



Obr. 8 Kalibrační deska a kalibrační kříž [7]

Poté následuje samotné měření, kdy je měřený objekt během deformace snímán danou snímkovací frekvencí pomocí obou kamer. Při vyhodnocování dochází k rozdělení snímku na menší části tzv. fazety, které mají definovanou velikost v řádech pixelů a navíc se vzájemně překrývají. Systém vypočítává pro každou z fazet stupeň šedi a díky tomu může vznikat velké množství bodů, které jsou vyhodnocovány. Během výpočtu jsou systémem vyhledávány fazety se stejným stupněm šedi jako u předcházejícího snímku a počítáno jejich posunutí. Po takto provedeném měření jsme schopni vyhodnotit deformace materiálu.

Bezkontaktní optický systém ARGUS

Systém Argus je určen především k analýze deformace plechu během lisovacího procesu. Hlavní využití systému je tam, kde není možné sledovat průběh lisování po celou dobu procesu. To je hlavní rozdíl od měřících systémů Aramis a Pontos, u kterých je průběh zkoušky zaznamenáván kontinuálně od začátku do konce. Další rozdíl je ten, že prostorový obraz u systému Argus je získáván pouze jednou kamerou z více poloh a poté se snímky skládají. Pro analýzu deformace potřebujeme snímky počátečního a koncového stavu, na kterých musí být zachyceny kalibrační kameny a tyčinky na okraji vzorku.

Kalibrační tyčinky by měly být, pokud možno, umístěny kolmo na sebe. Také nesou dva body s přesně kalibrovanou vzdáleností, jenž je potřeba pro výpočet. Kalibrační kameny nám slouží ke kalibraci systému a umožňují rozpoznat polohu kamery během snímání. Na povrch zkušebního vzorku musí být nanášena deformační síť s předem definovaným tvarem a rozměrem jednotlivých bodů, která se bude deformovat zároveň s tvářeným materiálem [6, 9, 10].



Obr. 9 Fotoaparát systému Argus [10]

Bezdotykový optický 3D skener ATOS

ATOS je mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM, který využívá pro skenování strukturované světlo. Tento princip skenování nám zajišťuje velké rozlišení naskenovaných dat a výkonné měření. Díky konstrukci skeneru je možné široké uplatnění v oblasti měřitelných objemů. Mezi hlavní přednosti systému se řadí vysoké rozlišení (až 66 bodů na 1 mm), široká flexibilita (jedním zařízením můžeme měřit objekty v řádech milimetrů až metrů), mobilita a vysoká výkonnost. Tento skener se využívá k měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem v oblastech CAD, CAM a FEM (Finite Element Method). Dalším příkladem použití může být např. skenování celých sestav lisovacích strojů, vstřikovacích forem nebo poškozených tvarových vložek [11, 12].



Obr. 10 Pracoviště skeneru Atos III Triple Scan [12]

Bezkontaktní měřicí systém PONTOS

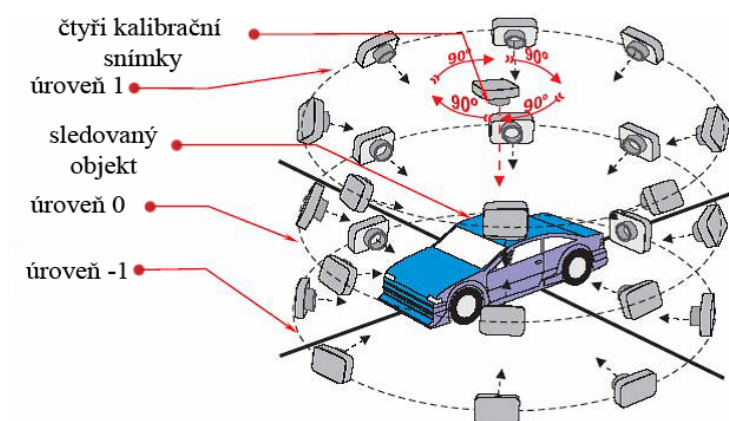
Jedná se o mobilní optický bezkontaktní měřicí systém, který je založen na principu optické triangulace. Systém je vybaven dvojicí digitálních kamer, které jsou synchronizovány a umožňují tak 3D zobrazení. U systému Pontos se nepoužívá nástřiková síť, označení objektu docílíme za pomoci optických bodů. Tyto optické body jsou během měření snímány a následně se dopočítávají jejich prostorové souřadnice, posunutí a deformace jednotlivých bodů. Počet bodů, které jsou měřeny je neomezený a také není závislý na snímkovací frekvenci. Využití měřicího systému Pontos je především v automobilovém a leteckém průmyslu (užívá se např. pro měření v aerodynamickém tunelu), konkrétně slouží pro dynamické měření pohybů, deformací a vibrací libovolného počtu referenčních bodů. Dále to může být pro ověření počítačových simulací a koncepčních designových návrhů nebo k měření kinetických a kinematických veličin těles a soustav [13, 14, 15].



Obr. 11 Systém PONTOS s kalibračními tyčemi a počítačem [15]

Bezdotykový optický 3D skener TRITOP

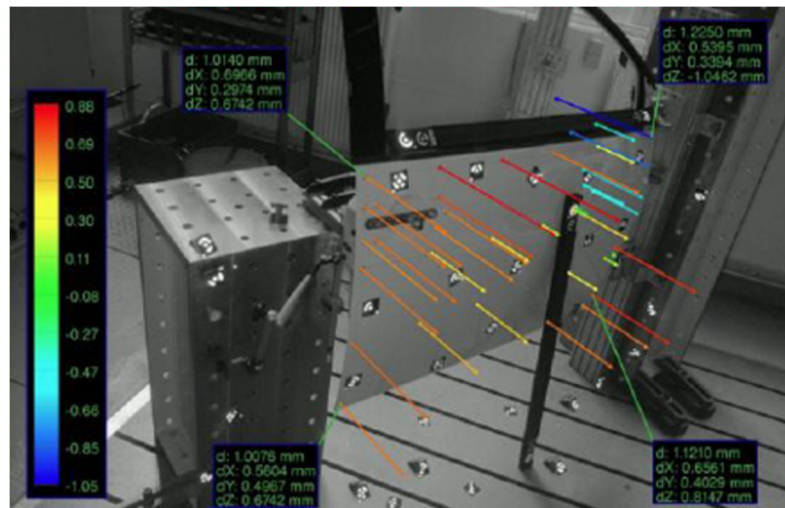
Systém Tritop je snadno přenosný optický systém, který pracuje na principu jednosnímkové real-time fotogrammetrie. To znamená, že používá jednu kameru, kterou snímá měřený objekt, a to postupně z několika úrovní (viz. Obr. 12). Na měřený objekt jsou nalepeny referenční body (viz. Obr. 13). K určení souřadnic jednotlivých bodů dochází principem vyrovnání bloku projekčních svazků. Dalšími součástmi kompletního aparátu jsou referenční body, kalibrační tyče a výkonný počítač. Hmotnost celého systému je pouze přibližně 23 kg, tím pádem je snadné dopravit systém k měřenému objektu, se kterým již není potřeba manipulovat.



Obr. 12 Snímání 3D objektu pomocí Tritop kamery [16]

Systém je díky své vysoké mobilitě vhodným doplňkem k systému Pontos nebo k jiným optickým měřicím systémům na platformě GOM. Na základě pořízených snímků je systém schopen vypočítat 3D posunutí a deformace měřených objektů. V porovnání

s konvenčními měřicími systémy je jednou z výhod, že se posunutí a deformace zaznamenávají bez kabeláže, senzorů a bez zasahování do měřeného objektu. Systém Tritop je zejména využíván pro statickou deformační analýzu, hlavně v automobilovém průmyslu (deformační analýzy aut v klimatických komorách), ale také se s ním můžeme často setkat při kontrole kvality velkorozměrových objektů jako jsou např. letadla, lodě nebo větrné turbíny [16, 17, 18].



Obr. 13 Ukázka měření deformací dveří automobilu pomocí referenčních bodů [18]

2.2 Diagramy mezních přetvoření

Při tváření je tvářený plech podroben vnějšímu, převážně dvouosému namáhání. Pro hodnocení soudržnosti tvářeného materiálu je potřeba znát dvě důležité kombinace namáhání (tah-tah, tah-tlak), pokud se jedná o jednoosé namáhání, tak pouze tah.

Pod pojmem deformace rozumíme vnější projev účinku vnitřních napětí vnesených do tvářeného materiálu a to nejčastěji mechanickou silou. Mezní deformaci je možné definovat jako maximální deformaci tvářeného materiálu (plechu), která ještě nezpůsobí podstatné snížení tloušťky stěny plechu proti tloušťce původní.

V případě, že je potřeba hodnotit tvářitelnost tenkých ocelových plechů, tak je pro posouzení lisovatelnosti materiálu nutné respektovat různé stavy napjatosti, které se mohou v procesu tváření vyskytnout. Výsledné vlastnosti plechu budou zobrazeny ve formě diagramu, který popisuje celý interval stavů napjatosti. Výsledným výstupem tohoto diagramu je zobrazení mezní stavu pro bezpečné lisování daného materiálu. Tento diagram se nazývá diagram mezních přetvoření (DMP) v anglickém jazyce FLD (forming limit

diagram) a hranice lisovatelnosti se nazývá křivka mezních přetvoření (KMP) v anglickém jazyce FLC (forming limit curve) [19].

DMP je možné vysvětlit teoreticky pomocí podmínek ztrát stability během tváření, kdy nedochází k přírůstku sil působících na materiál nebo může nabýt i záporné hodnoty ($dF \leq 0$). Dle mechanického přetvoření se dají rozlišit tři stavy nestability [20].

- **Ztráta stability na mezi kluzu**

Tato ztráta stability se vyskytuje v oblasti malých plastických deformací. Projevuje se tvorbou povrchových Lüdersových vrásek, které při dosažení oblasti rozvinutých plastických deformací vymizí.

- **Ztráta stability vybočením vlivem tlakových napětí**

Svým charakterem odpovídá ztrátě stability při namáhání na vzpěr. Ztráta se projevuje jako zvlnění v oblasti přidržovače při tažení výlisku. Může se také objevit na volném povrchu výlisku. Pro odstranění této stability v oblasti příruby je nutná změna přidržovacího tlaku. Pokud vlny vzniknou na volném povrchu výlisku, jejich odstranění se řeší vytvořením místního prolisu [21].

- **Ztráta stability na mezi pevnosti**

Jedná se o ztrátu stability, jenž se objevuje v oblastech velkých plastických deformací při dosažení meze pevnosti. Z hlediska tváření má tato ztráta stability největší význam a to proto, že po jejím dosažení nastává nebezpečí vzniku trhliny, tedy zmetku. Při dosažení meze pevnosti u jednoosého tahového stavu napjatosti dochází ke změně přetvoření z původního rovnoměrného na přetvoření lokalizované (nerovnoměrné), jenž se projeví tvorbou krčku. Při dvouosé napjatosti se po překročení meze pevnosti projevuje lokální zúžení ve směru tloušťky. Zde se také projevuje velký vliv anizotropie materiálu [21].

Můžeme tedy konstatovat, že ztráta stability procesu tváření při lisování souvisí s náhlým vyčerpáním plastických schopností materiálu a vznikem lomu. Jedním z faktorů, který ovlivňuje schopnost k plastické deformaci materiálu, je stav napjatosti. Pokud označíme hlavní normálová napětí v rovině plechu σ_1 a σ_2 ($\sigma_3 = 0$ a $|\sigma_1| \geq |\sigma_2|$), lze pak napsat (4),

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0 \quad (4)$$

kde: m_σ – ukazatel stavu napjatosti.

Ukazatel stavu napjatosti m_σ nabývá hodnot $m_\sigma \in \langle -1, 1 \rangle$ a jeho velikost je (5),

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (5)$$

kde: σ_1 – hlavní napětí v rovině plechu [MPa],

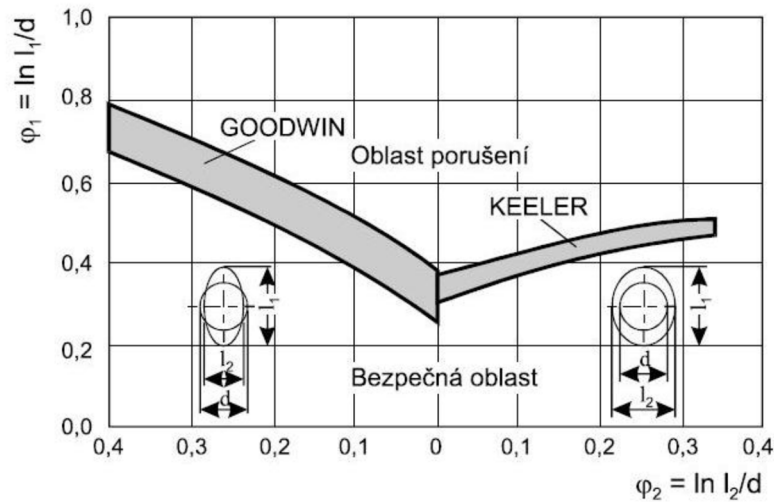
σ_2 – vedlejší napětí v rovině plechu [MPa].

Mezní stavy přetvoření daného materiálu je možné vyjádřit v závislosti na napjatosti, při daných rychlostně-teplotních podmínkách. Všechna tři hlavní přetvoření lze vyjádřit pomocí jedné veličiny, která se nazývá **kritická intenzita přetvoření** φ_{ik} .

$$\varphi_{ik} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_{1k} - \varphi_{2k})^2 + (\varphi_{2k} - \varphi_{3k})^2 + (\varphi_{3k} - \varphi_{1k})^2} \quad (6)$$

kde: φ_{ik} – kritické mezní přetvoření.

Diagram mezních přetvoření je možné sestavit ze závislosti $m_\sigma - \varphi_{ik}$. Tento způsob použil ve svých studiích Tomlenov (Tomlenův diagram) kde křivka mezního přetvoření vyjadřuje ztrátu stability na mezi pevnosti. Jednalo se však o poněkud pracné hledání obou souřadnic (pomocí intenzity přetvoření φ_i) a tak v polovině 60. let pánové Keeler (1965) a Goodwin (1968) přišli s novým návrhem postupu k sestavení DMP. Návrh spočíval v tom, že byly použity přímo naměřené hodnoty kritických hlavních normálových přetvoření φ_{1k} a φ_{2k} při daných stupních napjatosti. V tomto případě se tedy jedná o závislost hlavní přetvoření φ_1 (major strain) a vedlejšího přetvoření φ_2 (minor strain). Jednotlivé stavy napjatosti jsou pak charakterizovány m_σ [19].



Obr. 14 Schéma diagramu mezního přetvoření dle Keelera - Goodwina [9]

Maximální přetvoření lze vyjádřit pomocí (7).

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \quad (7)$$

Minimální přetvoření pak pomocí (8),

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{d_2}{d_0}\right) \quad (8)$$

kde d_1, d_2 – konečná délka v oblasti definovaného mezního stavu [mm],

d_0 – počáteční měřená délka [mm].

Další ukazatel pro úměrné přetvoření je **ukazatel stavu přetvoření** $m_\varphi[-]$ a je definovaný jako (9).

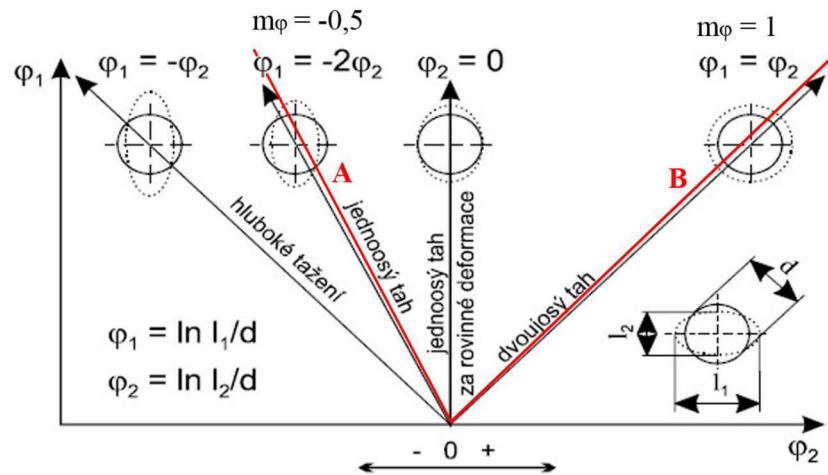
$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (9)$$

Z tohoto důvodu je tedy nejvýhodnější pro sestavení DMP použít souřadnice φ_1 a φ_2 a použít m_φ k určení konkrétního stavu napjatosti, jenž nabývá hodnot $m_\varphi \in \langle -1, 1 \rangle$.

Ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech přetvoření ohraničených hodnotami $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$, kdy toto tvrzení ukázaly praktické zkušenosti. Při sestavování DMP v tomto intervalu je pak nutné modelovat stavy přetvoření.

V diagramu mezních přetvoření je možné charakterizovat stavy napjatosti a přetvoření. Tyto stavy je dále možné charakterizovat tzv. deformačními stopami, které jsou zobrazeny

na obrázku Obr. 15 včetně kruhových elementů deformační sítě před a po přetvoření při dané napjatosti.



Obr. 15 Deformační stopy při plošném tváření [9]

Velikost mezních přetvoření závisí na několika faktorech, hlavní proměnnou je plasticita daného plechu, dále je značně závislá na způsobu, jakým je mezní stav definován. Za mezní stav lze pokládat buď mez pevnosti nebo dosažení porušení soudržnosti plechu tvárným lomem. K určení DMP je nutné získat hodnoty mezních přetvoření, a to v rozsahu vhodných stavů m_φ pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Určení různých stavů m_φ lze experimentálně nebo početně [9, 19].

2.2.1 Určování DMP početními metodami

V současné době se početní metody k sestavení DMP téměř nepoužívají a výhradně se využívají metody experimentální. Hlavním důvodem, proč se od početních metod odstoupilo, je hojné použití zjednodušujících předpokladů, které mají za následek nepřesnost výpočtu.

Teoretické početní metody jsou založeny na základě rozboru vlastností materiálu, především na teorii plasticity. Jedná se především o vyjádření funkce materiálových charakteristik, které byly naměřeny pomocí zkoušky tahem a pomocí stavu napjatosti. Tímto způsobem získané vztahy pro všechny početní metody používají velké množství zjednodušujících předpokladů, jak již bylo zmíněno výše a tyto předpoklady jsou v mnoha případech vzdálené od reality. V teoretickém výpočtu není možné zohlednit všechny aspekty ovlivňující proces vzniku lokálních ztenčení jako jsou tolerance tloušťky plechu,

tření a historie tváření což je dalším důvodem malého využití těchto metod. Nejrozšířenější jsou následující početní metody (matematické modely) pro výpočet mezních přetvoření:

- **Teoretické Goodwin-Keelerovy diagramy mezních přetvoření**

Metoda spočívá v matematickém určení okamžiku ztráty stability na mezi pevnosti, pro "pravou" větev DMP je uvažována podmínka difúzní ztráty stability a pro "levou" větev podmínka lokální ztráty stability [23, 24, 25].

- **MK teorie**

Tato metoda uvažuje skutečnost, že materiál obsahuje výchozí nehomogenity zapříčiňující vznik lokálních ztenčení, které vedou k porušení. S touto metodou výpočtu mezních přetvoření plechu v podmínkách rovinné napjatosti v důsledku lokálního zmenšení tloušťky přišli pánové Marciniak a Kucziński. Pojetí ztráty stability má velice blízko k realitě plastického přetvoření skutečného plechu [20].

- **Křivka přetvoření podle Ghosche**

Jedná se o metodu, která vychází z poznatků o mechanismu tvárného lomu a z existence vměstků v materiálu. Princip metody spočívá v předpokladu přítomnosti vměstků, kolem kterých se tvoří vnitřní dutiny, jejichž postupným splýváním dojde k porušení. Metodika výpočtu vychází z druhé krajní polohy definice mezního stavu, což znamená dosažení tvárného lomu. Způsob postupu výpočtu odvodil A. K. Ghosh [26].

2.2.2 Určování DMP experimentálním způsobem

Určování DMP experimentální způsobem spočívá v definování mezního stavu, při jehož dosažení budou vyhodnocovány odpovídající mezní přetvoření $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ při různých stavech napjatosti. Důležitým aspektem je volba mezního stavu, jenž rozhoduje o správnosti vyhodnocení DMP.

K sestavení DMP experimentální metodou je zapotřebí naměřit značné množství hodnot hlavních a vedlejších mezních přetvoření $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ v rozsahu stavů přetvoření $m_{\varphi} \in \langle -0,5; 1 \rangle$. V současné době se pro zjišťování DMP nejčastěji používají laboratorní zkoušky. Nejvíce rozšířené laboratorní zkoušky jsou:

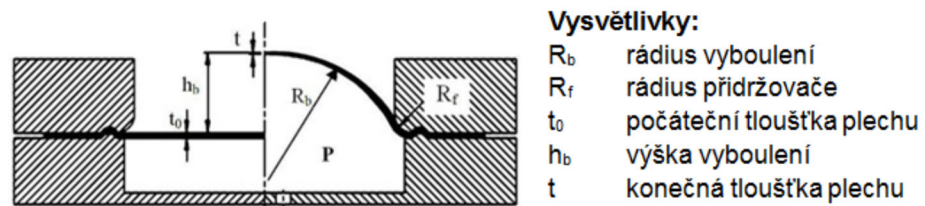
- **Zkouška tahem se vzorkem s různými vruby**

Pomocí vrubů na zkušební tyčce, které mají různé tvary se docílí různých stavů přetvoření. Výhodou zkoušky je jednoduchá příprava vzorků, malá náročnost na

potřebné stroje a to že může být prováděna na běžném trhacím stroji. Nevýhodou je malá plastická oblast s požadovaným stavem napjatosti a s tím související obtížnější vyhodnocení zkoušky. Na základě této metody lze sestavit pouze levou regresní křivku v DMP, zatímco pro konstrukci pravé je prakticky nepoužitelná.

- **Zkouška hydraulickým kulovým tažníkem (Hydraulic bulge test)**

Principem metody je vypínání kruhového vzorku (plechu) o průměru 210 mm přetlakem kapaliny a k vyhodnocení zkoušky se v dnešní době používají zejména fotogrammetrické metody. Požadovaných přetvoření se docíluje použitím tažnic různých tvarů, od kruhových až po eliptické s proměnnou velikostí hlavních os elipsy. Při zkoušce je eliminováno tření použitím kapaliny jako nosného média, které zabraňuje praskání mimo střed vzorku. Nevýhodou metody je potřeba zařízení pro vyboulování za pomoci kapaliny a sada několika tažnic. Vhodná pouze ke konstrukci pravé části KMP.



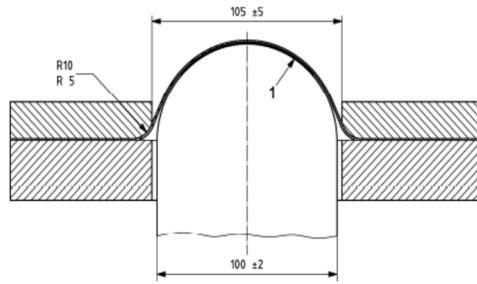
Obr. 16 Řez nástrojem u hydraulické zkoušky pro zjišťování KMP [27]

- **Zkouška vypínání kruhových přístřihů s proměnnou šířkou b**

Při této metodě se k sestavení křivek používá několik vzorků s různou geometrií, aby byly vyšetřeny jak víceosé, tak jednoosé napjatosti (kompletní DMP). Zkouška je popsána normou ISO/DIS 12004-2 [28].

a) Metoda dle Nakajimy

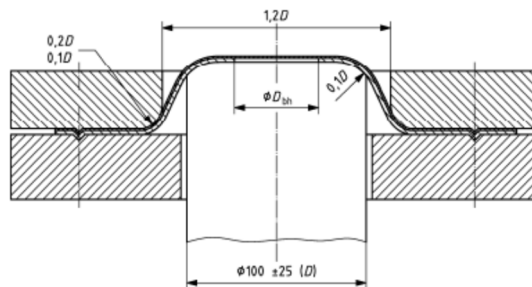
Při dosažení ideálního způsobu namáhání nastává lom na vrcholu kulového vrchlíku. Různých stavů přetvoření je dosaženo pomocí různě velkých poloměrů úsečí z obou stran nástřihu. Tyto úseče mění jeho šířku ve střední části.



Obr. 17 Řez nástroje pro určení KMP dle Nakajimy [28]

b) Metoda dle Marciniaka

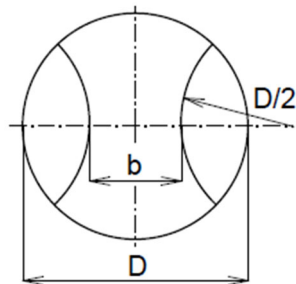
S touto metodou přišli pánové Marciniak a Kuczyński. Principem metody je použití tažníku, který má plochý tvar z důvodu dosažení lokálního zúžení v horizontální rovině. Další podmínkou vzniku trhliny v horizontální podobě je nutné použití podložky pro tváření s otvorem uprostřed [29].



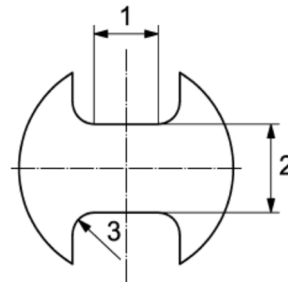
Obr. 18 Řez nástroje pro určení KMP dle Marciniaka [28]

V současné době je nejčastěji používanou zkouškou vypínání přístřihů s proměnnou šířkou tzv. Nakajima test, kdy mezi její největší výhodu patří to, že dokáže plynule pokrýt celý interval stavů přetvoření m_ϕ a také nenáročnost na nástroje pro stříhání vzorků. Pevně sevřené přístřihy jsou vypínány pomocí polokulového tažníku o průměru 100 mm až do okamžiku vzniku trhliny nebo jinak definovaného mezního stavu. Přístřihy mohou být s kruhovými segmenty nebo s definovaným výstřihem. Na obrázcích Obr. 19 a Obr. 20 jsou znázorněny zkušební vzorky. Abychom dosáhli všech potřebných stavů přetvoření m_ϕ je zapotřebí postupně měnit šířku b , té se dosáhne změnou velikosti kroku na střižném nástroji. Rozsah šířky zkušební vzorku se používá od $b = 30$ mm do $b = 210$ mm. Plný rozměr vzorku $b = D$, tedy zkoušený materiál je v podobě plného kruhu odpovídá rovnoosému vypínání, $m_\phi = 1$ (deformační stopa B na obrázku 15). Naopak vzorek mající

minimální šířku $b = 30$ mm odpovídá stavu přetvoření pro zkoušku tahem, kde $m_\varphi = -0,5$ (deformační stopa A na obrázku 15).



Obr. 19 Tvar zkušební vzorku [19]



Vysvětlivky:
 1 Délka vybrání
 2 Šířka vzorku
 3 Rádus $R =$
 (20–30) mm

Obr. 20 Tvar přístřihu pro zkoušku DMP dle normy ISO EN 12004-2 [28]

Z experimentálních měření bylo zjištěno, že aby došlo k plynulému pokrytí intervalu $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$ je potřeba použít minimálně 13 vzorků o různých šířkách. Navzdory tomu se běžně v praxi používá jen asi 5–7 deformačních stop pro zjišťování DMP.

2.2.3 Faktory ovlivňující DMP

Diagram mezních přetvoření může být ovlivněn mnoha faktory. Mezi tyto faktory lze zahrnout materiálové charakteristiky, které mají vliv na polohu křivky mezních přetvoření (KMP). Mezi jedny z nejdůležitějších materiálových charakteristik využívaných během výpočtu mezních přetvoření patří:

- poměr plastických přetvoření (normálová anizotropie) r
- exponent deformačního zpevnění n
- koeficient monotónního zpevnění C
- lomová přetvoření $\varphi_{1L,2L}$
- parametr zeslabení t popisující rozdíly v tloušťce plechu
- exponent m popisující citlivost materiálu na rychlost deformace

Tvar křivky mezních přetvoření je tedy více či méně závislý na výše uvedených parametrech. Lze konstatovat, že se vzrůstající hodnotou n se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 . Stejně tak je tomu v případě normálové anizotropie, se vzrůstající hodnotou

r se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 . S rostoucím parametrem zeslabení t , se KMP rovněž posouvá k vyšším hodnotám φ_1 [9].

Další faktory ovlivňující DMP se mohou objevit během samotného měření experimentu, a to v podobě volby frekvence snímání celého procesu. Jako jednu z dalších chyb můžeme uvést nepřesné odečítání porušení (okamžik vzniku zeslabení – vznik krčku). Na toto vyhodnocování může mít vliv také lidský faktor [9].

2.2.4 Určení mezního stupně přetvoření

Z hlediska správnosti vyhodnocení DMP je určení mezního stupně přetvoření rozhodující. V oblasti velkých plastických přetvoření je vhodné stanovit mezní stupeň přetvoření v intervalu meze pevnosti a okamžiku tvárného lomu. Za předpokladu takto zvolených mezních stavů máme určené krajní hranice. Výběr mezního stavu je vhodné, s hlediskem na komplexní využití diagramů, uvažovat ve vztahu k použitému materiálu a k reálnému výlisku. Během lisování výlisku je takřka nemožné určit, kdy materiál dosáhl meze pevnosti. Naproti tomu vznik zmetku a výskyt prvních trhlinek v materiálu je evidentní. V prvním případě se jedná o již neopravitelný zmetek, ve druhém se může jednat o nevyužití plastičnosti materiálu [22].

I takto definovaný mezní stav je obtížné určit vizuálně. Na základě experimentálního zkoumání byly navrženy tyto metody: např. metoda grafická, metoda interpolační, metoda ekvivalentního bodu, metoda výběru vhodných elementů nebo Heckerova metoda. Nejvýhodnější metodou se v praktických podmínkách ukazuje metoda výběru vhodných elementů v okolí lomové plochy. Samotný výběr se uskutečňuje za dodržování definice mezního stavu. Obecně takový výběr může obsahovat elementy zasažené lomem i lokálním a difúzním ztenčením. V případě reálného lisování je nejvhodnější využít přetvoření, které je realizované do okamžiku vzniku lokálního ztenčení. Pak se deformace lokalizuje do úzkého krčku, kdy za stavu rovinného přetvoření dochází k prodloužení délky pouze na úkor tloušťky zkoušeného plechu. V oblasti okolo krčku k deformaci prakticky nedochází. Vzhledem k malé tloušťce plechu se pak přírůstek přetvoření v tomto okamžiku pro realizaci změny tvaru výlisku stává zanedbatelným [22].

2.2.5 Určování mezního stupně přetvoření pomocí normy ISO/DIS 12004-2

Diagram mezní tvářitelnosti (FLD) je diagram obsahující body hlavních/vedlejších deformací a v rámci tohoto diagramu je možné rozlišovat hodnoty bezpečných deformací, deformací na mezi plastické stability a deformací vedoucích k porušení. V tomto diagramu je zobrazena křivka mezní tvářitelnosti (FLC), která definuje přechod od bezpečných deformací do deformací vedoucích k porušení materiálu [28].

Pro stanovení meze tvářitelnosti materiálů je možné použít dvě různé metody:

1. Analýzu deformací vadných součástí v lisovně, aby se stanovily křivky mezní tvářitelnosti závislé na součásti a procesu

Metoda se využívá v lisovně, kde průběhy deformací k dosažení těchto bodů nejsou obvykle známy. V tomto případě křivka mezní tvářitelnosti závisí na materiálu, součásti a zvolených podmínkách. Popis této metody je v ISO/DIS 12004-1.

2. Stanovení křivek mezní tvářitelnosti za dobře definovaných laboratorních podmínek

K vyhodnocení tvářitelnosti je zapotřebí jedna jediná křivka mezní tvářitelnosti v několika stavech deformací. Stanovení křivky mezní tvářitelnosti musí být specifické a je nutné použití různých průběhů lineárních deformací. Tato metoda se doporučuje používat pro charakterizování materiálu, jak popisuje ISO/DIS 12004-2. Pro tuto metodu platí rovněž následující podmínky:

- Křivky mezní tvářitelnosti (FLC) se stanovují pro specifické materiály, k definování rozsahu, v jakém mohou být deformovány tažením, rozšiřováním nebo libovolnou kombinací tažení a rozšiřování. Tato schopnost je limitována výskytem lomu, místního zúžení. Existuje mnoho metod pro stanovení meze tvářitelnosti materiálu, s tím že výsledky získané různými metodami nemohou být použity pro účely srovnání.
- Křivka mezní tvářitelnosti charakterizuje deformační mez materiálu ve stavu po definovaném termomechanickém zpracování a v analyzované tloušťce. Pro posouzení tvářitelnosti jsou důležité další znalosti

mechanických vlastností a historie zpracování materiálu před zkouškou křivek mezní tvářitelnosti.

Aby bylo možné porovnávat tvářitelnosti různých materiálů je důležité nejen posoudit křivku, ale rovněž i následující parametry:

- a. mechanické vlastnosti nejméně v hlavním směru
- b. plastické prodloužení měřené průtahoměrem v procentech při maximálním zatížení podle ISO 6892-1
- c. hodnotu poměru plastických přetvoření (normálová anizotropie) r s daným rozsahem deformace podle ISO 10113
- d. hodnotu exponentu deformačního zpevnění n s daným rozsahem deformace podle ISO 10275

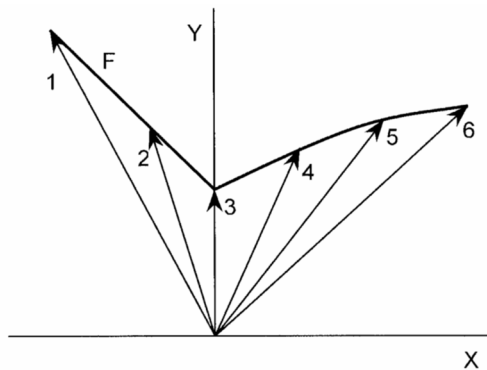
Metoda ISO/DIS 12004-2, podle které jsme se řídili v experimentální části, specifikuje zkušební podmínky používané při konstrukci křivky mezní tvářitelnosti (FLC) při okolní teplotě a za použití lineárních průběhů deformace. Testovaný materiál je plochý, kovový o tloušťce mezi 0,3mm a 4 mm. Důvodem omezení tloušťky materiálu do 4 mm je, aby dávalo maximální poměr tloušťky k průměru razníku. Doporučená maximální tloušťka pro ocel je 2,5 mm.

Principem je vykreslit křivku mezní tvářitelnosti (FLC), která definuje přechod od bezpečných deformací do deformací vedoucích k porušení materiálu. Pro přesné stanovení křivky mezní tvářitelnosti (FLC) je nutné dosáhnou stavu kdy bude docházet k minimálním nebo téměř žádnému tření mezi výliskem a kulovým tažníkem. Testované vzorky je nutné opatřit buď deformační sítí nebo kontrastním nástřikem, aby bylo možné identifikovat pohyb materiálu při následné deformaci. Takto označený vzorek se poté deformuje buď pomocí postupu Nakajima nebo Marciniaka až do porušení, kde se test zastaví.

Deformace (napětí) napříč deformovaným zkušebním vzorkem je stanovena a naměřená napětí jsou zpracovány tak, aby z výsledků byla vyloučena zúžená nebo prasknutá oblast. Maximální napětí, kterým může být materiál zatížen je poté stanoven interpolací. Toto maximum interpolované křivky je definováno jako mez tvářitelnosti.

Meze tvářitelnosti jsou stanoveny pro několik drah napětí (různé poměry mezi ϵ_1 a ϵ_2). Stanovené dráhy napětí se pohybují od jednoosého napětí (levá strana diagramu) po dvouosé napětí (pravá strana). Soubor jednotlivých mezí tvářitelnosti v různých stavech přetvoření je vyneseno do grafu jako křivka mezní tvářitelnosti. Křivka je vyjádřena jako

funkce skutečných napětí ε_1 a ε_2 na povrchu plechu a vykreslena do diagramu, diagramu mezních přetvoření. Vedlejší skutečné napětí ε_2 je vykresleno na osu x a hlavní skutečné napětí ε_1 na osu y (viz Obr. 21) [28].



Obr. 21 Příklad šesti různých drah napětí [28]

X = vedlejší skutečné napětí ε_2

Y = hlavní skutečné napětí ε_1

F = křivka mezní tváritelnosti (FLC)

1 = jednoosé napětí $\varepsilon_2 = (r / r + 1) \varepsilon_1$

2 = střední tahové napětí

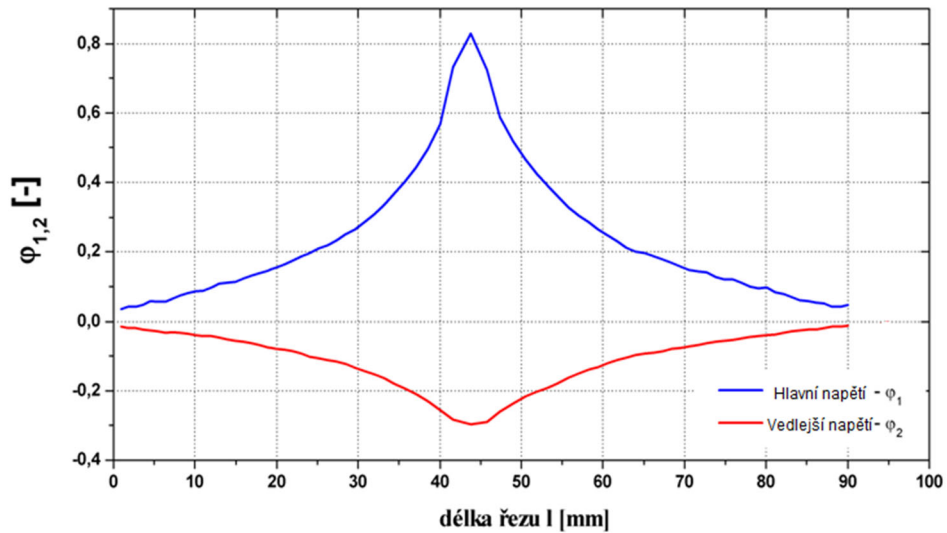
3 = rovinné napětí

4 = přechodný napěťový stav

5 = přechodný napěťový stav

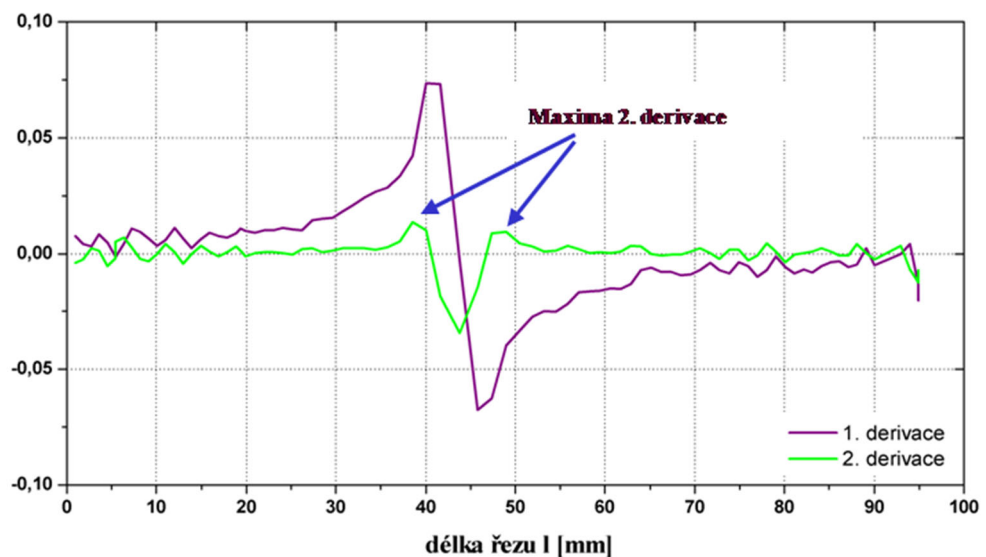
6 = dvojosé napětí $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$

Problematika zkušebních vzorků a vybavení je již popsána v kapitole 2.2.2. Z důvodu nestabilního tváření za mezí pevnosti je třeba zajistit ponížení KMP v DMP o hodnotu předpokládané lokalizované deformace ve směru tloušťky. V následujících řádcích bude krátce popsán postup pro získání hlavní deformace φ_1 . Průběh naměření hlavní deformace φ_1 je zobrazen na obrázku Obr. 22.



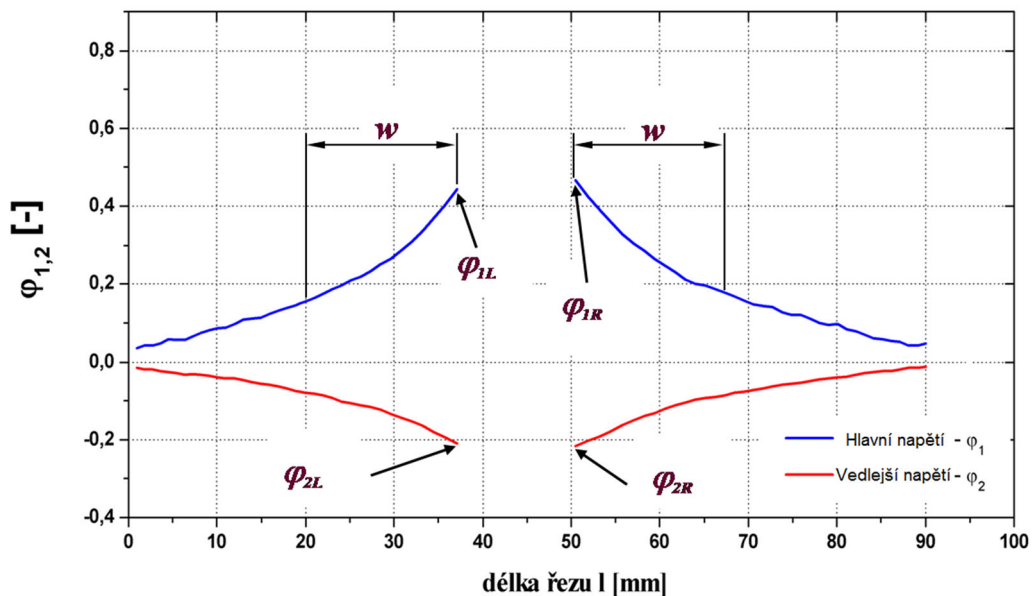
Obr. 22 Průběh deformací φ_1 a φ_2 zobrazených v programu Origin Pro 9 [36]

V prvním kroku je zapotřebí získat lokální maxima, čehož se docílí pomocí první a druhé derivace původní křivky (viz. Obr. 22). Na obrázku Obr. 23 je zobrazena první a druhá derivace původní křivky. Tímto jsou nalezeny lokální maxima, dále je možné podle nich oříznout původní křivku.



Obr. 23 Průběh první (fialově) a druhé derivace (zeleně) [36]

Podle získaných lokálních maxim, bude tedy původní křivka oříznuta, výsledek po oříznutí je zobrazen na obrázku Obr. 24.



Obr. 24 Oříznutí podle lokálních maxim druhé derivace

Dále je zapotřebí provést výpočet bodů, které budou použity v konečném kroku k proložení inverzní parabolou. Jedná se o oříznutí křivky z vnějších stran. Výpočet byl proveden dle následujících vztahů (10), (11) a (12),

$$\varphi_{1m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{1l} + \varphi_{1r}) \quad (10)$$

kde: φ_{1l} – je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_1 ,
 φ_{1r} – je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_1 ,

$$\varphi_{2m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{2l} + \varphi_{2r}) \quad (11)$$

kde: φ_{2l} – je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_2 ,
 φ_{2r} – je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_2 ,

$$w = 10 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{2m}}{\varphi_{1m}}\right) \quad (12)$$

kde: w – počet bodů

φ_{1m} – je průměrná hodnota krajních bodů φ_1 ,

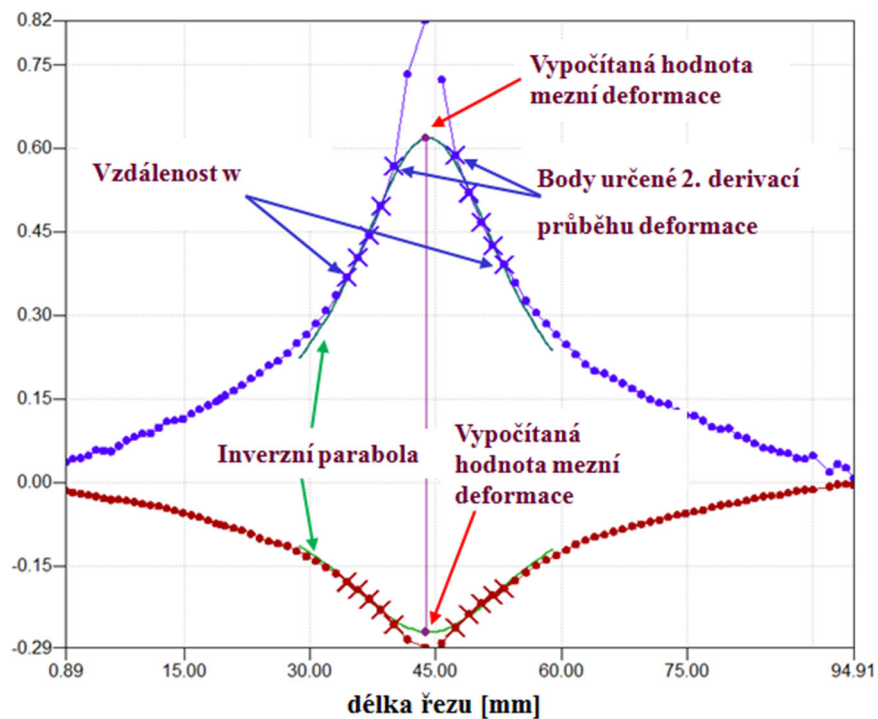
φ_{2m} – je průměrná hodnota krajních bodů φ_2 .

Na obrázku Obr. 25 je zobrazeno proložení bodů inverzní parabolou, která je popsána vztahem (13),

$$y = \frac{1}{A \cdot x^2 + B \cdot x + C} \quad (13)$$

kde: A, B, C jsou parametry.

Po proložení těchto bodů inverzní parabolou dosáhneme výsledku v podobě určení maxima inverzní paraboly. Provedením stejného postupu i pro φ_2 je získána dvojice hodnot $[\varphi_1, \varphi_2]$, které lze následně vynést do výsledného DMP. Diagram je uváděn v závislosti φ_1 na φ_2 . Graf na obrázku Obr. 25 zobrazuje porovnání křivky naměřené hlavní deformace φ_1 s křivkou inverzní paraboly, která byla získána podle výše popsaného postupu. Z grafu je možné vidět, že původní naměřená hodnota hlavní deformace (fialově) byla ponížena na křivku v podobě inverzní paraboly (zeleně) [28].



Obr. 25 Vypočítané body proložené parabolou

2.3 Materiály v automobilovém průmyslu

V současné době jsou ke stavbě karoserií používány vedle ocelových materiálů, čím dál ve větší míře také slitiny hliníku. Dalším trendem posledních let je zvyšující se využití hořčíkových slitin. Aby byla zachována konkurenceschopnost ocelových materiálů je nutné vyvíjet ocele nové, které budou lehčí, pevnější a lépe zpracovatelné [31].

Z důvodu stále vyšších požadavků na snižování spotřeby pohonných hmot a snižování výfukových plynů a jejich dopadu na životní prostředí je snahou v automobilovém průmyslu snižovat hmotnost karoserie. Naproti tomu se ale klade velký důraz na zvýšení aktivní i pasivní bezpečnosti pasažérů, zvyšování bezpečnosti chodců, snižování výrobních nákladů, použití levnějších materiálů a v neposlední řadě snadná recyklovatelnost. Z těchto požadavků vyplývá, že je potřeba používat materiály, které disponují vysokými mechanickými vlastnostmi, ale zároveň mají i dostatečně vysokou tažnost vzhledem k tvarově složitým dílům. Jelikož jsou tyto vlastnosti protichůdné, je vývoj plechů orientován tak, aby bylo dosaženo výhodného poměru mezi pevností a tažností. Dále bude uveden stručný přehled ocelí používaných na stavbu karoserií [31].

a) Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

- CQ (CommercialQuality) – plechy běžné kvality
- DQ (DrawingQuality) – tažné plechy
- DDQ (DeepDrawingQuality) – hlubokotažné plechy
- EDDQ (Extra DeepDrawingQuality) – zvlášť hlubokotažné plechy
- EDDQ – S (Extra DeepDrawingQuality – S) – super hlubokotažné plechy

b) Refosforizované a mikrolegované oceli

c) Plechy z IF ocelí bez intersticií

d) Plechy z IF ocelí s BH efektem

e) Plechy z vysokopevnostních ocelí

- Plechy z DP ocelí (DualPhaseSteels – dvoufázové oceli)
- Plechy s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP oceli)
- Plechy z TWIP ocelí (TwinningInduced Plasticity)
- Plechy z CP ocelí (ComplexPhaseSteels – vícefázové oceli)
- Mikrolegované oceli (HighStrengthlowAlloySteels)

- UHSS – B – Vysokopevné borové oceli (Ultra HighStrength – BoronSteels) [31]

2.3.1 Oceli používané pro hluboké tažení

Hlavní parametry podle, kterých můžeme charakterizovat hlubokotažné oceli jsou nízké mechanické vlastnosti a vysoká schopnost plastického přetvoření. Tyto materiály se vyznačují zejména vysokou hodnotou tažnosti, a proto jsou využívány pro tvarově složité díly karoserie. Tvářitelnost hlubokotažných materiálů může být zejména ovlivněna chemickým složením, texturou materiálu a také jeho strukturou. Základními prvky struktury u hlubokotažných materiálů jsou cementit a ferit. Mezi další parametry, které výrazně ovlivňují vlastnosti ocelí můžeme zařadit velikost a tvar feritického zrna. U cementitu a jiných vměstků se jedná o tvar a jejich rozložení. Abychom dosáhli dobré tvářitelnosti, naším cílem je, aby cementit měl tvar globulí a byl rozložen pravidelně. Povrch výtažků ovlivňuje velikost feritických zrn [32, 33].

2.3.2 IF oceli bez intersticií

Tento druh ocelí je uplatňován hlavně v automobilovém průmyslu při stavbě karoserie, a to především na tvarově složité díly. Vyznačují se velmi dobrou tvářitelností, mez kluzu má nízkou hodnotu a je nevýrazná, jejich mez pevnosti je také poměrně nízká ($R_{p0,2}$ do 200 MPa; R_m do 300 MPa). Dalšími charakteristickými vlastnostmi těchto ocelí jsou vysoká tažnost (nad 42%), střední koeficient normálové anizotropie $r > 1,7$ [-] a velký exponent deformačního zpevnění $n > 0,25$ [-], kterými je dána dobrá tvářitelnost. Oceli se vyznačují velmi nízkým obsahem intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku v tuhé fázi. Hlavními legujícími prvky jsou Al, Ti, a Nb nebo jejich kombinace, tyto prvky na sebe vážou uhlík a dusík, čímž vznikají nitridy a karbidy. Obsah volného uhlíku a dusíku je udáván v ppm (přibližný výskyt je 10 atomů C, N v 1 000 000 atomů Fe). Oceli odolávají deformačnímu stárnutí, což umožňuje jejich aplikaci při žárovém zinkování nebo vypalování laku [32].

2.3.3 IF oceli vykazující BH efekt

Jedná se o oceli, které se liší od klasických IF ocelí vyšší mezí kluzu a to díky tzv. BH (Bake Hardening) efektu. Používají se také v automobilovém průmyslu, převážně však na výrobu vnějších pohledových dílů, které jsou během tažení vystaveny malé plastické

deformaci. Z důvodu nízké meze kluzu u klasických IF ocelí, což je jejich nevýhoda, byly vyvinuty IF ocele vykazující BH efekt. Jedná se o jev, ke kterému dochází při lakování vlivem zvýšené teploty a spočívá v navýšení meze kluzu při teplotě vypalování laku karoserie. BH efekt vzniká zablokováním dislokací intersticiálními atomy uhlíku a dusíku. Aby bylo dosaženo BH efektu musí být výlisek vystaven teplotě okolo 190° na zhruba 20 minut. Velikost zpevnění se odvíjí od obsahu uhlíku, manganu a síry v oceli a také závisí na historii tváření. Nárůst meze kluzu vlivem BH efektu IF ocelí může být o 30 až 80 MPa. Z hlediska BH efektu jsou rozlišovány dva typy ocelí pro výrobu plechů:

- oceli se zvýšeným obsahem titanu popřípadě niobu
- oceli se zvýšeným obsahem uhlíku [32]

2.3.4 Mikrolegované oceli (HSLA)

HSLA (High Strength Low Alloy Steels) jsou vysokopevné nízko legované (mikrolegované) oceli, které jsou charakteristické svým specifickým chemickým složením. Obsah uhlíku u těchto ocelí se pohybuje v rozmezí od 0,05 do 0,5 %, u manganu je obsah do 2 % a to v závislosti na požadavku na tvářitelnost, obrobitelnost nebo svařitelnost. Hlavními mikrolegujícími prvky mohou být niob nebo titan. Obsah niobu se volí podle požadované úrovně pevnostních vlastností, zpravidla to bývá v rozmezí 0,02–0,05 %, v případě titanu závisí množství obsahu na aplikaci. Pokud je titan přidáván k navázání dusíku, jedná se o množství 50–200 ppm, jestliže je přidáván za účelem precipitačního zpevňování, tak v množství 200–600 ppm. Vyšší obsahy se aplikují pro modifikaci sulfidických vměstků, avšak pro tento účel je vhodnější použití zirkonia. Dále se v různých kombinacích používají mikrolegující prvky Cr, Mo, V, Cu nebo Ni v množství 0,01–0,1 %, které vytvářejí karbidy, nitridy, resp. karbonitridy, jenž jsou schopny matici nejen zpevnit, ale i zjemnit mikrostrukturu. Díky tomu se u HSLA ocelí docílí lepších mechanických vlastností (R_m 350–800 Mpa, tažnost 20–30 %), větší odolnosti proti atmosférické korozi a jejich hmotnost je o 20–30 % nižší při stejné pevnosti než u konvenční uhlíkové oceli [34].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl diplomové práce

V souladu se zadáním diplomové práce bylo testováno, zda je možné využít pro stanovení diagramu mezních přetvoření kombinaci fotogrammetrické metody analýzy deformace a nové biaxiální zařízení instalované na KSP TU v Liberci. Zkouška vypínáním polokulovým tažníkem pro stanovení mezních deformací je definována normou ISO EN 12004-2 (tzv. Nakajima). Cílem této diplomové práce bylo zjištění, zda je možné alespoň částečně nahradit tuto normalizovanou zkoušku deformačními testy vzorků s různými vruby. Při této nenormalizované zkoušce byl použit biaxiální stroj a bezkontaktní systém Mercury RT pro analýzu deformace pracující na principu fotogrammetrie. Výsledkem by tedy mělo být porovnání hodnot mezních stavů naměřených normovanou a nenormovanou metodou. Pro experiment byl použit materiál ve formě plechu s označením DX57D Z100MBO označení dle DIN EN 10346, od výrobce Voestalpine Eurostahl GmbH.

Následující přehled popisuje po sobě jdoucí kroky učiněné pro dosažení cíle diplomové práce:

- 1) Příprava zkušebních vzorků pro statickou zkoušku tahem, vzorků pro normalizovanou zkoušku vypínání pevným polokulovým tažníkem (Nakajima test) a příprava zkušebních vzorků s vruby pro zkoušku na biaxiálním zařízení.
- 2) Provedení statické zkoušky tahem za účelem získání základních materiálových charakteristik a dat o jednoosé napjatosti zkoušeného materiálu. Zkouška probíhala na trhačím zařízení v laboratoři mechanických zkoušek a tribologie.
- 3) Realizace normalizované zkoušky vypínání polokulovým tažníkem pro stanovení diagramu mezních přetvoření (Nakajima test) na dvojčinném hydraulickém lisu v laboratoři tvářecích procesů s využitím fotogrammetrické metody analýzy deformace.
- 4) Realizace nenormalizované zkoušky pro zjištění mezního stavu pomocí deformace vzorků s vruby na biaxiálním stroji v laboratoři mechanických zkoušek a tribologie s využitím fotogrammetrické metody analýzy deformace.
- 5) Vyhodnocení mezních stavů deformace získaných při normalizované zkoušce (Nakajima test) a vzorků s vruby.

- 6) Vzájemné porovnání a vyhodnocení změřených dat ze zmíněných zkoušek za účelem dosažení hlavního cíle.

3.2 Zkoumaný materiál

Do experimentální části této diplomové práce byla použita ocel DX57D Z100MBO (označení dle normy DIN EN 10346:2009-07), která může být také označena dle stejné normy číselně jako ocel 1.0853. Praktičtější je ovšem použití písemného označení, jelikož každé písmeno v označení má svůj význam, tím pádem je z tohoto označení možné zjistit spoustu vlastností daného materiálu. Význam jednotlivých písmen a další vlastnosti oceli jsou vysvětleny níže dle výše zmíněné normy DIN EN 10346:2009-07. Jedná se o válcovaný 0,7 mm tlustý ocelový plech, žárově zinkovaný, který vykazuje vysokou pevnost v oblastech tváření za studena. Charakteristické mechanické hodnoty pro tuto ocel jsou $R_{p0,2} = 120\text{--}170$ MPa, $R_m = 260\text{--}350$ MPa a minimální hodnota prodloužení $A_{80mm} = 41$ %. V tab. 1 můžeme vidět mechanické vlastnosti materiálu a v tabulce 3.2 jeho chemické složení, dle výše zmíněné normy [15].

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálu DX57D Z100MBO

	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%] min.	Plastická anizotropie r_{90} min.	Exponent deformačního zpevnění n_{90} min.
Materiálový list	120–170	260–350	41	2,1	0,22

Tab. 2 Chemické složení materiálu DX57D Z100MBO

Obsah doprovodných prvků podle hmotnosti [%]					
C	Si	Mn	P	S	Ti
0,12	0,50	0,60	0,10	0,045	0,30

Vysvětlení jednotlivých písmen v označení:

- D** = super hlubokotažný plochý ocelový produkt určený k tváření za studena
X = způsob válcování (za tepla nebo za studena) není specifikováno

57 = značí k jaké operaci je materiál určen (super hluboké tažení)

D = určeno pro žárové potahování

Z = povrchová úprava (povlakováno zinkem)

Z100 = minimální hmotnost povlaku (v tomto případě zinku). Norma uvádí dvě hodnoty, jedna pro třibodové testování a druhá pro jednobodové testování tloušťky (a hmotnosti) povlakované vrstvy. Hmotnost povlakované vrstvy není vždy rovnoměrně rozložena, ale lze předpokládat, že v každém místě má tato hmotnost alespoň 40% uvedené hodnoty pro jednobodovou zkoušku.

Pro označení Z100 platí, že:

- minimální hmotnost povlaku pro třibodovou zkoušku = 100 g/m²
- minimální hmotnost povlaku pro jednobodovou zkoušku = 85 g/m²
- teoretická tloušťka povlaku = 7 μm
- rozmezí povolené tloušťky povlaku = 5–12 μm

M = značí třídu kvality povrchu, která je dále rozdělena na podtřídy A, B a C. Tato podtřída je hned následujícím písmenem označení.

B = podtřída kvality povrchu B označuje povrch zlepšené kvality, čehož je docíleno velmi jemným válcováním (tzv. skin-pass). Kvalita povrchu typu B, již povoluje malé nedokonalosti v podobě škrábanců nebo otisků po válcování.

O = aplikované olejování povrchu jako zvýšená ochrana oceli proti korozi. Olejová vrstva, by měla být možná odstranit určeným odmašťovacím přípravkem, bez jakéhokoliv ovlivnění či poškození povrchu.

3.3 Statická zkouška tahem

Abychom zjistili základní materiálové charakteristiky, byla realizována statická zkouška tahem, specifikována dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Pro samotnou statickou zkoušku tahem byl použit trhací stroj TIRA Test 2300 s integrovaným průtahoměrem MFN-A-4-500.

3.3.1 Příprava vzorků

Aby bylo možné uskutečnit statickou tahovou zkoušku, je třeba si nejprve připravit vzorky, na kterých se tato zkouška bude realizovat. Pro tento druh zkoušky se používají buď vzorky poměrné, nebo nepoměrné. Vzorky se liší ve tvaru průřezu, kde poměrné mají

průřez kruhový a nepoměrné průřez obdélníkový. V tomto případě se jedná o nepoměrné vzorky s obdélníkovým průřezem, které se vystříhnou z pásu plechu. Nejdříve je třeba nastříhat tabule plechu na pásy, ze kterých se následně vystříhnou zkušební tyčinky. K tomu jsme použili elektrické tabulové nůžky MS2004.



Obr. 26 Tabulové nůžky MS2004

Po nastříhání plechu na pásy je třeba upnout střížný nástroj pomocí upínek na výstředníkový lis LEN-P 40 pomocí kterého nastříháme zkušební vzorky ve formě plochých tyčinek (viz Obr. 27). Zkušební vzorky je třeba odebrat v různých směrech vzhledem ke směru válcování a to v 0° , 45° a 90° . Pro každý směr bylo odebráno po pěti zkušebních vzorcích. Dále je třeba stanovit velikost počátečního průřezu vzorku pro budoucí výpočty materiálových charakteristik, čehož se docílí pomocí digitálního úchylkoměru MITUTOYO 543-561-1. Bylo naměřeno deset hodnot šířky a tloušťky, ze kterých byl dopočítán aritmetický průměr.

Rozměry zkušebního vzorku:

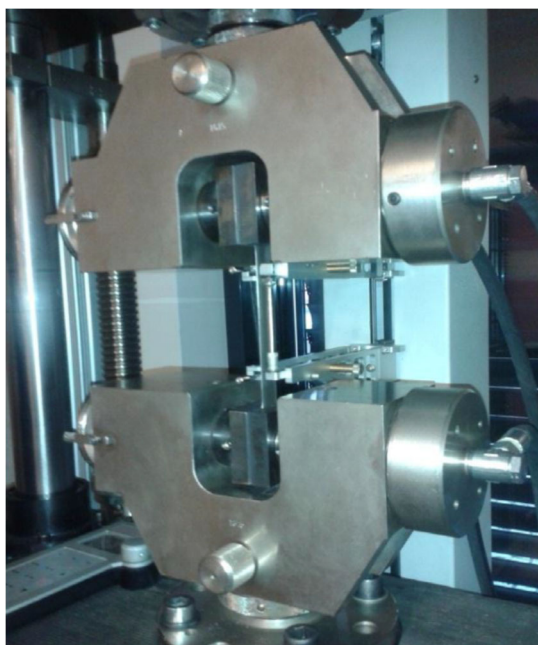
Počáteční měřená délka extenzometru:	$L_e = 80,00 \pm 0,001 \text{ mm}$
Počáteční měřená šířka tyčinky	$b_0 = 20,142 \pm 0,012 \text{ mm}$
Počáteční měřená tloušťka tyčinky	$t_0 = 0,66 \pm 0,0016 \text{ mm}$



Obr. 27 Upnutí střížného nástroje pro stříhání vzorků pro tahovou zkoušku

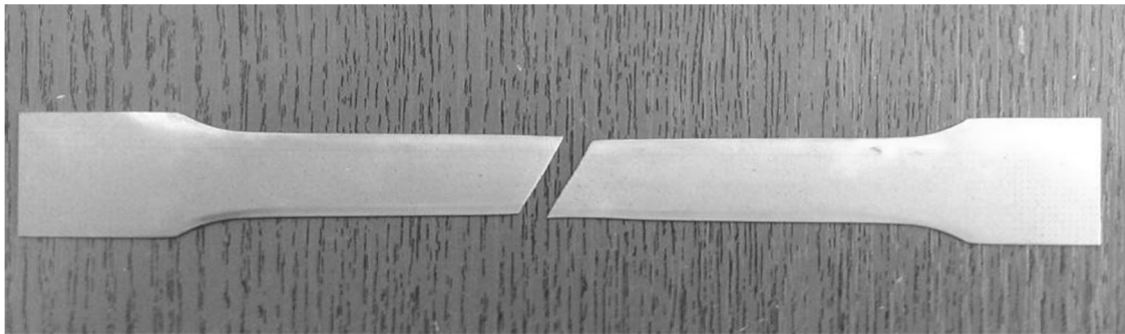
3.3.2 Vlastní měření

Zkušební tyčinky byly postupně upnuty do hydraulických ovládaných čelistí na trhacím zařízení TIRA Test 2300 (viz Obr. 28). Následně, po dosažení předpětí vzorku o velikosti 100 N, se na zkušební tyčinku automaticky přiložil průtahoměr pro snímání prodloužení vzorku. Po spuštění byl vzorek zatěžován silou F a docházelo k jejímu zaznamenávání v závislosti na prodlužování ΔL . Volba parametrů zkoušky, jako je rychlost posuvu příčnicku, byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1.



Obr. 28 Zkušební vzorek upnutý v čelistech trhacího stroje

Statická zkouška tahem byla automaticky ukončena v okamžiku dosažení nastaveného kritéria poklesu síly o 40 %. Na zkušební vzorku vznikne trvalé porušení materiálu v oblasti tzv. krčku (viz. Obr. 29).



Obr. 29 Zkušební vzorek po provedení statické zkoušky tahem

3.3.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení

Statická zkouška tahem byla vyhodnocována pomocí softwaru LabNET, který zaznamenával a vyhodnocoval průběh zkoušky. Výsledné hodnoty ze statické zkoušky tahem jsou základní mechanické vlastnosti testovaného materiálu, kterými jsou smluvní mez pevnosti v tahu R_m , smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$, tažnost A_{80mm} , homogenní tažnost A_g a Youngův modul pružnosti v tahu E , koeficient normálové anizotropie r byl zjišťován dle normy EN 10113:2020 v rozmezí hodnot deformace $\varepsilon = 12\text{--}20\%$. Aby bylo možné zjistit hodnoty koeficientu normálové anizotropie bylo třeba provést měření pro různé směry válcování (0° , 45° a 90°). Měření probíhalo na pěti zkušebních tyčkách od každého směru odebrání, tedy dohromady na patnácti vzorcích. Hodnoty, které jsme naměřili, jsou souhrnně uvedeny v tabulce 3.3 včetně střední směrové hodnoty x_s měřených veličin počítané dle vztahu (14) a výběrové směrodatné odchytky s počítané dle vztahu (16).

$$x_s = \frac{x_{0^\circ} + 2 \cdot x_{45^\circ} + x_{90^\circ}}{4} \quad (14)$$

kde: x_{0° , x_{45° , x_{90° – hodnoty veličin ve směrech 0° , 45° , 90° vůči směru válcování plechu

Výpočet střední hodnoty (15) a následně směrodatné odchytky s (16).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

kde: \bar{x} – střední hodnota výběru

x_i – dílčí hodnota i-tého prvku výběru

n – počet prvků výběru

Tab. 3 Naměřené mechanické vlastnosti materiálu DX57D Z100MBO.

Směr odebrání vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
0°	154,56	295,44	26,22	44,99
s	0,62	0,22	0,30	0,64
45°	160,1	300,42	23,9	43,79
s	0,52	0,43	0,34	0,51
90°	158,82	292,94	25,07	44,04
s	0,73	1,17	0,76	0,32
x_s	158,39	297,31	24,77	44,15

Pomocí programu ORIGIN PRO 9 byla znázorněna v pracovním diagramu závislost zatěžující síly na prodloužení zkušební vzorku. Zaznamenané hodnoty byly přepočítány na smluvní diagram pomocí vzorců (13) a (14), které jsou uvedeny níže. Na obrázku Obr. 26 je zobrazen příklad charakteristického průběhu statické zkoušky tahem pro jednotlivé směry. Výsledky jednotlivých měření pro všechny vzorky jsou uvedeny v příloze.

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (17)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{R \cdot S_0}{S} = \frac{R \cdot L}{L_0} = R \cdot \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad (18)$$

kde: R [MPa] – smluvní napětí

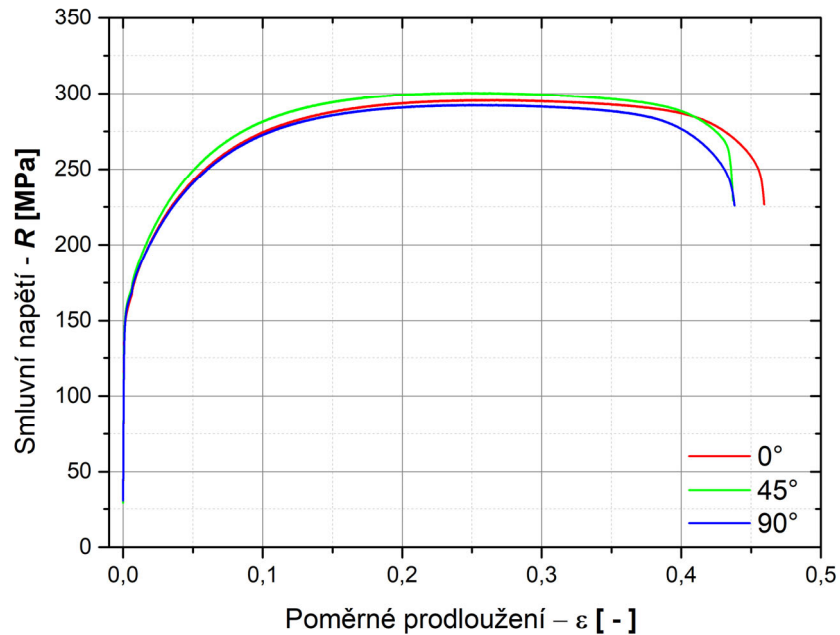
ε [-] – poměrná délka prodloužení

F [N] – síla zaznamenaná v průběhu zkoušky

S [mm²] – okamžitá plocha příčného průřezu zkušební tyče

S_0 [mm²] – počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče

L_0 [mm] – původní délka tyče před zkouškou



Obr. 30 Graf závislosti smluvního napětí a poměrného prodloužení v závislosti na směru válcování pro materiál DX57D Z100MBO

Dále byla v programu ORIGIN PRO 9 provedena aproximace tahového diagramu v souřadnicích skutečné napětí a logaritmické deformace pomocí vztahu označovaného jako Swift-Krupkowsky (viz vztah 19). Aproximace byla provedena v souladu s normou ČSN 420436, tedy v intervalu deformací $\epsilon = 10$ až 20 %.

Účelem této aproximace bylo zjištění deformačního chování materiálu, tedy získání modulu monotónního zpevnění C , exponentu deformačního zpevnění n a ofsetové deformace φ_0 . Hodnoty monotónního a deformačního zpevnění stanovují tvar aproximační křivky.

$$\sigma = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \quad (19)$$

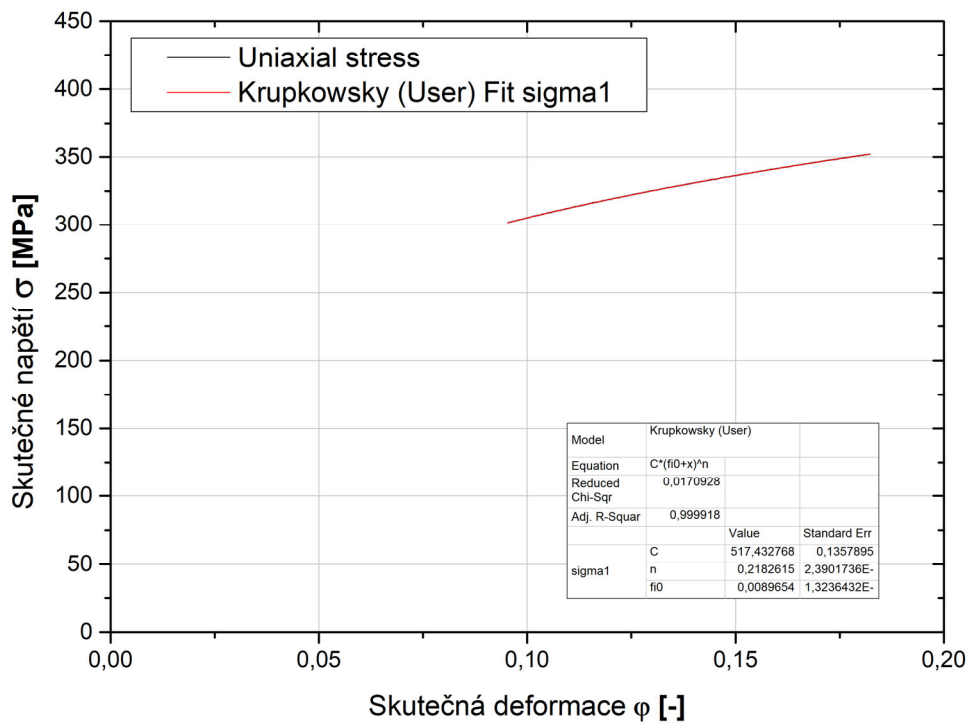
kde: σ [MPa] – skutečné napětí

C [MPa] – modul monotónního zpevnění

n [-] – exponent deformačního zpevnění

φ_0 [-] – ofsetová deformace

φ [-] – přetvoření



Obr. 31 Příklad aproximace skutečného diagramu tahové zkoušky a zjištění deformačních konstant zkušebního vzorku odebraného ve směru 0°

Tab. 4 Zjištěné hodnoty aproximačních konstant stanovených dle vztahu Swift-Krupkowsky a normy ČSN 420436.

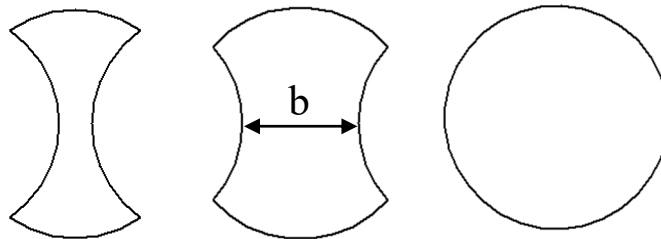
Směr odebrání vzorku	C [MPa]	n [-]	φ₀ [-]
0°	517,43	0,2183	0,0089
s	0,508	0,0036	0,0004
45°	514,19	0,2007	0,0157
s	0,495	0,0024	0,0008
90°	503,76	0,2055	0,0153
s	0,489	0,0027	0,0007
x_s	512,39	0,2063	0,0139

3.4 Zkouška vypínáním pevným polokulovým tažníkem (tzv. Nakajima test)

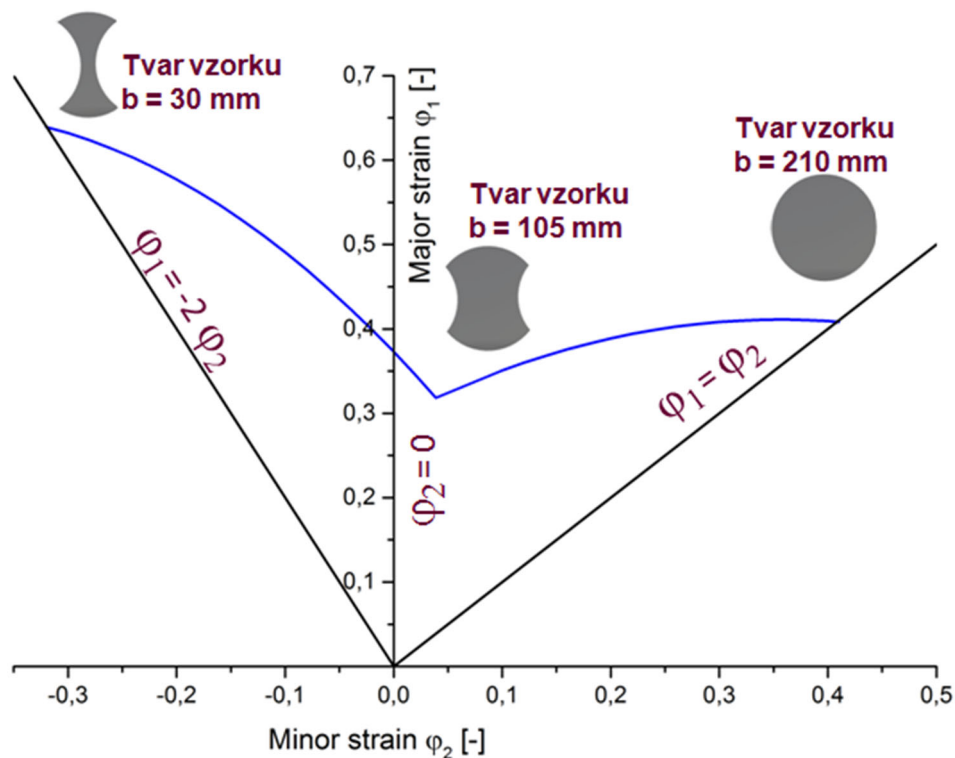
Na rozdíl od statické zkoušky tahem, kterou jsme použili ke zjištění materiálových charakteristik působením jednoosého namáhání, u vypínání pevným polokulovým tažníkem dochází ke dvouosému namáhání, čímž se více blíží k reálné průmyslové výrobě. Nakajima test byl použit pro tvorbu FLD diagramu a k jeho realizaci bylo třeba připravit sadu tvarových přístřihů. Postup přípravy zkušebních vzorků probíhal obdobně jako u přípravy zkušebních tyček pro statickou zkoušku tahem.

3.4.1 Příprava vzorků

Příprava kruhových vzorků probíhala ze začátku obdobně jako příprava zkušebních tyček pro statickou zkoušku tahem. Nejprve bylo potřeba nastříhat pásy plechu pomocí tabulových nůžek. Poté se nastříhaly kruhové vzorky o průměru 210 mm pomocí střížného nástroje na mechanickém lisu. Po nastříhání kruhových vzorků bylo třeba do nich vystříhnout kruhové výřezy definovaných rozměrů. Tato operace byla prováděna pomocí stejného střížného nástroje jako při stříhání kruhových vzorků. Postupně byla připravena řada vzorků s šířkou b od 30 do 210 mm tak jak je vidět na obrázku Obr. 32. Tvary vzorků určují zhruba polohu bodu mezního přetvoření v FLD, tak jak je vidět z obrázku Obr. 33.

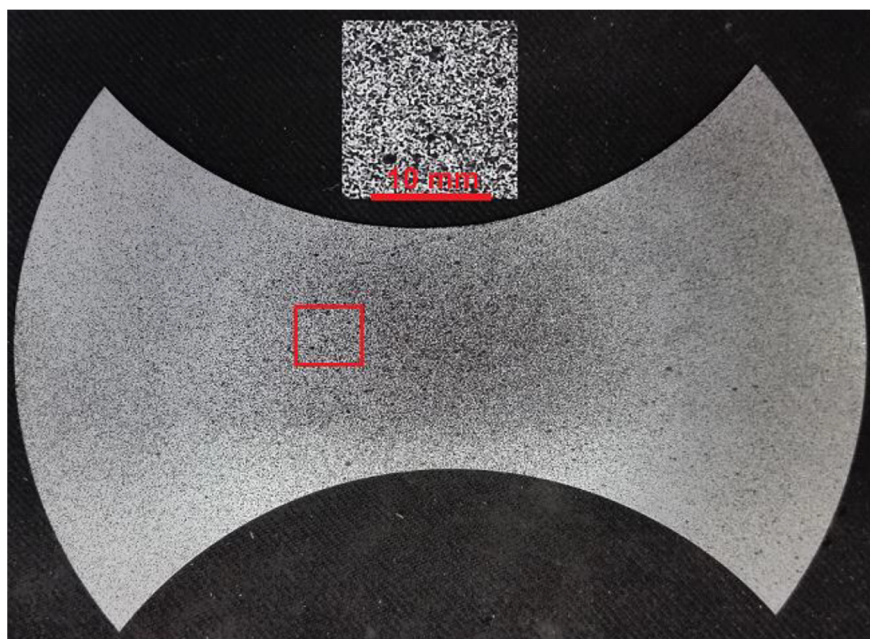


Obr. 32 Příklad zkušebních vzorků s šířkami $b = 30, 105$ a 210 mm



Obr. 33 Předpokládaná poloha mezního stavu daná tvarem vzorku [36]

Poté, co jsme měli takto vzorky připravené, následoval další krok v podobě nanesení tzv. patternu na povrch vzorků za účelem provedení bezkontaktní analýzy deformace testovaného vzorku pomocí fotogrammetrické metody. Pro tuto metodu je nutné vytvoření kontrastního patternu na povrchu vzorku (viz Obr. 34), díky kterému je následně umožněn výpočet deformace. Pro vytvoření kontrastního patternu se nejčastěji využívá metody nástřiku dvou barev (bílá a černá). Nejdříve bylo nutné nastříhané vzorky odmastit pomocí technického benzínu a v druhém kroku pomocí acetonu z důvodu odstranění nečistot a zajištění přilnavosti akrylátového spreje. Po odmaštění povrchu byl nejdříve na vzorek nastříkán bílý akrylový nástřik, tak aby pokryl celý povrch plechu v oblasti budoucí deformace materiálu. Poté následoval náhodný nástřik černé akrylové barvy, který v kombinaci s bílým podkladem vytvořil nepravidelný vzor na povrchu zkušební vzorku tzv. pattern. Takto nastříkané vzorky by měly být odzkoušeny zhruba do 5 minut, aby nedocházelo k nadměrnému vysychání barev, které by mělo za následek popraskání patternu při tváření (znehodnocení výsledků), ale aby byla zajištěna elasticita patternu.



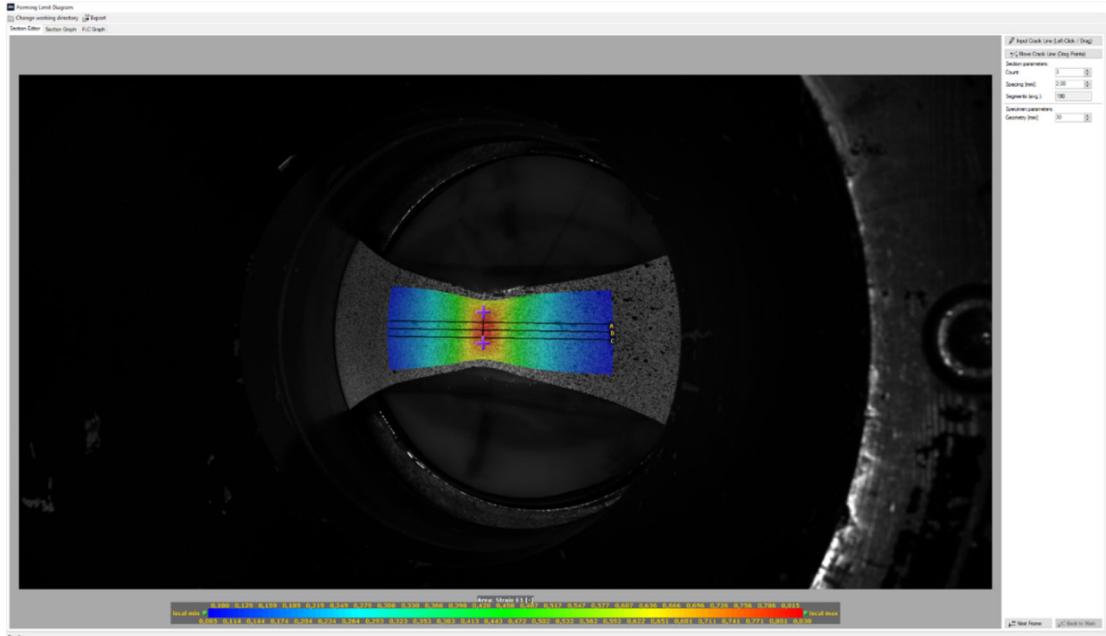
Obr. 34 Příklad vzorku s patternem pro měření FLC

3.4.2 Vlastní měření a vyhodnocení výsledků

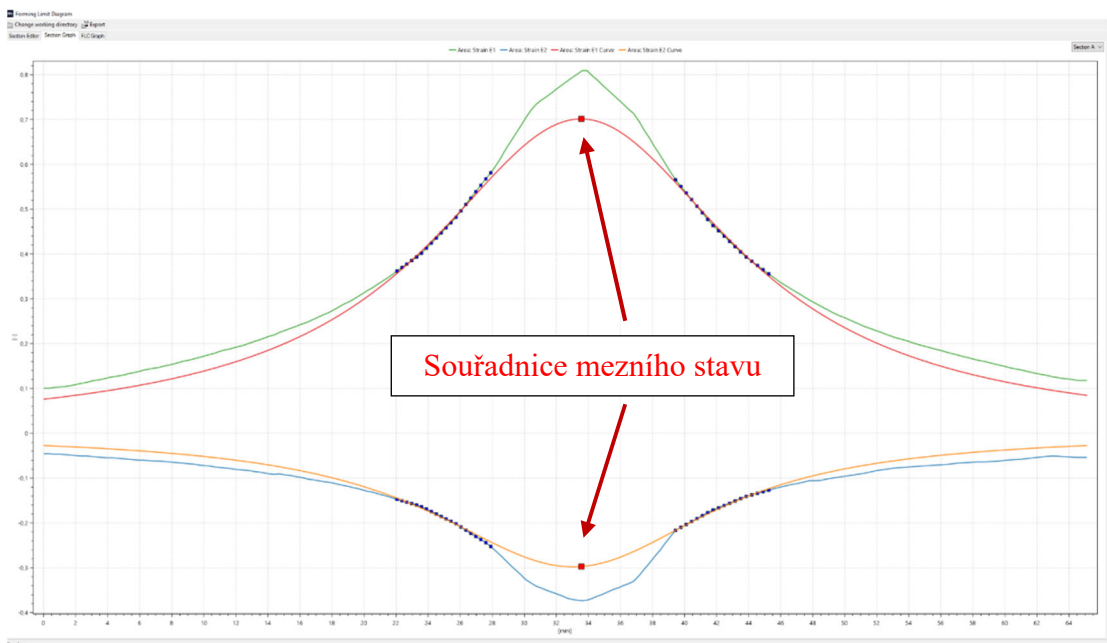
Měření bylo provedeno na dvojčinném hydraulickém lise CBA 300/63 v kombinaci s bezkontaktním optickým snímacím systémem Mercury RT. Aby bylo možné provedení testu, je nejprve třeba upnout vzorek mezi tažnici a přidržovač umístěné na pracovním stole hydraulického lisu. Z důvodu snížení tření mezi nástrojem a zkušebním vzorkem bylo na mezi tažník a testovaný vzorek nanášeno mazivo. Po upnutí zkušebního vzorku do nástroje byly současně spuštěny hydraulický lis a systém Mercury RT, který pomocí kamerového systému snímá povrch vzorku a vytvářel snímky během deformace za zvolené frekvence 12 Hz dané normou ISO/DIS 12004-2. Zkouška probíhala do doby vzniku trhliny na povrchu vzorku.

Vyhodnocení provedeného experimentu bylo uskutečněno podle normy ISO/DIS 12004-2 (viz. kapitola 2.2.5) v programu Mercury RT. K sestavení FLD bylo použito 11 deformačních stop (viz. Obr. 41). Tímto způsobem je možné měřit levou i pravou část FLD diagramu. Měření každé deformační stopy obsahovalo 5 testovaných vzorků. Pro každý vzorek byla vypočítána deformace na povrchu tvářeného vzorku a jako mezní stav byl vždy zvolen poslední snímek před vznikem trhliny, který se poté vyhodnotil. Tento stav je zobrazen na obrázku Obr. 35. Na tomto snímku je třeba udělat 3 řezy podél osy x v oblasti největší deformace, aby bylo možné vygenerovat diagram závislosti logaritmicke deformace na délce řezu. Tento diagram představuje rozložení deformace

v průběhu řezu a je zobrazen na obrázku 36. Získaný průběh deformace je dále zpracován dle normalizovaného postupu uvedeného v normě ISO/DIS 12004-2 a popsáném v kapitole 2.2.5. Takto získané souřadnice mezního stavu pro daný stav napjatosti, které jsou dále vynášeny do FLD jsou vyznačeny na obrázku Obr. 36 šipkou.

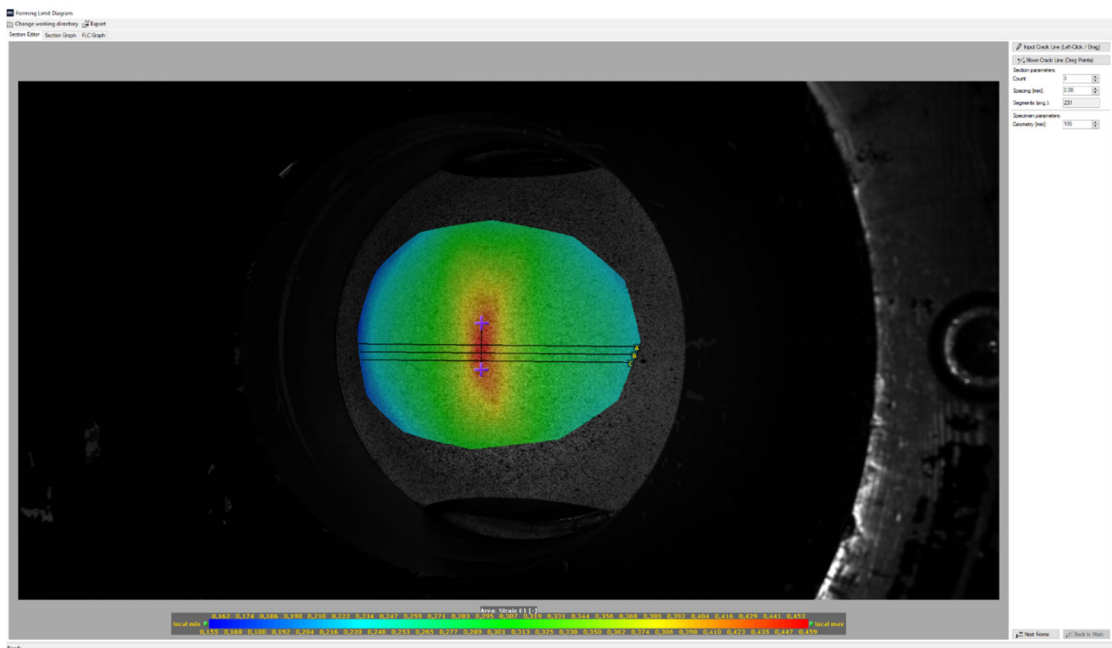


Obr. 35 Zobrazení zkušební vzorku ($b = 30$ mm) optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny

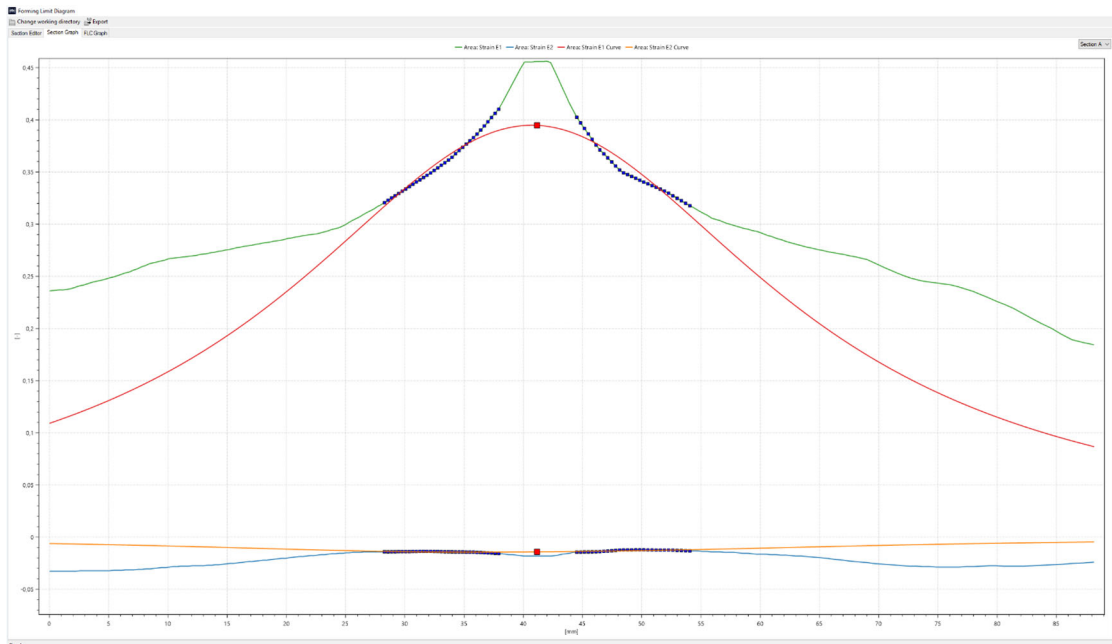


Obr. 36 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro přístřih o šířce 30 mm po provedeném výpočtu dle normy [28]

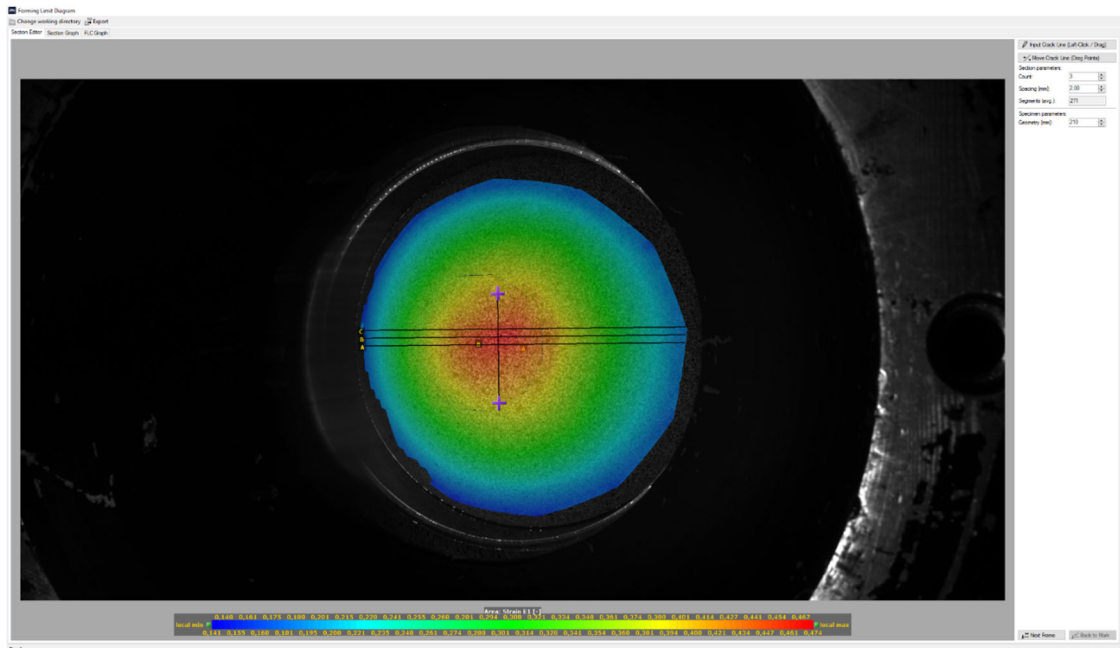
Předešlý postup se postupně opakuje pro všechny vzorky i s řezy na nich provedenými. Z naměřených hodnot mezní deformace byl následně sestaven diagram mezních přetvoření pomocí proložení křivky naměřenými body (viz Obr. 41).



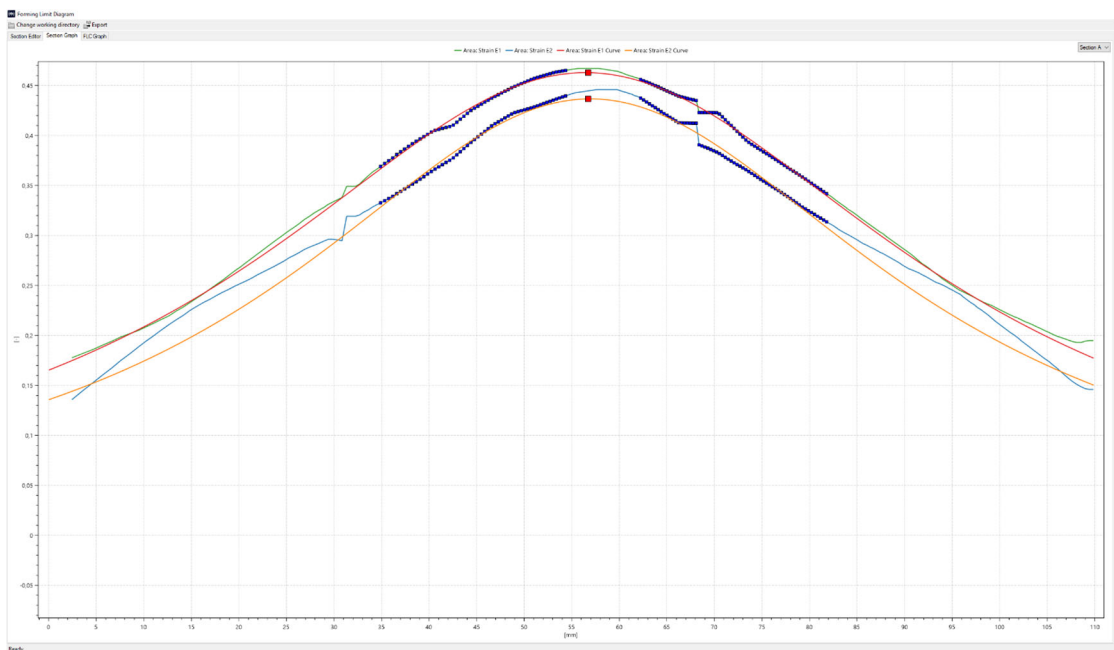
Obr. 37 Zobrazení zkušebního vzorku ($b = 105$ mm) optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



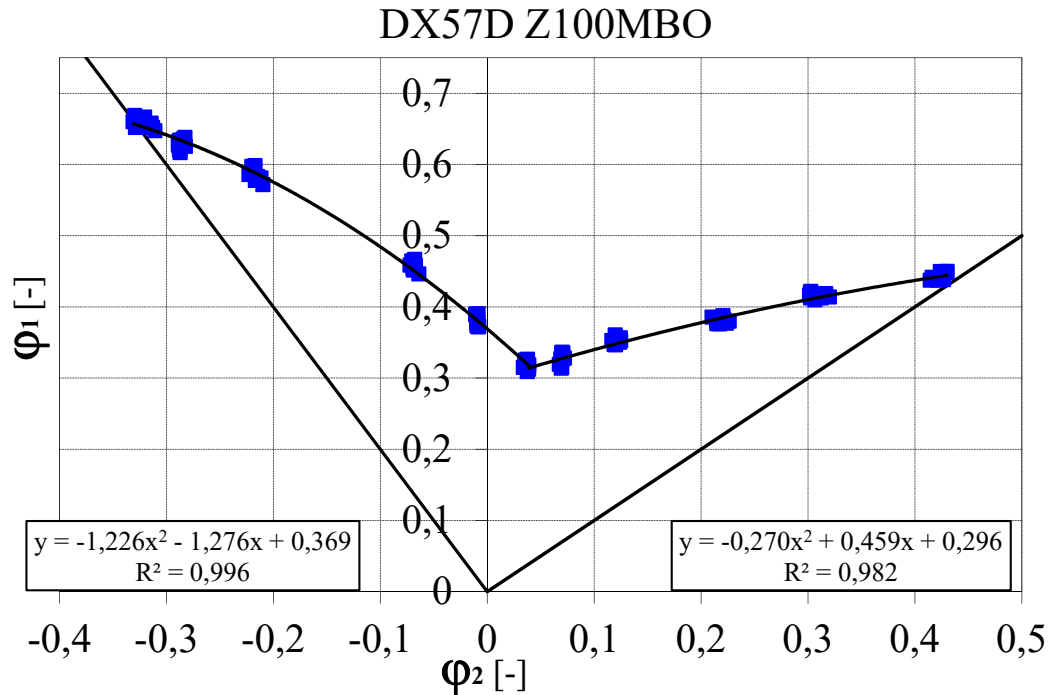
Obr. 38 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro přístřih o šířce 105 mm po provedeném výpočtu dle normy [28]



Obr. 39 Zobrazení zkušebního vzorku ($b = 210$ mm) optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



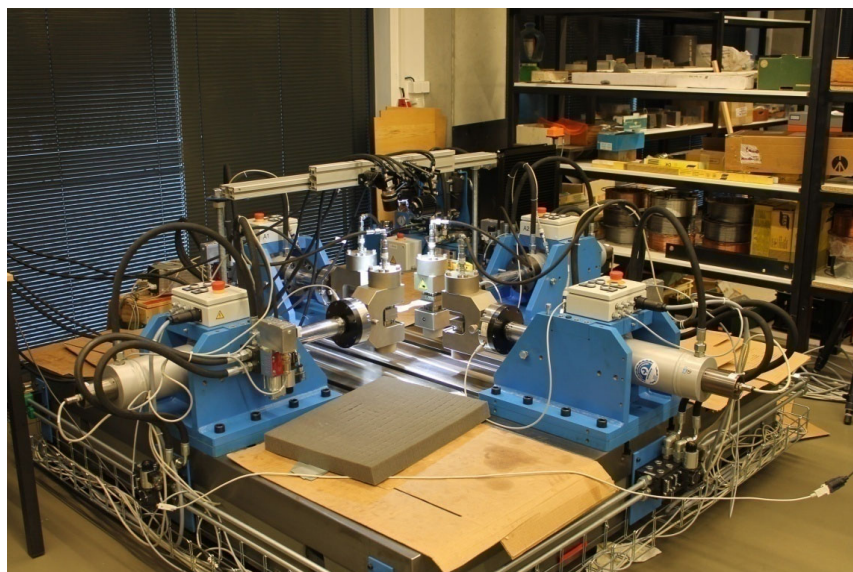
Obr. 40 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro plný přístřih ($b = 105$ mm) po provedeném výpočtu dle normy [28]



Obr. 41 Výsledný diagram mezních přetvoření zkonstruovaný pomocí výsledků Nakajima testu

3.5 Experiment pro zjištění levé části DMP

Experiment spočívá v sestavení levé části FLD diagramu pomocí zařízení pro biaxiální testy, které disponuje čtyřmi nezávisle říditelnými hydraulickými válci (viz. Obr. 42). Zařízení disponuje optickým měřicím systémem Mercury RT od firmy Sobriety s. r. o, jenž umožňuje bezkontaktní snímání deformace v průběhu procesu tváření. Hydraulické válce umístěné na masivním upínacím stole s T drážkami jsou opatřeny elektronickým řídicím systémem disponujícím možností plynulé regulace a snímání zatěžovací síly a posuvu pístnice. Válce je možné ovládat nezávisle na sobě, a to buď manuálně pomocí ovládacího panelu, nebo pomocí řídicího počítače.



Obr. 42 Zařízení pro biaxiální testování plechů

3.5.1 Příprava zkušebních vzorků

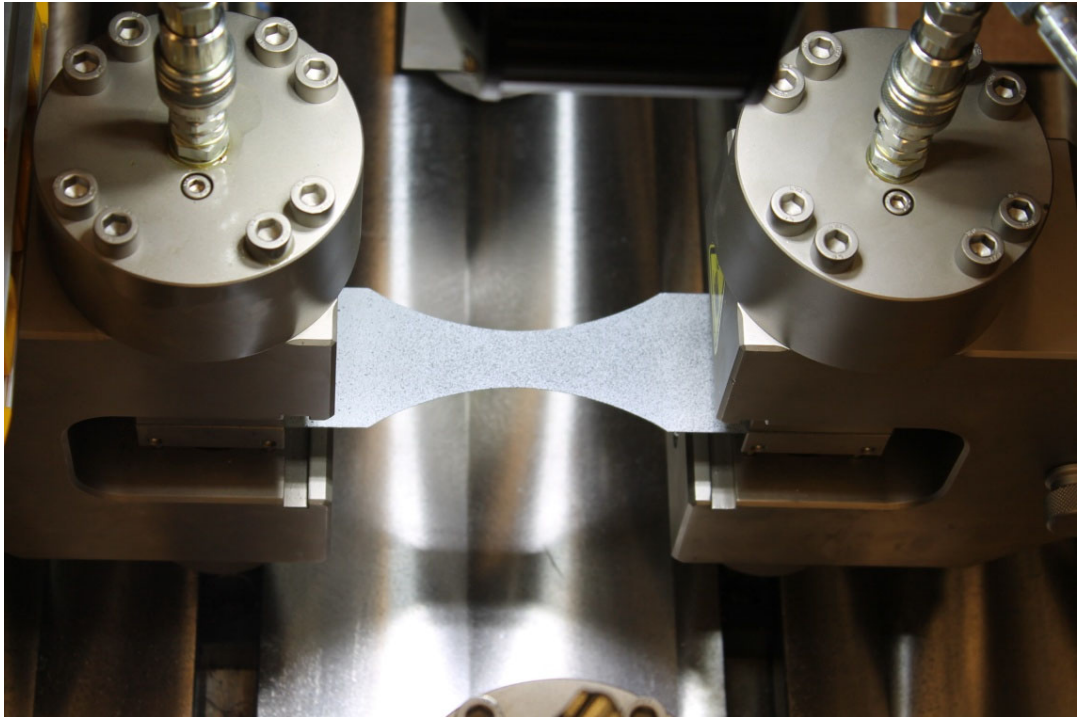
Příprava zkušebních vzorků probíhala obdobně jako při získávání vzorků pro diagram mezních přetvoření dle normy (viz. kap. 3.4.1), jediný rozdíl byl v konečném tvaru vzorků a jejich dosažení. Zkušební vzorky byly vypáleny na laseru v prostorách laboratoře tvářecích procesů na Technické Univerzitě v Liberci. V tomto případě se jednalo o pásy s vruby (viz. Obr. 43) kde největší vrub měl poloměr 100 mm a nejmenší vrub měl poloměr 7,5 mm. Šířka můstku v nejužším místě byla pro všechny vzorky 30 mm. Pro tuto metodu bylo zvoleno šest deformačních stop a pro každou z těchto stop bylo zhotoveno pět zkušebních vzorků. Na zkušební vzorky (viz. Obr. 43) byl nanesen pattern, jak je již popisováno v kapitole 3.4.1.



Obr. 43 Zkušební vzorky s vruby různých velikostí

3.5.2 Vlastní měření a vyhodnocení výsledků

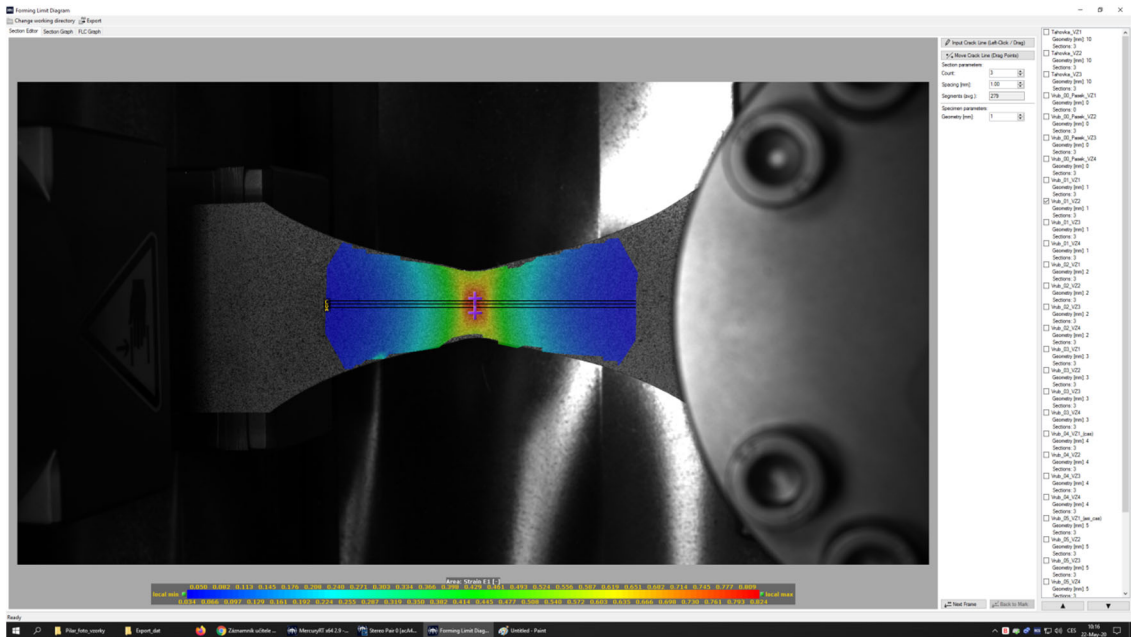
Měření bylo provedeno na zařízení pro biaxiální testy v kombinaci s bezkontaktním optickým měřicím systémem Mercury RT. Aby bylo možné provedení testu bylo nejprve třeba upnout vzorek mezi dva hydraulické válce (viz. Obr. 44). Po upnutí vzorku probíhalo měření a vyhodnocování výsledků obdobně jako v kapitole 3.4.2.



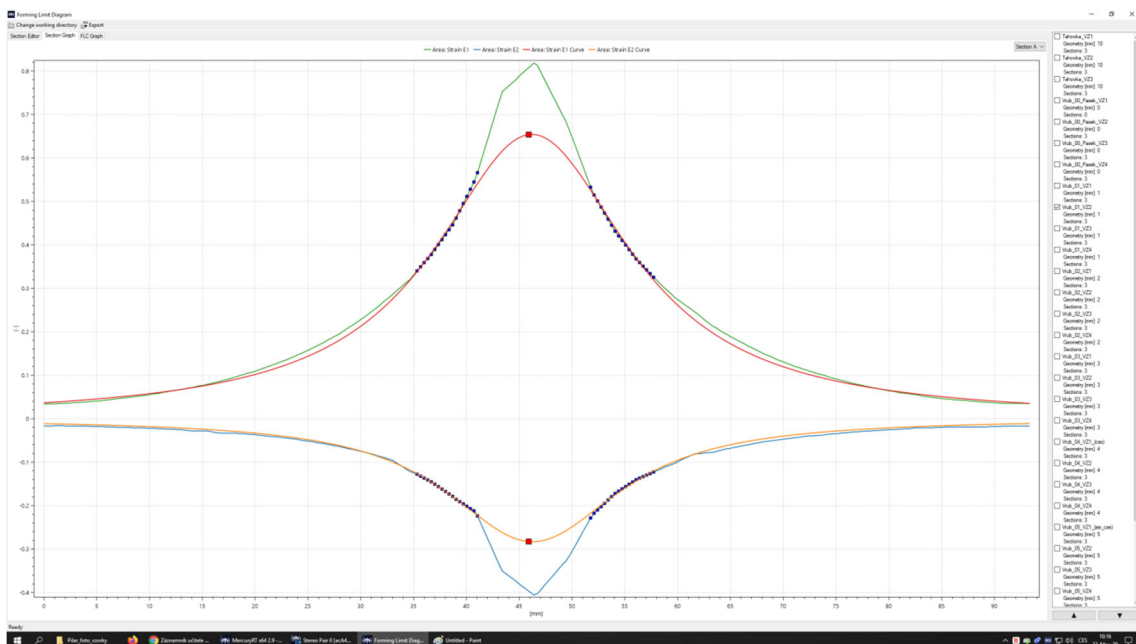
Obr. 44 Upnutí zkušební vzorku

Tab. 5. Velikosti vrubů na zkušebních vzorcích

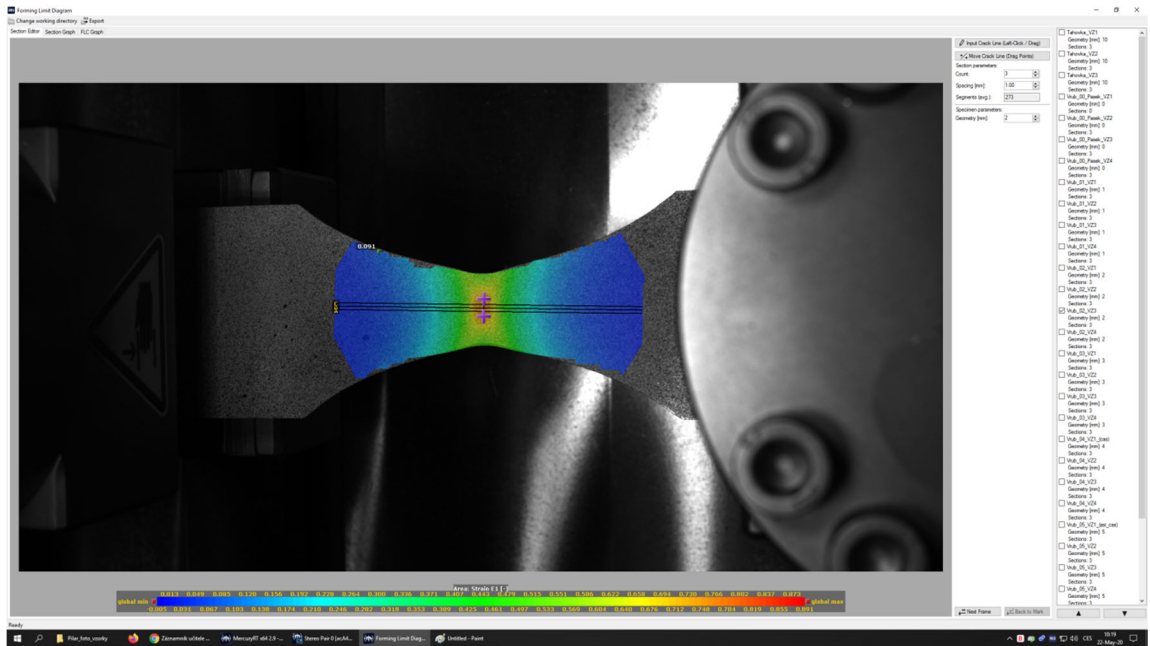
Vzorek	Poloměr vrubu
1	100 mm
2	75 mm
3	50 mm
4	25 mm
5	15 mm
6	7,5 mm



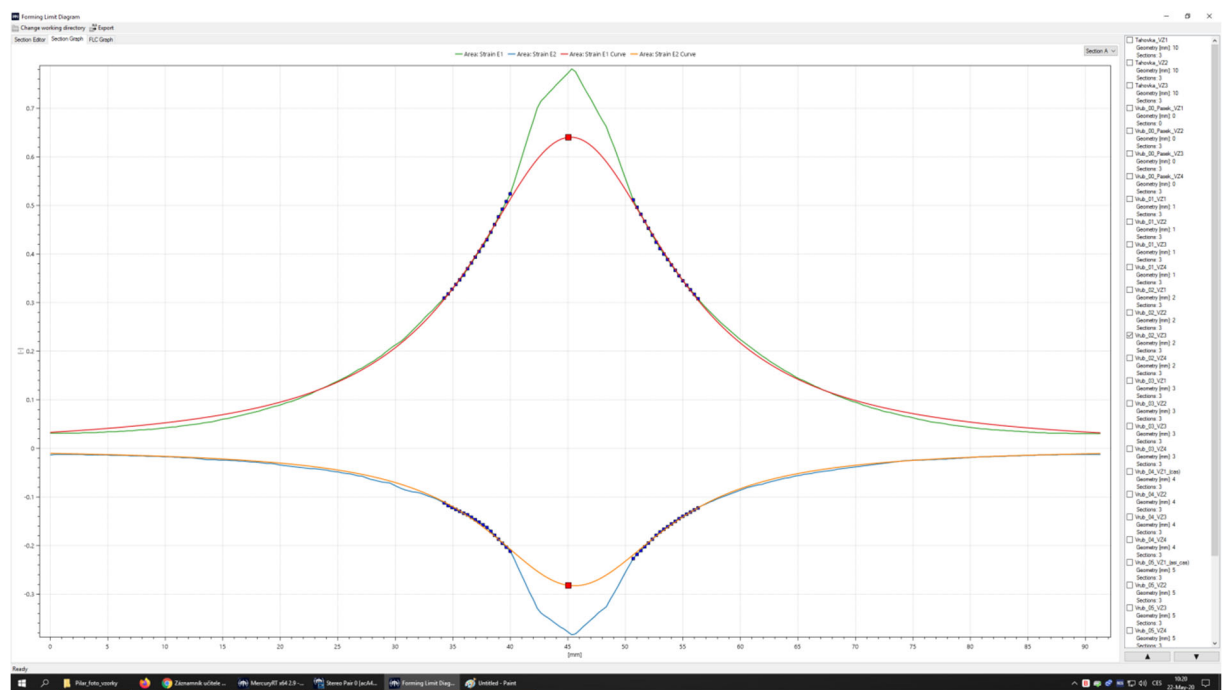
Obr. 45 Zobrazení zkušebního vrubu 01 optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



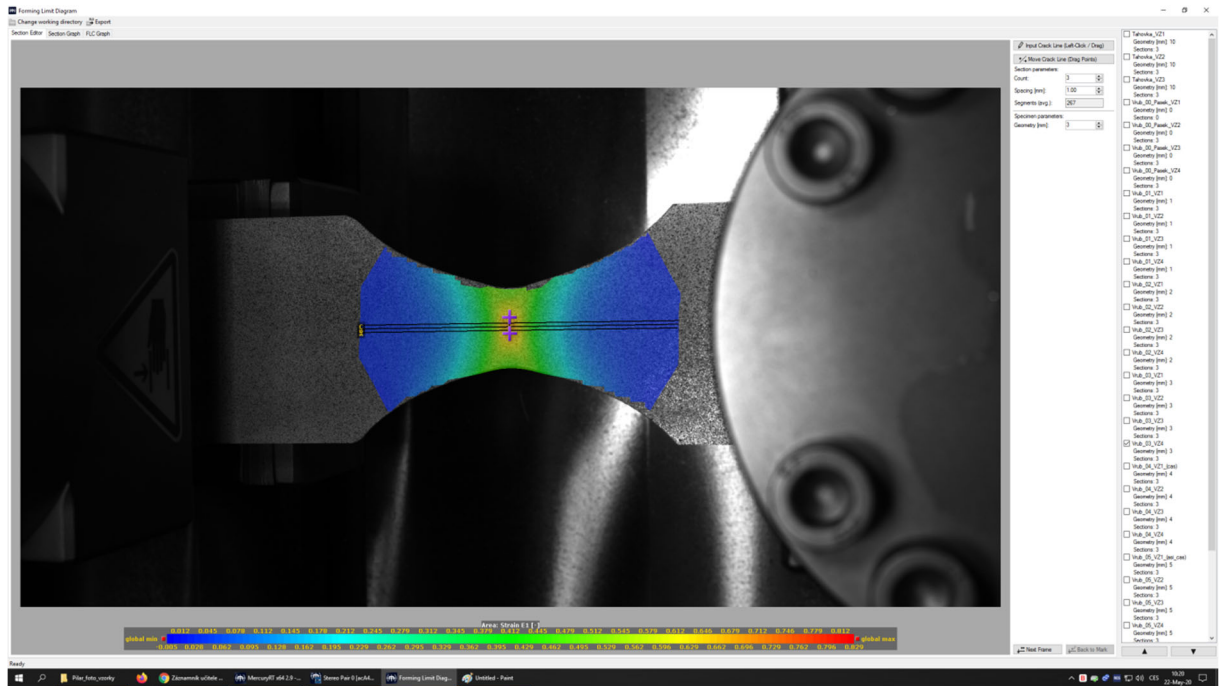
Obr. 46 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro vrub 01 po provedeném výpočtu dle normy [28]



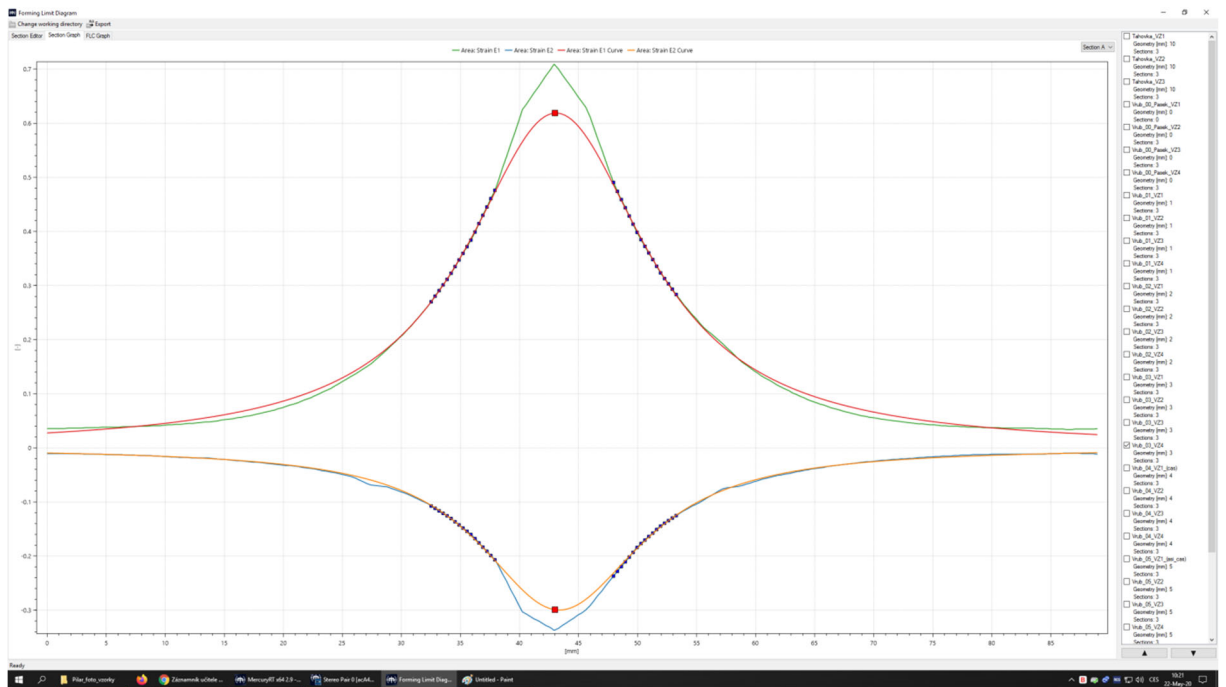
Obr. 47 Zobrazení zkušební vrubu 02 optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



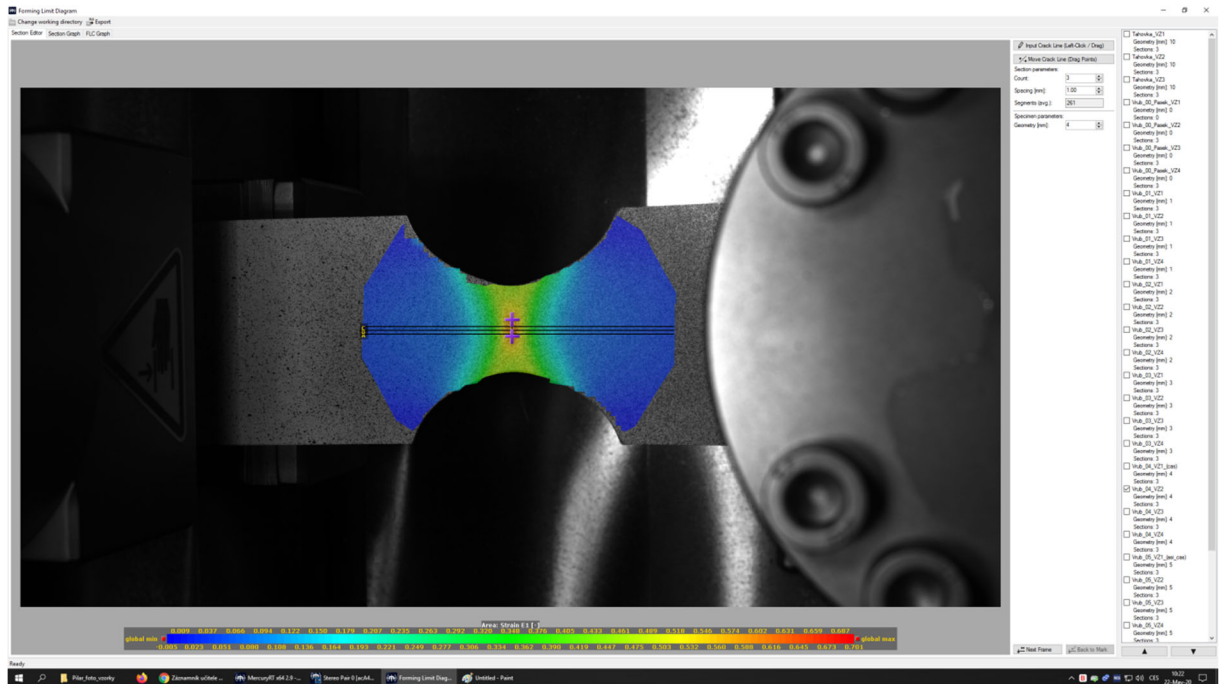
Obr. 48 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro vrub 02 po provedeném výpočtu dle normy [28]



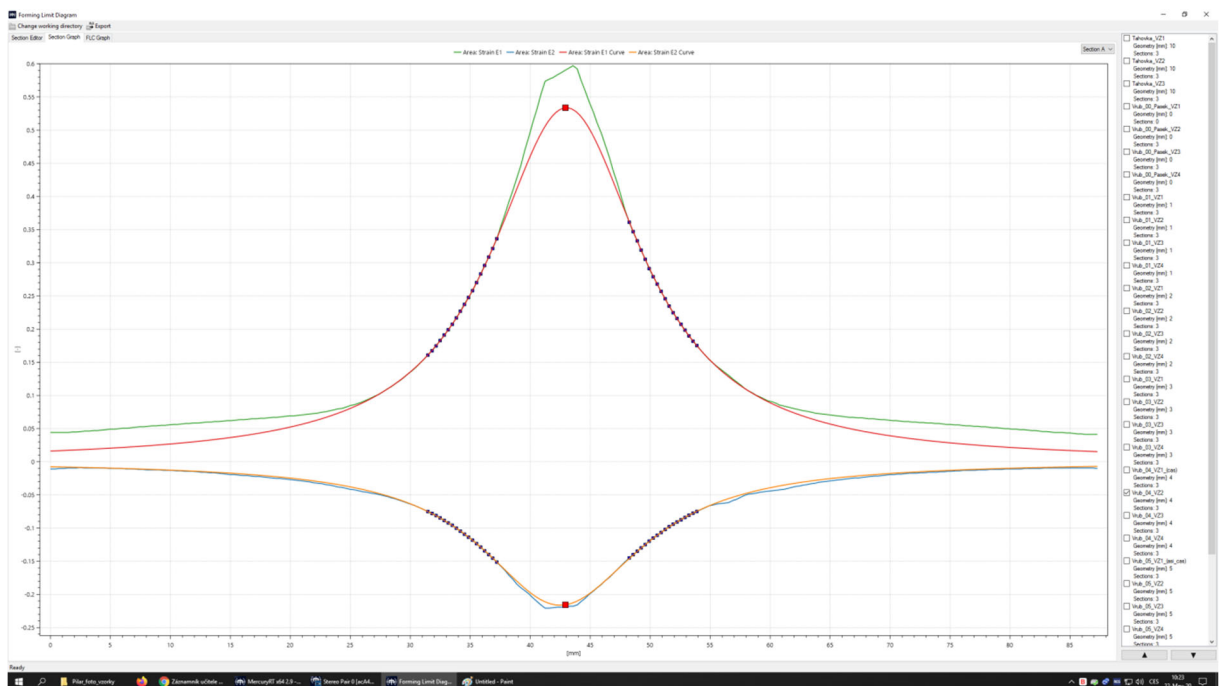
Obr. 49 Zobrazení zkušební vrubu 03 optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



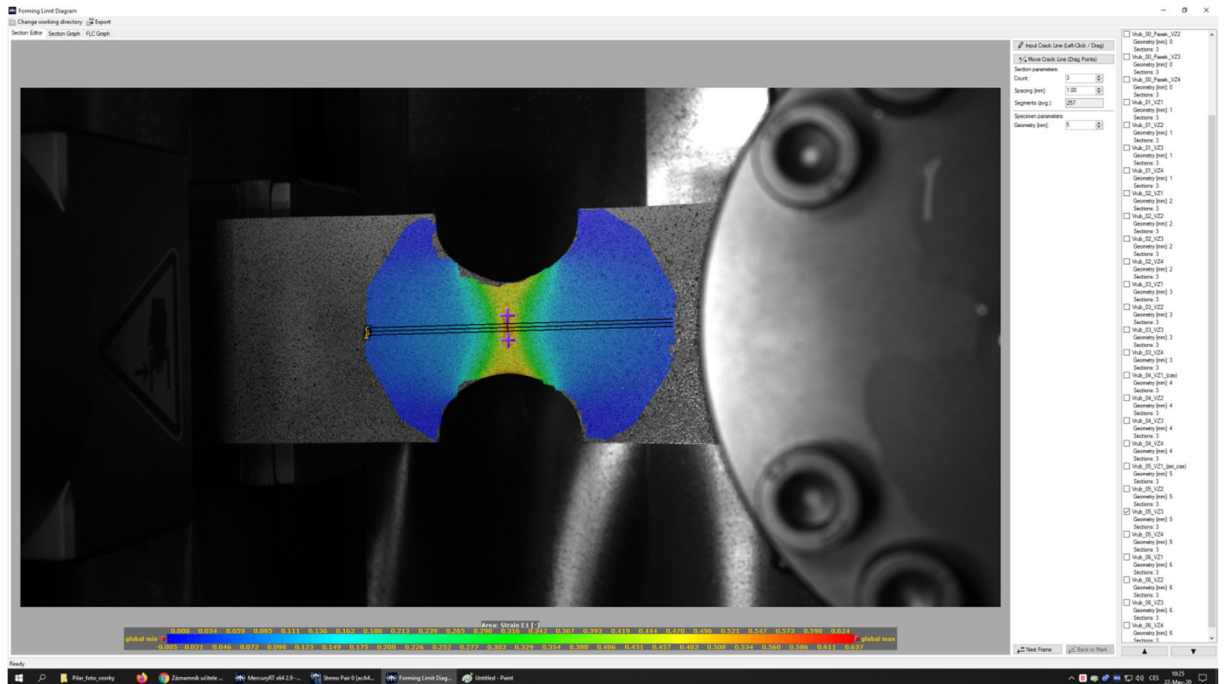
Obr. 50 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro vrub 03 po provedeném výpočtu dle normy [28]



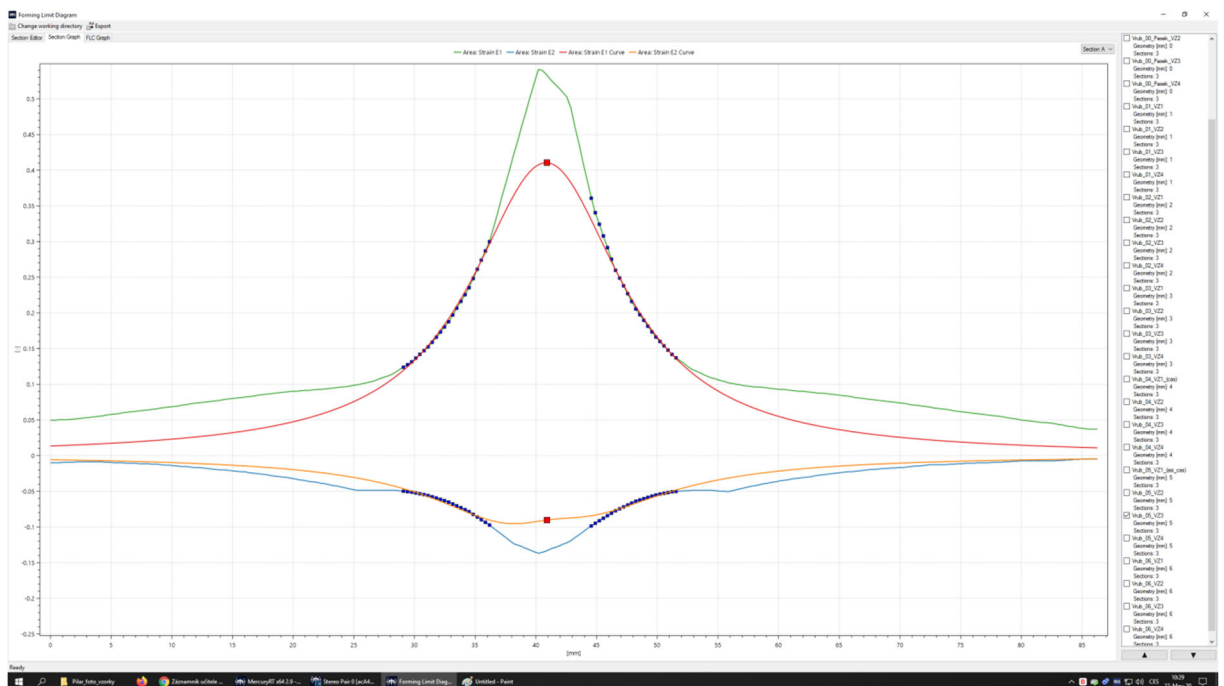
Obr. 51 Zobrazení zkušební vrubu 04 optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



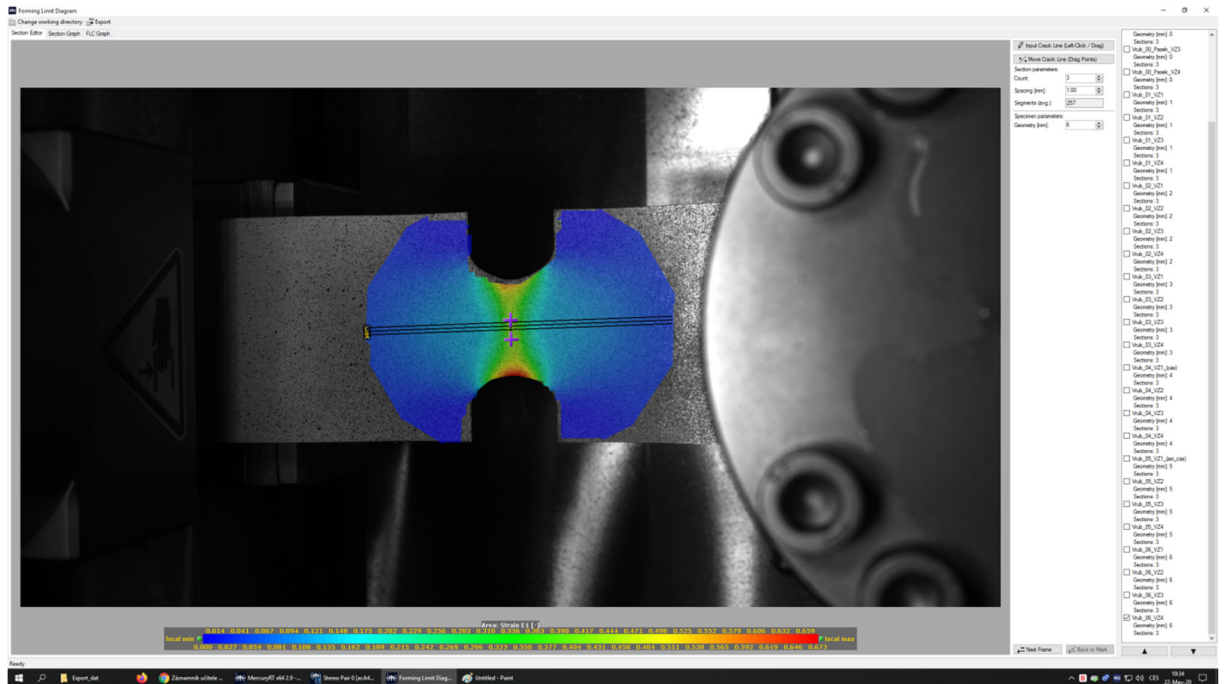
Obr. 52 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro vrub 04 po provedeném výpočtu dle normy [28]



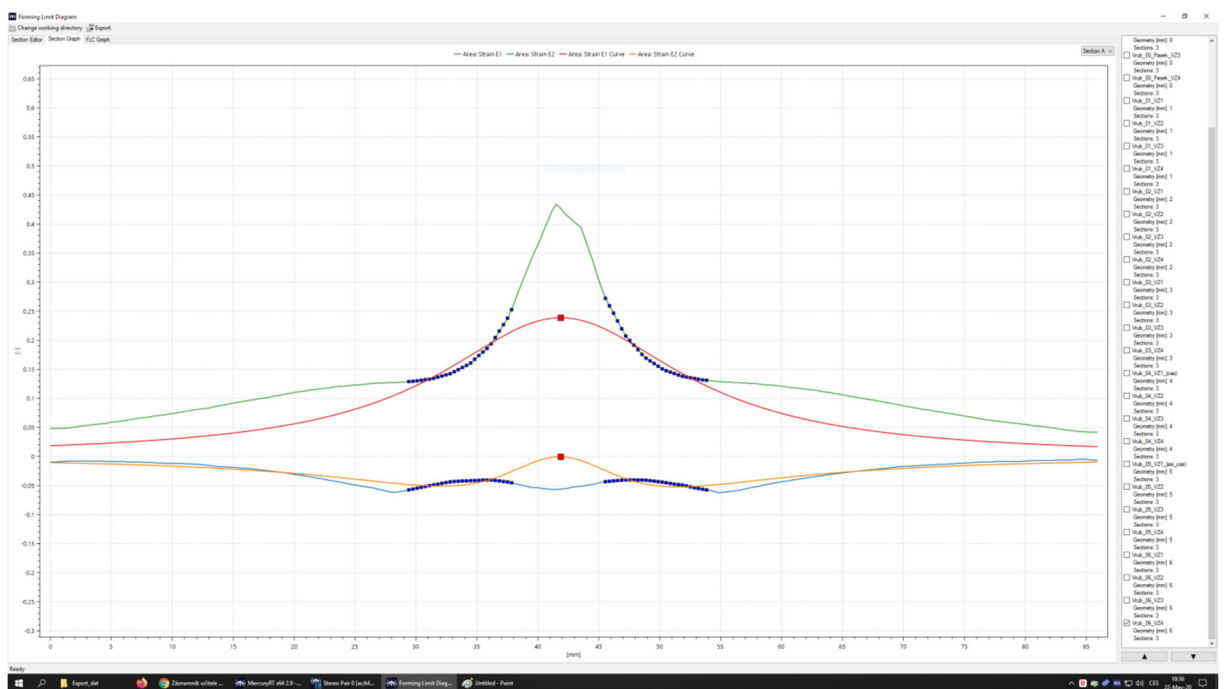
Obr. 53 Zobrazení zkušební vrubu 05 optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



Obr. 54 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro vrub 05 po provedeném výpočtu dle normy [28]

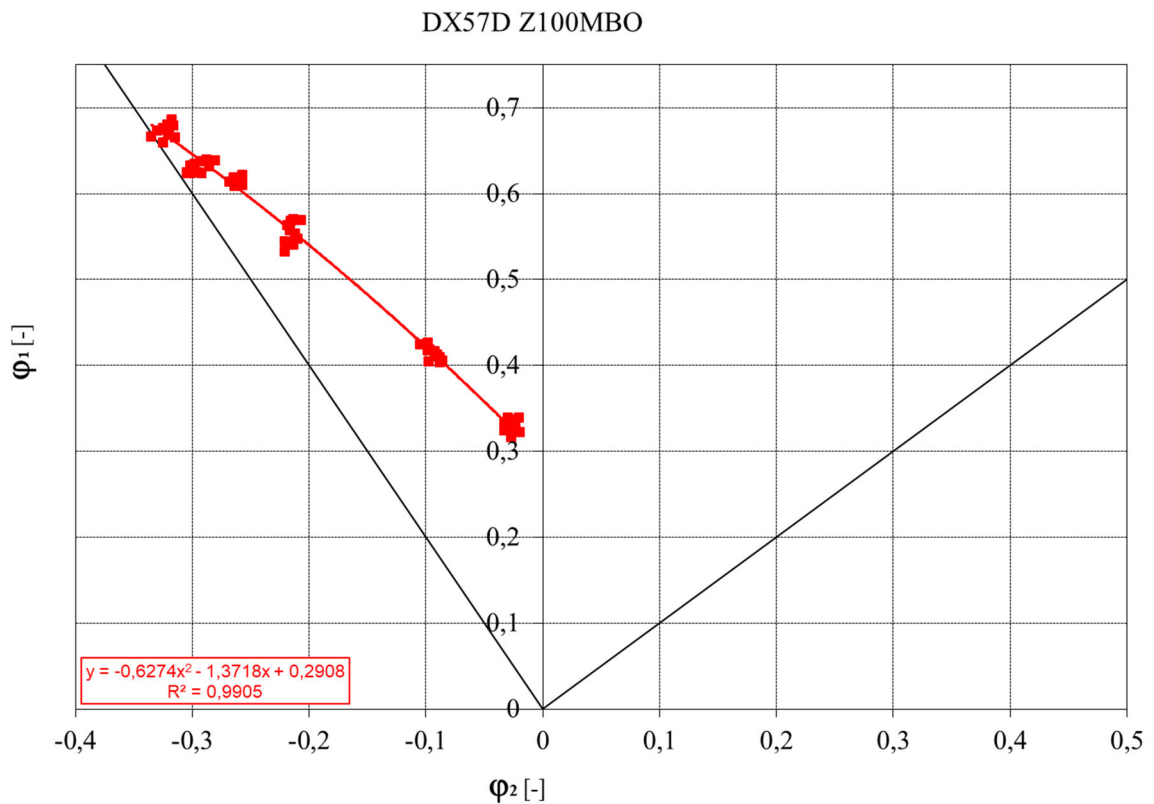


Obr. 55 Zobrazení zkušební vrubu 06 optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny



Obr. 56 Rozložení hlavní deformace φ_1 (zeleně) a vedlejší deformace φ_2 (modře) pro vrub 06 po provedeném výpočtu dle normy [28]

Naměřené a vypočítané hodnoty mezních přetvoření získané pomocí měření vzorků s vruby byly vyneseny do FLD. Výsledek měření je vidět na obrázku Obr. 57.



Obr. 57 Výsledný diagram mezních přetvoření zkonstruovaný pomocí výsledků ze vzorků s vruby

3.6 Statistické vyhodnocení experimentu

Při řešení diplomové práce byly pro určení mezního stavu deformace použity dvě metody. Cílem statistického vyhodnocení je určit, zda použité metody mají či nemají vliv na výsledek zkoušky. Pro tyto účely je možné zvolit několik statistických přístupů pro vyhodnocení naměřených dat. V předkládané diplomové práci byla zvolena metoda analýzy rozptylu (anglicky Analysis of variance - ANOVA), která umožňuje ověřit, zda na hodnotu náhodné veličiny má statisticky významný vliv hodnota některého znaku (v našem případě zvolená metoda testování). Účelem analýzy rozptylu je, na základě výsledných dat experimentu rozříděných dle určitých hledisek (faktorů), určit faktory, které ovlivňují výsledné hodnoty závislé proměnné statisticky významně (tzn. vliv těchto faktorů na výsledek je trvalý a není náhodný) a ty faktory, které mají vzhledem k závislé proměnné

pouze náhodný charakter. Pro účely statistického vyhodnocení vlivu použité metody na výsledek mezního stavu materiálu byla zvolena jednofaktorová analýza rozptylu [37].

Datové soubory naměřených hlavní φ_1 a vedlejší deformací φ_2 byly rozděleny do skupin dle testovaných faktorů, tedy do skupin podle použité metody měření mezního stavu (Nakajima test a test vzorků s vruby). Dalším krokem bylo stanovení nulové hypotézy H_0 a k ní alternativní hypotézy H_1 :

- H_0 – Vliv faktoru je statisticky nevýznamný
- H_1 – Vliv faktoru je statisticky významný

Pro přijetí nebo zamítnutí hypotézy H_0 bylo nutné pomocí F-testu, který testuje shodnost rozptylů vypočítat testovací kritérium F. Pro výpočet byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Této hodnotě pak odpovídá kritická hodnota F_{krit} . Následné porovnání hodnot F a F_{krit} stanovovalo, zda byla hypotéza H_0 přijata nebo zamítnuta. Rozhodnutí bylo provedeno na základě podmínky $F > F_{krit}$ pro zamítnutí hypotézy H_0 a přijetí hypotézy H_1 [37]. Jednofaktorový statistický test analýzy rozptylu (ANOVA) je možné jednoduchým způsobem provádět přímo v prostředí sw Microsoft Excel. Vzhledem k počtu testovaných faktorů a množství dat nebylo v rámci vyhodnocení diplomové práce nutné využívat specializovaných sw pro statistické vyhodnocení a byl použit Microsoft Excel 2010. Výsledky statistického testu pro hlavní φ_1 a vedlejší deformaci φ_2 jsou uvedeny v tabulkách tab. 6 a tab. 7.

Tab. 6. Analýza rozptylu pro hlavní deformaci φ_1

Faktor				
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Sloupec 1	119	54,00869	0,453855	0,014648
Sloupec 2	72	38,53644	0,535228	0,015648

ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F_{krit}
Mezi výběry	0,29704005	1	0,29704	19,77126	1,49E-05	3,891131
Všechny výběry	2,83950325	189	0,015024			
Celkem	3,13654331	190				

Tab. 7. Analýza rozptylu pro hlavní deformaci φ_2

Faktor				
Výběr	Počet	Součet	Průměr	Rozptyl
Sloupec 1	119	0,805722	0,006771	0,0517
Sloupec 2	72	-14,5545	-0,20215	0,011634

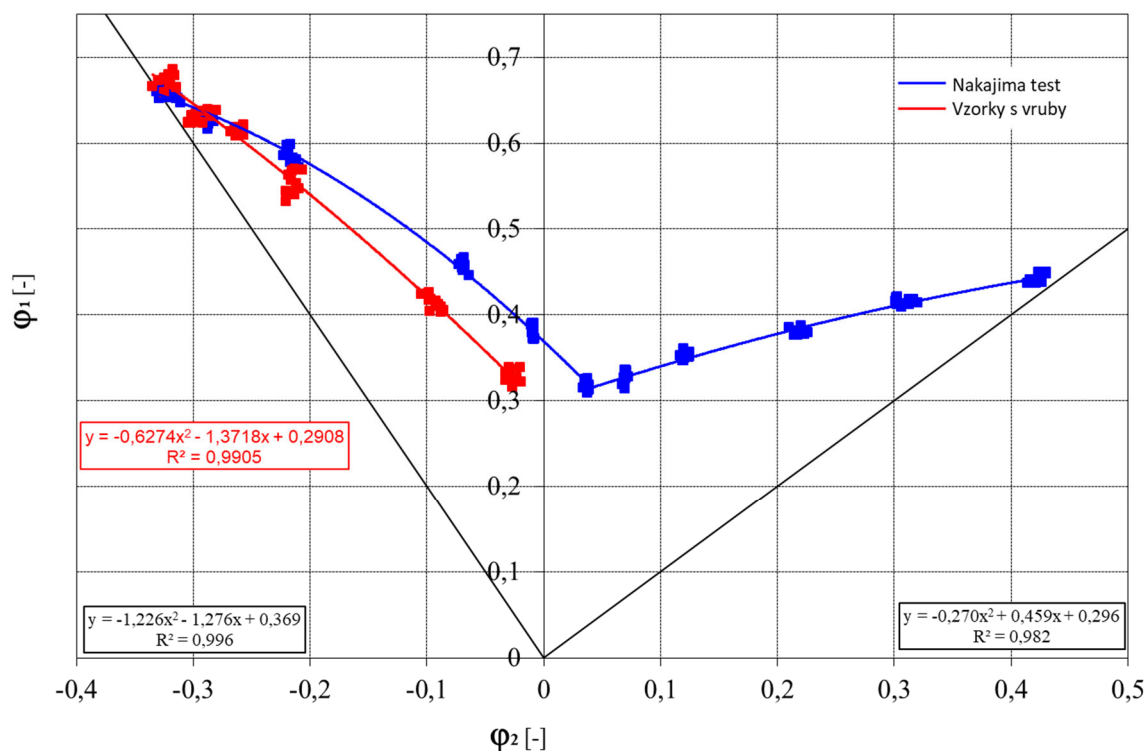
ANOVA						
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F_{krit}
Mezi výběry	1,957909	1	1,957909	53,42416	7,36E-12	3,891131
Všechny výběry	6,926545	189	0,036648			
Celkem	8,884454	190				

Z výsledků statistických testů je patrné, že v obou případech je hodnota testovacího kritéria $F > F_{krit}$, tzn. že v obou případech se zamítá nulová hypotéza H_0 a přijímá se alternativní hypotéza H_1 . Test prokázal statistickou významnost použité metody pro stanovení mezního stupně deformace u testovaného materiálu jak pro hlavní deformaci φ_1 , tak i pro vedlejší deformaci φ_2 . V tabulkách tab. 6 a tab. 7 je uvedena dále hodnota p která určuje, na jaké hladině významnosti je možné zamítnout hypotézu, že oba použité modely jsou rovnocenné. Porovnává se s předem stanoveným číslem (v našem případě 0,05) a je-li menší, rovnocennost modelů se zamítne.

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

V rámci řešení diplomové práce byly použity dvě metody zjišťování mezního stavu deformace při různých stavech napjatosti u testovaného materiálu. V prvním případě se jednalo o standardní normalizovanou zkoušku vypínání polokulovým tažníkem tvarových vzorků (Nakajima test). V druhém případě byly stavy napjatosti modelovány pomocí vzorků s vruby. V obou případech byla pro analýzu deformace použita bezkontaktní fotogrammetrická metoda s využitím systému Mercury RT. Jak je patrné ze souhrnného grafu uvedeného na obrázku Obr. 58, tvary naměřených křivek mezního přetvoření se liší u obou použitých metod měření. Pouze v oblasti jednoosého tahu jsou získané výsledky srovnatelné pro obě použité metody. Při použití vzorků s vruby dochází v okamžiku změny stavu napjatosti daného tvarem vzorku (posun deformační stopy směrem „vpravo“) k posunu křivky mezních přetvoření k nižším hodnotám. Rozdíl mezi oběma naměřenými křivkami mezních přetvoření se zvětšuje se zmenšujícím se poloměrem vrubu na testovaném vzorku (viz Obr. 43). Porovnávání jednotlivých rozdílů mezních deformací naměřených dvěma uvedenými metodami je uvedeno v tabulce tab. 8, kde je vypočítán i poměr mezi naměřenými deformacemi (za základ je vždy brána hodnota deformace z Nakajima testu).

DX57D Z100MBO



Obr. 58 Porovnání výsledků měření mezní deformace

Tab. 8 Porovnání výsledků měření

Vedlejší deformace $\varphi_2[-]$	Hlavní deformace $\varphi_1[-]$		Podíl [-]
	Nakajima test	Vzorky s vruby	Nakajima / Vruby
-0,35	0,665415	0,6940735	0,95871
-0,25	0,611375	0,579275	1,055414
-0,15	0,532815	0,387691	1,374329
0	0,369	0,1894	1,948258

Z tabulky tab. 8 je vidět, že u vzorků s vruby dochází v oblasti jednoosého namáhání mírnému nadhodnocení výsledků měření oproti Nakajima testu. Pro tento stav napjatosti je rozdíl mezi naměřenými hodnotami pouze cca 4 %. Se zmenšující se vedlejší deformací se zvětšuje rozdíl dosažených výsledků měření mezní deformace u obou použitých metod. Vzorky s vruby vykazují menší mezní deformaci φ_1 . Tento rozdíl je pro $\varphi_2 = 0$ prakticky 100 % (viz tab. 8). Fakt, že výsledky měření získané oběma metodami se liší, je možné zjistit pouhým vizuálním porovnáním obou křivek mezních přetvoření znázorněných na

obrázku Obr. 58. I přes tento fakt byla provedena statistická analýza pro potvrzení této domněnky. Jak je uvedeno v předchozí kapitole, jednofaktorová analýza rozptylu potvrdila statistickou významnost výsledků měření získaných pomocí dvou odlišných metod.

5 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla testována alternativní možnost měření mezních stavů deformace tenkých plechů na biaxiálním zařízení v laboratoři KSP. Práce vycházela z předpokladu možnosti modelování různých stavů napjatosti pomocí vzorků s vruby, tak jak je uváděno v odborné literatuře. Pro deformační analýzy byl v souladu se zadáním diplomové práce využíván systém Mercury RT pracujícím na principu bezkontaktní fotogrammetrické metody měření deformací a tvarů sledovaných objektů. Cílem prováděných experimentů bylo prokázat možnost nahrazení časově náročného Nakajima testu laboratorní zkouškou deformace vzorků s vruby. Z výsledků měření je patrné, že bezkontaktní systémy v současné době umožňují provádět velmi přesné deformační analýzy v širokém spektru rozměrů a není problém analyzovat vzorky v řádu 100 mm (vzorky pro Nakajima test), tak i vzorky s vruby, kde jsou rozměry výrazně menší (zvláště pak v oblastech vrubů). Jedná se čistě o technickou záležitost počáteční kalibrace bezkontaktního systému s širokou možností použití v technické praxi. Naměřené výsledky mezních přetvoření u testovaného materiálu DX57D Z100MBO, diskutované v předchozí kapitole, však prokázaly značnou odlišnost dosažených výsledků při použití obou zvolených metod testování. Je zcela zjevné, že Nakajima test nelze nahradit technologickou zkouškou s vruby, tak jak je někdy uváděno v odborné literatuře. U zkušebních vzorků s vruby nedochází k vyčerpání deformačního potenciálu tvářeného materiálu a ke vzniku trhliny dochází důsledkem koncentrace napětí a deformace v okolí vrubu. Nepříznivý efekt lokalizace deformace je vidět se zmenšujícím se poloměrem vrubu, což vede k výraznému poklesu křivky mezních přetvoření. Dalším omezujícím faktorem použití technologické zkoušky tváření vzorků s vruby je poloha bodů v diagramu mezních přetvoření. Vzorky s vruby neumožňují měření v pravé části FLD. Domnívám se, že pro další výzkum mezních stavů deformace tenkých plechů není vhodné využívat zkoušku tváření vzorků s vruby, a i přes větší časovou náročnost je žádoucí používat normalizovanou zkoušku vypínání polokulovým tažníkem, která daleko lépe vystihuje technologické děje vznikající při hlubokém tažení plechů.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LUHMANN, Thomas. *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-184995-057-2.
- [2] ALBERTZ, Jörg a Albrecht MEYDENBAUER. *Pioneer of photogrammetric Documentation of the cultural heritage*. Technical University of Berlin, Potsdam (Germany), 2001.
- [3] VOLEK, Aleš. 2008. *Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení pontos*. VÚT Brno, Fakulta strojního inženýrství, ústav konstruování.
- [4] BEHRING, Dirk, Jan THESING, Holger BECKER a Robert ZOBEL. *Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualization of 3D Displacements in Crash Investigations*[online]. Society of Automotive Engineers, 2001 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2a4a/c3dcd6d60648471dda7138cc48580561ab1a.pdf>
- [5] Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015, **2015**(10) [cit. 2020-04-3]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznichdeformaci.html>
- [6] *GOM* [online].2020 [cit. 2020-04-4]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>
- [7] PICKERD, Vanessa. *Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events*[online]. Maritime Division Defence Science and Technology Organisation, 40 [cit. 2020-04-4]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a594163.pdf>
- [8] *GOM* [online].2020 [cit. 2020-04-4]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-3d-camera.html>
- [9] PETRUŽELKA, Jiří.: *Tvařitelnost kovových materiálů*. VŠB, Ostrava 2009.
- [10] *ARGUS* [online]. 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/argus-opticky-system-pro-analyzu-procesu-tvareni/>
- [11] *GOM* [online].2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos.html>
- [12] Skenování činných ploch tažného nástroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013, **2013**(1) [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/skenovani-cinnych-ploch-tazneho-nastroje.html>

- [13] *PONTOS* [online]. 2020 [cit. 2020-04-18].
Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/pontos-live/>
- [14] *GOM* [online]. 2020 [cit. 2020-04-18].
Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/pontos-live.html>
- [15] KAMAZ now with PONTOS. *KAMAZ* [online]. Lyubertsy: АВТО-АЛЪЯНС, 2012, 2012 (6) [cit.2020-04-18].
Dostupné z:
http://www.kamazopt.ru/press/vesti_kamaza/2012/04/06/kamaz_teper_s_pontosom.html
- [16] Tritop V6, User Manual, Gessellschaftfüroptische Messtechnik mbH
- [17] *TRITOP* [online].2020 [cit. 2020-04-18].
Dostupné z:
<https://www.mcae.cz/cs/produkty/tritop-3d-opticke-souradnicove-merici-zarizeni/>
- [18] *Capture 3D Products TRITOP* [online]. 2009 [cit. 2020-04-18].
Dostupné z:
<https://www.capture3d.com/3d-metrology-solutions/3d-software/tritop-professional>
- [19] SOBOTKA, J. *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů*. Disertační práce. Liberec: TU v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-441-2.
- [20] MARCINIAK, Z. *Teorie tváření plechů*. SNTL, Praha, 1964.
- [21] BOČEK, J. *Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů*. Disertační práce. Liberec: TU v Liberci, 2008.
- [22] HILL, R *Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford at the Clarendon Press, 1986.
- [23] CAHN, R. W., HAASEN P. *Physical Metallurgy*. North Holland: Elsevier Ltd. 1996. ISBN 978-0-444-89875-3
- [24] KROUPA, F. Studium vlastností pevných látek. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie. vol. 8 1963. [online]. [vid. 1963].
Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/138284>
- [25] LEJČEK, P. NOVÁK, P. *Fyzika kovů*. Studijní materiál pro předmět „Fyzika kovů”. Praha: VŠCHT v Praze 2008.
- [26] GHOSH, A. K.: *A Criterion for Ductile Fracture in Sheet under Biaxial Loading*. Metallurg. Trans A, April, 1976.
- [27] SUNDERKÖTTER, CH. *Vergleichendeumformtechnische Charakterisierung von Blechwerkstoffen unter mehrachsiger Beanspruchung*, Disertační práce. Hannover: Univerzita Hannover 2007. ISBN 978-3-939026-59-4.

- [28] ISO/DIS 12004-2 Metallic materials - Sheet and strip — Determination of forming limit curves — Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory
- [29] MARCINIAK, Z.–KUCZINSKI, K. *Limit Strains in the Process of Stretchforming Sheet Metal*. Int. J.Mech.Sci., Vol.9, 1967
- [30] *BFT International* [online].2020 [cit. 2020-04-18].
Dostupné z: https://www.bft-international.com/en/artikel/bft_3D_measurement_systems_from_the_measuring_point_to_the_BIM_model_3454389.html
- [31] Technická univerzita v Košicích. *TWIP oceli* [online]. 2015 [cit. 2020-05-17].
Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/157-159.pdf>.
- [32] JANOVEC, J. *Perspektivní materiály*. 3 vydání Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [33] DVOŘÁK M., GAJDOŠ F.: *Technologie tváření plošné a objemové tváření*, vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9
- [34] GIRMAN, Vladimír a Valentina HRABČÁKOVÁ. 2012. *Kovové materiály automobilových konstrukcí: II.- Karoséria a karosárske plechy* [online]. Košice [cit.2015-05-15]. ISSN 1337-8953.
Dostupné z:
<http://www.materialing.com/sites/default/files/Kovov%C3%A9%20materi%C3%A1ly%20automobilov%C3%BDch%20kon%C5%A1trukcii%20II%20-%20Karos%C3%A9ria%20a%20karos%C3%A1rske%20plechy.pdf>
- [35] DIN EN 10346:2009-07 *KontinuierlichschmelztauchveredelteFlacherzeugnisse aus Stahl – Technische Lieferbedingungen*. Berlín: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2009, 41 s. Třídící znak: 51256
- [36] SOLFRONK, Pavel. *Diagram mezních přetvoření*. Technická univerzita v Liberci.
- [37] ŠTÍPKOVÁ, Michaela. *Vliv doby stárnutí na mech vlastnosti slitiny AW 2024*. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.

Přílohy

Příloha č.1 – Statická zkouška tahem - směr odebrání vzorku 0°

Příloha č.2 – Statická zkouška tahem - směr odebrání vzorku 45°

Příloha č.3 – Statická zkouška tahem - směr odebrání vzorku 90°

Příloha č. 1

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

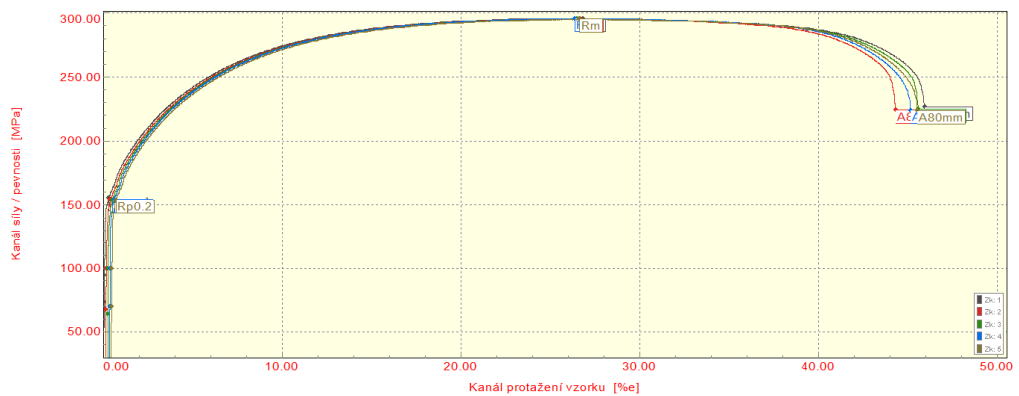
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DX57D Z100MBO (Voest Alpine)
Rozměry vzorku : [0,7 x20] mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Petr Pilař
Datum provedení testu : 12.11. 2019
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	155.64	295.69	26.66	45.82
2	154.64	295.43	26.37	44.08
3	154.26	295.52	26.13	45.26
4	154.31	295.52	25.88	44.74
5	153.96	295.11	26.05	45.03

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	154.56	295.45	26.22	44.99
Směrodatná odchylka	0.65	0.21	0.30	0.64
Minimální hodnota	153.96	295.11	25.88	44.08
Maximální hodnota	155.64	295.69	26.66	45.82



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

Příloha č. 2

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

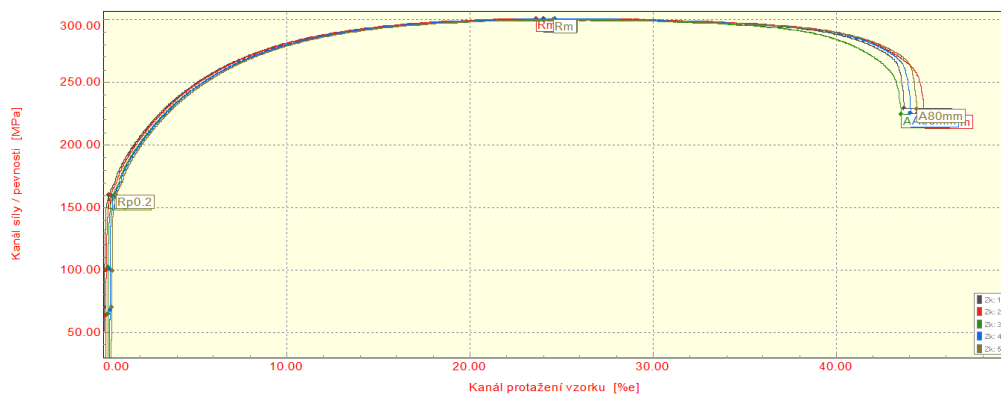
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DX57D Z100MBO (Voest Alpine)
Rozměry vzorku : [0,7 x20] mm
Směr odebrání vzorku : 45°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Petr Pilař
Datum provedení testu : 12.11. 2019
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	160.50	300.59	23.82	43.59
2	160.29	300.88	23.36	44.60
3	159.21	299.84	24.20	43.22
4	160.08	300.59	24.15	43.66
5	160.36	300.17	23.97	43.87

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	160.09	300.41	23.90	43.79
Směrodatná odchylka	0.51	0.41	0.34	0.51
Minimální hodnota	159.21	299.84	23.36	43.22
Maximální hodnota	160.50	300.88	24.20	44.60



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

Příloha č. 3

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

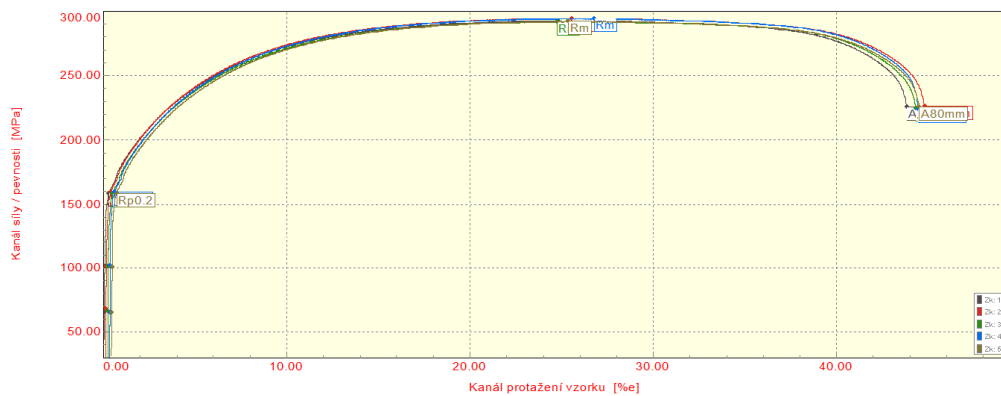
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DX57D Z100MBO (Voest Alpine)
Rozměry vzorku : [0,7 x20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Petr Pilař
Datum provedení testu : 12.11. 2019
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	158.46	292.40	24.64	43.69
2	159.67	294.27	25.28	44.56
3	158.17	291.86	24.35	43.98
4	159.50	294.15	26.30	44.02
5	158.24	292.00	24.80	43.96

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	158.81	292.94	25.07	44.04
Směrodatná odchylka	0.72	1.18	0.76	0.32
Minimální hodnota	158.17	291.86	24.35	43.69
Maximální hodnota	159.67	294.27	26.30	44.56



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