



Relaxace napětí materiálu při provádění zkoušky hydrostatickým vypínáním

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. David Mizera

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Relaxace napětí materiálu při provádění zkoušky hydrostatickým vypínáním

Jméno a příjmení: Bc. David Mizera
Osobní číslo: S18000228
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Mechanické zkoušky pro testování kovových materiálů (zkoušky normalizované a zkoušky technologické)
2. Základní principy metody konečných prvků a bezkontaktní analýzy deformace pomocí fotogrammetrie
3. Experimentální zjištění relaxace napětí pro zvolený testovaný materiál při zkoušce hydrostatickým vypínáním
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat
5. 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] ASM HANDBOOK. *Volume 14 – Forming and Forging*. 6th ed. Materials Park: ASM International, 2004. s. 978. ISBN 0-87170-020-4.
- [2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] TSCHAETSCH, H. *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [6] KANÓCZ, A., ŠPANIEL, M. *Metoda konečných prvků v mechanice poddajných těles*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. s. 128. ISBN 978-8-001-03590-0.
- [7] LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.
- [8] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.

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.

29. května 2020

Bc. David Mizera

Poděkování

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení při experimentálním měření, za poskytnutí mnoho rad, podkladů k vypracování této práce a za jeho čas, který mi věnoval. Děkuji za asistenci i doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D u mechanických zkoušek a pomoc s vyhodnocením optických metod měření. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině, bez které bych tuto práci nemohl dokončit.

Tato práce byla (částečně) podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2019-5046.

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá především tématem deformačního chování kovového materiálu při tvářecích procesech. Teoretická část této práce je zaměřena na popis základních mechanických zkoušek a technologických zkoušek tvářitelnosti plechů. Nechybí zde ani kapitola věnována fotogrammetrii, která je základním prvkem v měření pomocí dnešních bezkontaktních optických systémů. Experimentální část je soustředěna na stanovení mechanických vlastností zkoušeného materiálu pomocí statické zkoušky tahem, stanovení křivek zpevnění pro dvouosý stav napjatosti realizací bulge testu a vyšetřování relaxačního chování materiálu, které je s tím spojené. V závěru této diplomové práce jsou tyto křivky porovnávány.

Klíčová slova:

Bulge test, technologické zkoušky, tváření, fotogrammetrie, deformace, statická zkouška tahem

Annotation:

This thesis is concerned especially with topic of deformation behavior of metallic material during forming processes. Theoretical part is focused on description of basic mechanical tests and technological tests of sheet metal formability. There is also chapter dedicated to photogrammetry, which is fundamental element in contactless optical systems measuring using nowadays. Experimental part is focused on determining mechanical properties of the tested material using static tensile test, finding the strengthening curves for the biaxial state of stress by realization of bulge test, and investigating the relaxation behavior of the material, which is associated with it. At the end of this thesis, the curves are compared.

Keywords:

Bulge test, technological tests, forming, photogrammetry, deformation, static tensile test

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	9
1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Mechanické zkoušky plechů.....	13
2.1.1 Statická zkouška tahem.....	13
2.1.2 Biaxiální napěťové zkoušky	23
2.2 Technologické zkoušky tváritelnosti plechů.....	28
2.2.1 Zkouška hloubením podle Erichsena.....	28
2.2.2 Hydraulická zkouška podle Tomlena (bulge test)	30
2.2.3 Fukuiho zkouška tažením v kuželové tažnici	31
2.2.4 Schmiedtova kalíškovací zkouška	33
2.3 Fotogrammetrie.....	35
2.3.1 Historie fotogrammetrie	36
2.3.2 Princip a matematický základ fotogrammetrie	38
2.3.3 Rozdělení fotogrammetrie	41
2.3.4 Optické měřicí systémy v oblasti tváření kovů.....	43
3 Experimentální část	47
3.1 Cíl diplomové práce.....	47
3.2 Testovaný materiál	48
3.3 Statická zkouška tahem	49
3.3.1 Příprava vzorků.....	49
3.3.2 Vlastní měření.....	51
3.3.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení	52
3.4 Bulge test	56
3.4.1 Příprava vzorků.....	58
3.4.2 Příprava optického systému	59
3.4.3 Vlastní měření.....	60
3.5 Výsledky měření.....	70
3.5.1 Režim 1	70
3.5.2 Režim 2	71

3.5.3	Režim 1, 2 a statická zkouška tahem	72
3.5.4	Režim 3	74
4	Diskuse a porovnání výsledků	79
5	Závěr.....	81
6	Seznam použité literatury	83
7	Seznam příloh.....	88

Seznam zkratek a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
A	[%]	Tažnost
A_g	[%]	Homogenní tažnost
$A_{Rp0,2}$	[-]	Plošná anizotropie smluvní meze kluzu
b_0	[mm]	Původní šířka zkušební tyče
b	[mm]	Šířka zkušební tyče po plastické deformaci
C	[MPa]	Koeficient monotónního zpevnění
D_r	[mm]	Průměr přístřihu
D_0	[mm]	Původní průměr vzorku
d_r	[mm]	Průměr tažníku
d_1	[mm]	Největší průměr kuželového výtažku
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
F	[N]	Působící síla
FEM	[-]	Finite element method (metoda konečných prvků)
F_e	[N]	Síla na mezi kluzu
$F_{p0,2}$	[N]	Síla na smluvní mezi kluzu
f	[-]	Podmínka plasticity
HMH	[-]	Huber-Mises-Hencky (podmínka plasticity)
K	[-]	Stupeň tažení
k	[-]	Koeficient zaplnění plochy
L	[mm]	Okamžitá délka vzorku
L_e	[mm]	Měřená délka průtahoměru
L_u	[mm]	Délka tyče po přetrhnutí
L_0	[mm]	Původní délka tyče před zkouškou
l	[mm]	Délka zkušební tyče po plastické deformaci
m_F	[-]	Součinitel tažení
m_{min}	[-]	Minimální součinitel tažení
n	[-]	Exponent deformačního zpevnění
P	[MPa]	Hydrostatický tlak kapaliny

R	[MPa]	Smluvní napětí
R_d	[mm]	Poloměru zaoblení vzorku
R_e	[MPa]	Smluvní mez kluzu v tahu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
r_α	[-]	Normálová anizotropie ve směrech 0° , 45° nebo 90°
r	[-]	Anizotropie plechu (kalíškovací zkouška)
ΔL_m	[mm]	Prodloužení při maximálním zatížení
Δr	[-]	Stupeň plošné anizotropie
\bar{r}	[-]	Střední hodnota normálové anizotropie
S	[mm]	Okamžitá plocha příčného průřezu zkušební tyče
S_0	[mm ²]	Počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče
S_u	[mm ²]	Nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení
s	[mm]	tloušťka zkušební tyče po plastické deformaci
T	[K]	Teplota
t	[mm]	Aktuální tloušťka plechu
t_0	[mm]	Počáteční tloušťka vzorku
v_1	[mm]	Střední výška kalíšku k hornímu okraji cípu
v_2	[mm]	Střední výška kalíšku k hornímu okraji cípu
Z	[%]	Kontrakce
ZP	[MPa]	Zásoba plasticity
ΔL	[mm]	Absolutní prodloužení zkušební tyče
ε	[-]	Poměrná délka prodloužení
σ	[MPa]	Skutečné napětí
σ_i	[MPa]	Intenzita napětí
σ_{max}	[MPa]	Maximální napětí
σ_{min}	[MPa]	Minimální napětí
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
σ_1	[MPa]	Hlavní napětí
σ_2	[MPa]	Vedlejší napětí
τ_{krit}	[MPa]	Kritické smykové napětí

τ_{\max}	[MPa]	Maximální smykové napětí
φ	[-]	Skutečná deformace
φ_b	[-]	Skutečná deformace ve směru šířky vzorku
φ_i	[-]	Intenzita deformace
φ_s	[-]	Skutečná deformace ve směru tloušťky vzorku
φ_1	[-]	Hlavní deformace
φ_2	[-]	Vedlejší deformace
φ_3	[-]	Logaritmická deformace
$\dot{\varphi}$	[s ⁻¹]	Rychlost deformace

1 Úvod

Mezi jednu z nejznámějších používaných biaxiálních napěťových zkoušek patří hydrostatická zkouška vyboulováním neboli tzv. bulge test. Princip zkoušky spočívá v tváření plechu pomocí tlakové kapaliny. Tato technologie se uplatňuje nejen pro určení mezních stavů materiálu, ale i pro určení křivek zpevnění pro příslušné stavy napětí. Výsledky testu lze použít mimo jiné i v oblasti numerických simulací tvářecích procesů, které jsou v dnešní době často nezbytnou součástí například pro automobilový průmysl. Avšak aby výstup z numerických simulací mohl v dostatečném měřítku korespondovat s výsledky v praxi, je třeba pro simulace co nejpřesněji charakterizovat vstupní materiálová data získaná například z bulge testu.

Je známo, že v průběhu tváření plechů za určitých podmínek, jako jsou tlakové výdrže nebo dostatečně pomalá rychlost tváření, dochází k znatelné relaxaci napětí – uvolňování napětí a zároveň růstu deformace. Právě tento fakt je nutno při volbě tvářecích parametrů pro hydrostatickou zkoušku zohlednit, a také z tohoto důvodu se jím bude tato práce také zabývat.

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv mají různé rychlosti nárůstu tlaku, popřípadě nárůsty s tlakovými výdržemi, na výslednou křivku zpevnění a relaxaci napětí zvoleného materiálu. Všechny tyto výsledky budou výchozími poznatky pro stanovení vhodné metodiky k provádění testu hydrostatického vyboulování.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části, tedy na teoretickou část a experimentální část. V teoretické části jsou popsány operace a principy, které se přímo či nepřímo týkají experimentu. Odkazováno tu je i na zahraniční odborné texty, ze kterých bylo často čerpáno. V praktické části jsou uvedeny a podrobně popsány postupy, které vedly ke splnění zvoleného cíle práce. V závěru této práce jsou shrnuty výsledky v rámci řešené problematiky.

2 Teoretická část

2.1 Mechanické zkoušky plechů

Spolu se stále rostoucími požadavky na tvářitelnost plechů roste i význam určité predikce a porovnání vhodnosti různých plechů ke tváření danou technologií. Při procesech tváření je třeba také zvážit mnoho klíčových otázek a vlastností, jako je například anizotropie válcovaných plechů, podmínky víceosého namáhání, velké plastické napětí, rychlosti deformace a další. Proto by experimentální měření včetně konstrukce a uzpůsobení testovaných vzorku měla být navrhována tak, aby zvažila tyto klíčové aspekty za účelem splnění podmínek v praxi.

Mezi nejznámější zkoušky pro zjišťování mechanických vlastností patří statická zkouška tahem a zkouška tvrdosti. V oblasti dvouosého namáhání to může být například vyboulovací zkouška (bulge test). Výsledkem mechanických zkoušek jsou pak fyzikální vlastnosti daného materiálu nebo mezní hodnoty napětí, které mohou být použity pro určení vhodnosti materiálu nebo procesních parametrů pro danou zpracovatelskou technologii. [1], [2], [3]

2.1.1 Statická zkouška tahem

Zkouška jednoosým tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1 je nejrozšířenější ze skupiny základních zkoušek. Tato zkouška byla využita již v 15. století, kdy Leonardo da Vinci zatěžováním konopných lan zkoumal pevnost v závislosti na jejich délce. Modernější zkoušky konstrukčních materiálů jsou však zaznamenávány až od poloviny 18. století. Opodstatnění této zkoušky je také to, že při tahovém namáhání je možné rozdělit každý materiál na dvě části. Kdyby byl materiál namáhán například ohybem či tlakem, došlo by k porušení (rozdělení) pouze za předpokladu, že je materiál dostatečně křehký. [1], [2]

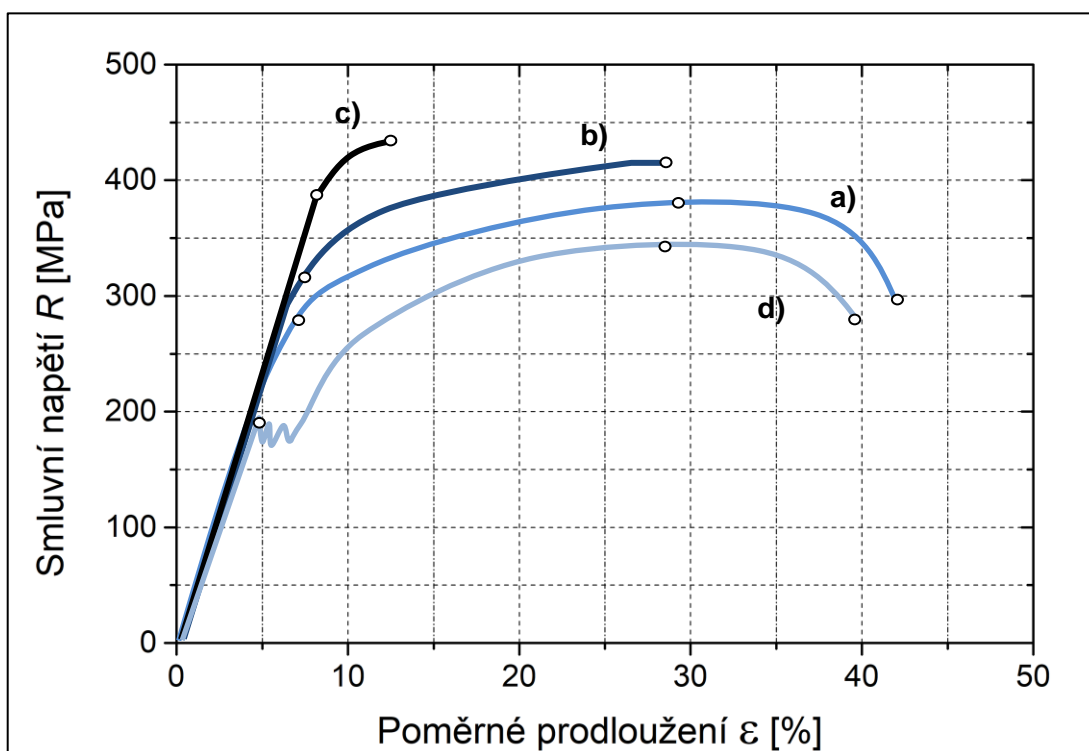
Cílem zkoušky u tenkých plechů je tedy roztrhnutí ploché zkušební tyčky a zjištění napěťové a deformační charakteristiky. Získávají se následující údaje:

- Mez kluzu (smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$)
- Mez pevnosti (R_m)
- Poměr (R_e/R_m)
- Tažnost (A_{80mm})
- Kontrakce (Z)
- Hodnoty plošné anizotropie mechanických vlastností pro různé směry v rovině plechu ($A_{Re(\alpha)}$)
- Hodnoty normálové anizotropie (R_α)
- Exponent deformačního zpevnění (n)
- Zásoba plasticity (ZP)

Prvotní výstupní veličiny z této zkoušky jsou závislosti síly na prodloužení $F = f(\Delta L)$, kde F [N] je zatěžující síla a ΔL [mm] absolutní prodloužení zkušební tyče. [2], [4]

2.1.1.1 Smluvní a skutečný tahový diagram

Diagramy, které jsou zaznamenávány trhacími stroji a charakterizují průběh odporu zkoušeného materiálu proti deformaci a porušení, se nazývají zatěžovací tahové diagramy. Ve strojírenské praxi se používají zejména smluvní tahové diagramy, u kterých jsou hodnoty napětí vztaženy k původnímu neměnnému (pevně danému) průřezu zkušební tyče. Napětí je vztaženo k jednotce plochy tyče a deformace k přírůstku délky. Tvar základních typů smluvních diagramů je možné vidět na obr. 2.1. [1], [5]



Obr. 2.1 Základní typy smluvních tahových diagramů, a) – všeobecný tvar diagramu bez výrazné meze kluzu, b) – diagram materiálu, který se v důsledku deformačního zpevnování přetrhne bez vytvoření krčku, c) – diagram křehkého materiálu, nízká deformace, d) – diagram materiálu s výraznou mezí kluzu. [1]

2.1.1.2 Smluvní vlastnosti ze statické zkoušky tahem:

- **Mez kluzu R_e**

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.1)$$

F_e [N] – síla na mezi kluzu

S_0 [mm²] – počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče

Mez kluzu je napětí, které vyjadřuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí křivky. Při dosažení těchto napětí dochází k prvotním plastickým (trvalým) deformacím. Je to také nejdůležitější mechanická vlastnost, neboť stanovuje odolnost proti vzniku trvalých deformací, což je nepřijatelné v mnoha případech např. stavební konstrukce, stroje atd. Mez kluzu se v takovém smluvním diagramu může projevovat dvěma způsoby, a to výraznou a nevýraznou mezí kluzu. Některé slitiny mohou obsahovat malé množství určitých přísad, které právě způsobují výraznou mez kluzu. Výrazná mez kluzu se projevuje diskontinuálním průběhem, jak

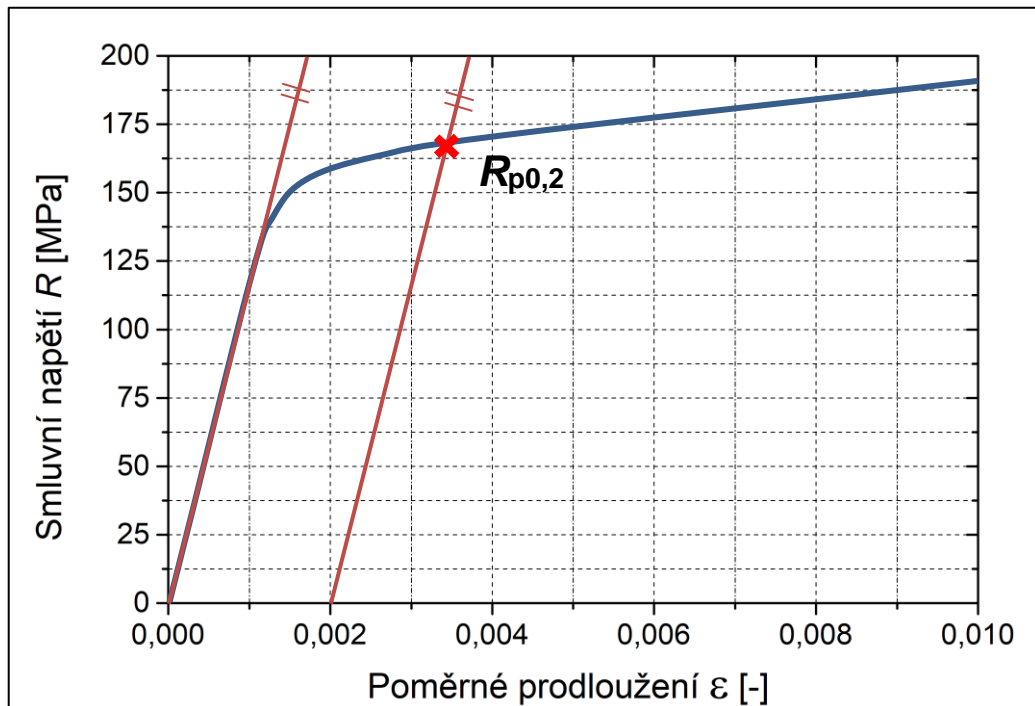
je znázorněno na obrázku 2.1 d). Oproti tomu plynulý přechod z elastické do elasticko-plastické oblasti způsobuje nevýrazná mez kluzu. Na křivce nedochází k žádné diskontinuitě a mez kluzu se musí vyjádřit jako smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. [1], [2]

- **Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$**

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2)$$

$F_{p0,2}$ [N] – síla na mezi kluzu

Smluvní mez kluzu je napětí u materiálů, které nemají výraznou mez kluzu a je třeba stanovit její smluvní hodnotu. Ta bývá nejčastěji při 0,2 % plastické deformace viz obr. 2.2. Je určena z trvalé deformace pod zatížením R_p , kdy trvalá deformace dosáhne procentuálně vyjádřitelné hodnoty délky L_0 zkušební vzorku. Tato hodnota se uvádí přímo v označení meze kluzu např. $R_{p0,2}$, $R_{p0,5}$. [1]



Obr. 2.2 Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. [6]

- **Mez pevnosti v tahu R_m**

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3)$$

F_m [N] – maximální síla před přetržením zkušební tyče

Mez pevnosti v tahu R_m odpovídá maximálnímu zatížení ve zkušebním vzorku, po jehož překročení dochází k nevratnému porušení celistvosti materiálu. Hodnota R_m je důležitá veličina pro popis a klasifikaci materiálů. V případě materiálu, u kterého se v průběhu tahové zkoušky netvoří krček (důsledek křehkosti či deformačního zpevnění viz obr. 2.1 b, c), je R_m totožné s napětím, které působí v okamžiku porušení. V ostatních případech je maximální síla F_m pouze silou na mezi plastické stability, při jejímž překročení dochází k prodlužování zkušební tyče za působení nižších sil, než je F_m . [1]

- **Tažnost A**

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.4)$$

L_u [mm] – délka tyče po přetrhnutí

L_0 [mm] – původní délka tyče před zkouškou

Tažnost je charakterizována jako trvalá deformace nebo prodloužení měrné délky v procentuálním vyjádření. Tato charakteristika plastických vlastností se zjišťuje v oblasti přetržení vzorku, kde se počáteční délka L_0 porovnává se změnou délky $\Delta L = (L_u - L_0)$. Plasticky deformované materiály se nedeformují po celé délce stejně, největší odchylka v rozložení deformace je v místě lokálního zúžení, tedy po překročení maximální zatěžovací síly, neboť dochází k místnímu prodlužování a současně rychlejšímu zmenšování příčného průřezu (tvorba krčku). Tažnost se dříve měřila tak, že na zkušební tyčku jsou před samotnou zkouškou nanášeny kalibrační značky, které znázorňují původní měřenou délku L_0 . V momentě, kdy došlo k přetržení vzorku, naměřená hodnota L_u odpovídá vzdálenosti mezi kalibračními značkami. Tento způsob se však již téměř nepoužívá, namísto toho bývají dnes trhací zařízení vybaveny extenzometry, které umožňují relativně přesně snímání jak změny délky, tak i změny průřezu vzorku. [1]

- **Kontrakce**

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$

S_u [mm²] – nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení

Při tahové zkoušce je kontrakce další charakteristikou plastičnosti materiálu. Definovat ji lze jako největší poměrné zúžení příčného průřezu zkušební tyče po přetržení vzorku. Kontrakce je vcelku spolehlivé měřidlo plastičnosti materiálu. Mezi kontrakcí a pevností materiálu platí nepřímá úměrnost, tedy čím pevnější materiál, tím nižší hodnota Z . [1]

Pro reálné případy chování materiálu jsou dále zavedeny vlastnosti, které je možné získat ze skutečného tahového diagramu. Zavádí se veličina skutečné napětí $\sigma = f(\varphi)$. [7]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (2.6)$$

S [mm²] – okamžitá plocha příčného průřezu zkušební tyče

F [N] – působící síla

Pro určení skutečné deformace se používá vztah:

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad [-] \quad (2.7)$$

L [mm] – okamžitá délka vzorku

Pro oba tahové diagramy platí stejná oblast elastické deformace s platností Hookova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (2.8)$$

ε [-] – poměrná délka prodloužení

E [MPa] – modul pružnosti v tahu

Největší změna při porovnání obou diagramů nastává za mezí plastické stability (u tvárných materiálů) viz obr. 2.3, kde smluvní napětí oproti skutečnému začne klesat. U zkušební vzorku dochází ke vzniku krčku a plocha průřezu se zmenšuje rychleji než roste odpor proti deformaci, navíc působící síla v průřezu je vztažena k původní ploše S_0 . Velikost skutečného napětí v oblasti rovnoměrné plastické deformace (od

meze kluzu po mez pevnosti) může být počítána ze vztahu (2.10), který popisuje poměr obou napětí. Tento vztah vychází z podmínky o zachování objemu při plastické deformaci (2.9). [1], [8]

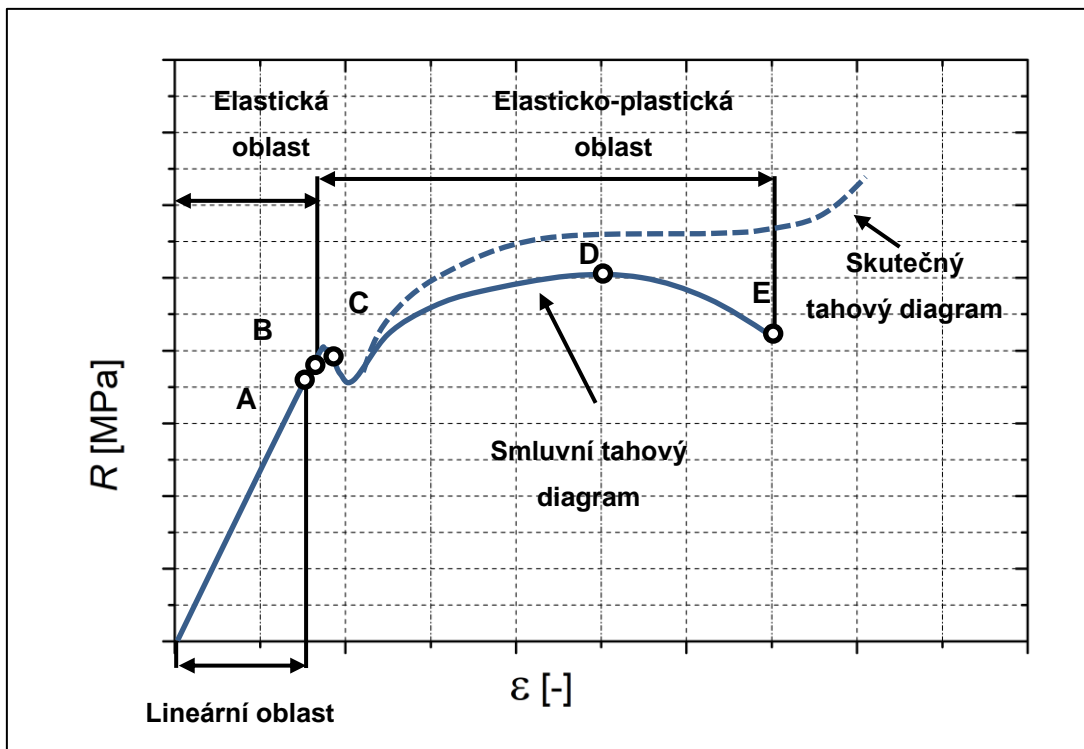
$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \quad [\text{m}^3] \quad (2.9)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{R \cdot S_0}{S} = \frac{R \cdot L}{L_0} = R \cdot \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (2.10)$$

R [MPa] – smluvní napětí

Tento vztah není možné aplikovat na výpočet skutečného napětí pro oblast za mezí pevnosti, neboť již neplatí, že změna délky je rovnoměrně úměrná změně plochy průřezu po délce vzorku (vztah 2.11). Tuto část křivky lze však sestavit průběžným měřením této plochy. [1]

$$\frac{L}{L_0} \neq \frac{S}{S_0} \quad [-] \quad (2.11)$$



Obr. 2.3 Porovnání smluvního a skutečného tahového diagramu. A – Mez úměrnosti, B – Mez pružnosti, C – Mez kluzu, D – Mez pevnosti, E – Místo přetržení vzorku. [8]

2.1.1.3 Anizotropie plechů

Pro hrubý popis mechanických vlastností plechů z tahové zkoušky slouží hodnoty R_e , R_m , A , Z . Avšak pro rozlišení jejich konkrétnějších účinků v určitých

směrech se používají další kritéria tvářitelnosti: Plošná a normálová anizotropie. Rozdílné směrové vlastnosti jsou způsobeny samotnou výrobou plechů, kdy při válcování vzniká krystalografická a strukturní textura. [2]

- **Plošná anizotropie**

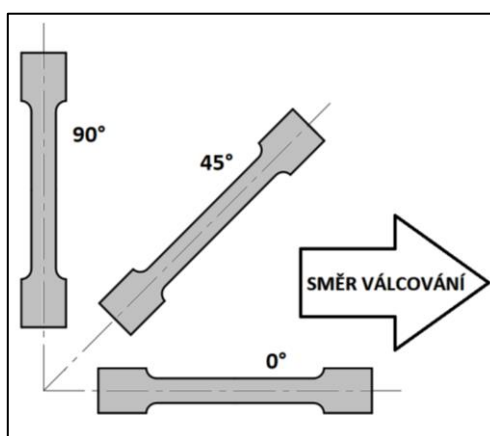
Plošná anizotropie vyjadřuje rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti v různých směrech v rovině plechu. Tato hodnota se zjišťuje pomocí výsledků z tahových zkoušek z plochých zkušebních vzorků, které byly odebrány z plechových tabulí ve směrech 0 °, 45 ° a 90 ° vzhledem ke směru válcování plechu viz obr.2.5. [2]

Výpočet plošné anizotropie pro smluvní mez kluzu je dán vztahem:

$$A_{Rp0,2} = \frac{R_{p0,2}(\alpha) - R_{p0,2}(0^0)}{R_{p0,2}(0^0)} \quad [-] \quad (2.12)$$

$R_{p0,2}(\alpha)$ [MPa] – mez kluzu vzorku, vytahovaného ve směru α

$R_{p0,2}(0^0)$ [MPa] – mez kluzu vzorku, vytahovaného ve směru 0^0



Obr. 2.4. Grafické znázornění vzorků odebíraných ve třech směrech válcování.

- **Normálová anizotropie**

Normálová (plastická) anizotropie oproti plošné vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v ploše plechu vůči mechanickým vlastnostem ve směru tloušťky. Jinými slovy, vyjadřuje náchylnost ke ztenčení plechu. Čím vyšší hodnota normálové anizotropie bude, tím k menšímu ztenčování bude docházet. Zjišťuje se opět pro směry tažení 0 °, 45 °, 90 °. Výpočet velikosti normálové anizotropie je podle vztahu 2.13. Tyto rovnice je možné použít pouze za předpokladu, že plátí zákon o zachování objemu před i po plastické deformaci. [2]

$$r_{\alpha} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{B_0}{b}}{\ln \frac{S_0}{s}} = \frac{\ln \frac{B_0}{b}}{\ln \frac{b \cdot l}{B_0 \cdot L_0}} \quad [-] \quad (2.13)$$

φ_b [-] – skutečná deformace ve směru šířky vzorku

φ_s [-] – skutečná deformace ve směru tloušťky vzorku

b [mm] – šířka zkušební tyče po plastické deformaci

B_0 [mm] – původní šířka zkušební tyče

s [mm] – tloušťka zkušební tyče po plastické deformaci

l [mm] – délka zkušební tyče po plastické deformaci

Jako kritérium pro tváritelnosti plechu se používá vážený průměr plastické anizotropie neboli střední hodnota normálové anizotropie značená \bar{r} : [2]

$$\bar{r} = \frac{1}{4} (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.14)$$

2.1.1.4 Exponent deformačního zpevnění

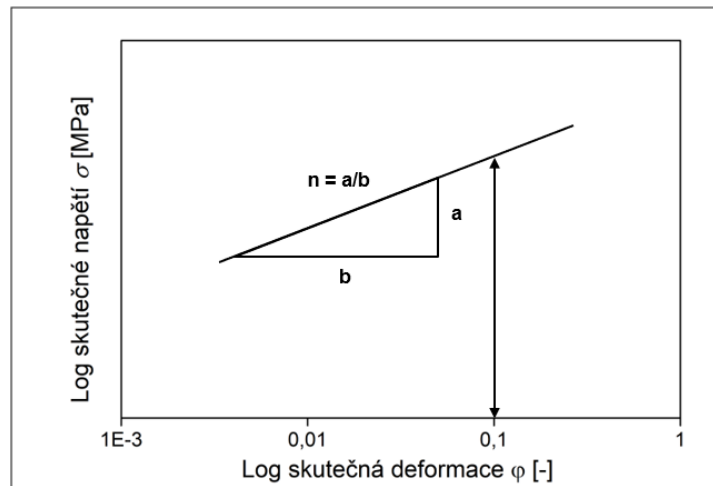
Exponent deformačního zpevnění značený n patří mezi důležité ukazatele tváritelnosti. Je vyjádřením materiálové schopnosti zpevňovat se v průběhu plastických deformací. S rostoucí hodnotou exponentu dochází ke většímu zpevnění v namáhaných místech a menšímu výskytu trhlin. Exponent je zjišťován pomocí tahové zkoušky. Přesnost průběhu skutečného napětí a skutečné deformace není přesně výstižná, proto se oblast homogenních plastických deformací (od meze kluzu do místa tvorby krčku) prokládá mocninou aproximací, která může mít více definovaných variant. Mezi nejznámější a široce využívané funkce patří tzv. Ludwig-Hollomonův exponenciální vztah (2.15). Zlogaritmováním tohoto vztahu lze dosáhnout lineární závislosti (2.16), ze které po vnesení skutečné deformace a napětí získáme C při hodnotě $\varphi = 1$ a exponent n , který určuje sklon přímky viz obr. 2.5. V dnešní moderní době se však k determinaci těchto konstant používají hlavně matematické modely (například metoda nejmenších čtverců), díky kterým jsou získávány relativně přesné výsledky. [2], [9]

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (2.15)$$

$$\log \sigma = \log C + n \cdot \log \varphi \quad [\text{MPa}] \quad (2.16)$$

C [MPa] – koeficient monotónního zpevnění

n [-] – exponent deformačního zpevnění



Obr. 2.5. Vztah mezi skutečným napětím σ a deformací φ , stanovení deformačního exponentu. [10]

2.1.1.5 Zásoba plasticity

Zásoba plasticity ZP je veličina sloužící k vyjádření schopnosti materiálu plasticky se deformovat. V podstatě určuje množství práce, kterou je třeba vykonat k přetvoření materiálu v oblasti mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. Tato práce se spočítá jako plocha pod křivkou ohraničená těmito mezemi. Čím větší hodnotu ze vztahu dostaneme, tím je lepší tvářitelnost daného materiálu. [7]

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot A_g \quad [\text{MPa}] \quad (2.17)$$

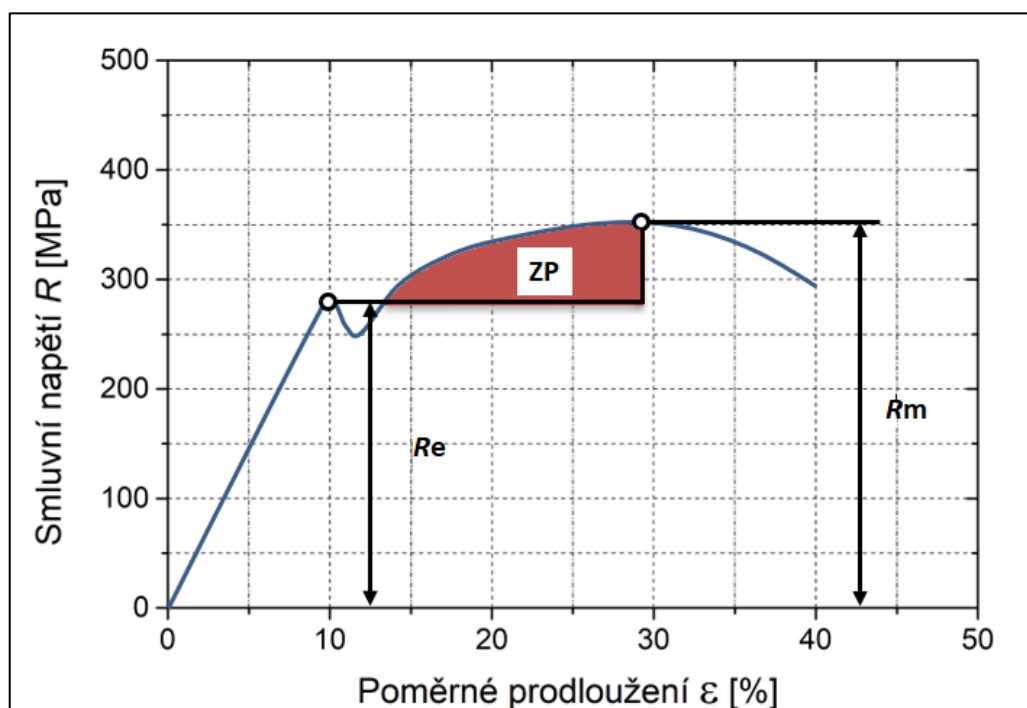
k [-] – koeficient zaplnění plochy

A_g [-] – Homogenní tažnost

Homogenní tažnost je vztažena k homogenní plastické deformaci, tedy platí pouze do meze pevnosti.

$$A_g = \left(\frac{\Delta L_m}{L_0} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.18)$$

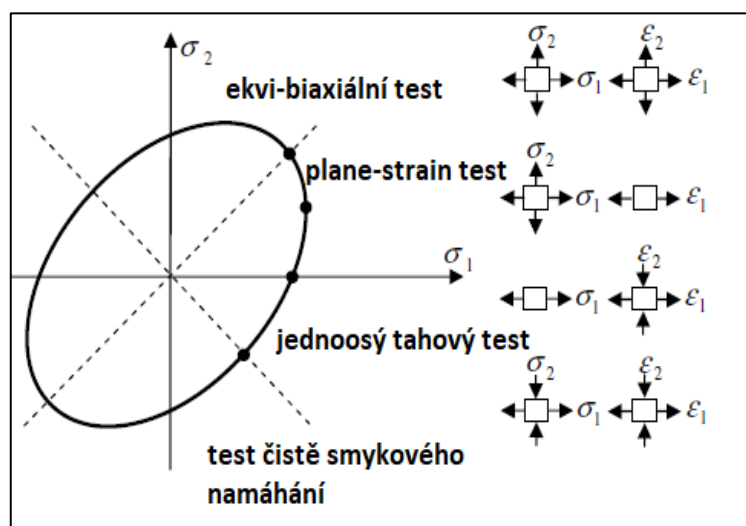
ΔL_m [mm] – prodloužení při maximálním zatížení



Obr. 2.6. Zásoba plasticity vyjádřená jako plocha pod křivkou ZP. [7]

2.1.2 Biaxiální napěťové zkoušky

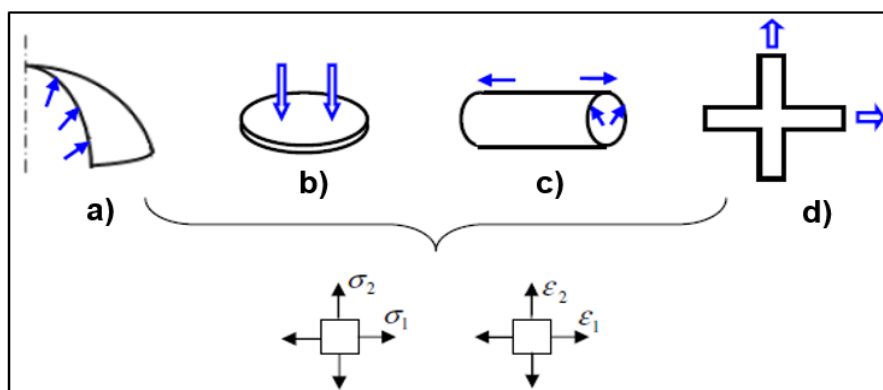
Pro mnoho průmyslových odvětví, jako je například automobilový nebo letecký průmysl, je proces tváření plechu velmi důležitou součástí výroby. Tento proces využívá plasticity kovu a aplikování mechanického zatížení k docílení požadovaného tvaru. Během procesu tváření však na produktech mohou vznikat praskliny, zvrásnění, odpružení či povrchové odchylky. Aby se těmto chybám dalo předejít, a došlo tak k optimalizaci tvářecího procesu, je v praxi běžně namísto metody pokus-omyl používána numerická simulace, díky které se snižují výrobní časy a produkční náklady. Pro tyto simulace, využívající metody konečných prvků, je nezbytné sestavit materiálový model. Pro získávání materiálových dat nám mimo jiné slouží i biaxiální napěťové zkoušky. Ty patří mezi čtyři tradiční zkoušky pro plechy (jednoosý tahový test, ekvi-biaxiální test, plane strain test a zkouška jednoduchým smykovým namáháním), které se obvykle provádí i za účelem zjištění různých deformačních režimů, mezních stavů a charakterizování plastického chování ve čtyřech reprezentativních bodech znázorněných v rovinném napěťovém prostoru (obr. 2.7.). [3]



Obr. 2.7. Napěťový a deformační stav ve vyznačených bodech v napěťovém prostoru. [3]

2.1.2.1 Metody testování biaxiálního napětí

V současné době existuje několik metod pro zkoušení dvouosého napětí. Mezi tyto metody patří například vyboulovací zkouška kruhového vzorku, rovinný biaxiální test křížového vzorku, tahová zkouška s vnitřním tlakem pro vzorky trubkovitého tvaru nebo kompresní zkouška diskového vzorku. [3]



Obr.2.8 Zjednodušené grafické znázornění biaxiálních zkoušek, a) bulge test, b) kompresní test diskového vzorku, c) tahová zkouška s vnitřním tlakem pro vzorky trubkovitého tvaru, d) biaxiální test křížového vzorku. [3]

Vyboulovací zkouška kruhového vzorku (bulge test) bude dále popsána v kapitole 3.2. Kompresní zkouška diskového vzorku se rovněž používá k získání materiálových informací, avšak velkým problémem této zkoušky je tření mezi vzorkem a nástrojem. [3]

V případě biaxiálního rovinného zkoušení test probíhá způsobem, kdy čtyři ramena plochého křížového vzorku jsou natahována čtyřmi navzájem kolmými čelistmi

a zároveň střed vzorku setrvává v klidu. Pro zkoušení se používají různé geometrie a modifikace vzorku, které však musejí splňovat některé podmínky, například vzorky musejí být jednoduché na výrobu a velkých deformací musí být dosaženo v jejich centrální oblasti. Stroj bývá konfigurován dvěma nebo čtyřmi zcela nezávislými pohony, které aplikují své zatížení ve dvou primárních osách. Obecně tedy jde o metodu testování vytvářením napěťových a deformačních stavů ve vzorku za účelem charakterizování anizotropního chování a mechanických vlastností. [3], [11]

Pro biaxiální zkoušení trubek je možné použít kombinovaný tahový-tlakový vyboulovací přístroj. Je to speciální metoda, kdy dojde k aplikaci jednoosého zatížení pomocí protilehlých hydraulických válců, a vnitřního tlaku pomocí hydraulického zesilovače. K měření vyboulení trubky, tedy poloměru R , je na střed povrchu vzorku v osové směru umístěn sférometr. Osově a obvodově skutečné napětí jsou měřena pomocí tenzometrů na povrchu vzorku. Je možné realizovat různé směry přetvoření, avšak zkouška je omezena náročností výroby vzorků. [3]

2.1.2.2 Podmínka plasticity

V již zmíněném rovinném napěťovém prostoru (obr.2.8.) je podmínka plasticity definována pro stanovení hranic mezi elastickými a plastickými deformacemi. Udává tedy, zda se při určitém stavu napjatosti se materiál plasticky deformuje. Je to funkce materiálových vlastností, teploty tváření, rychlosti deformace, stavu napjatosti a stupně předchozí deformace. [3], [12]

$$f(R_e, T, \dot{\varphi}, \varphi) = 0 \quad [-] \quad (2.19)$$

T [K] – teplota

$\dot{\varphi}$ [s^{-1}] – rychlost deformace

Pro jednoosou tahovou napjatost lze podmínku plasticity zapsat následovně:

$$f = \sigma - \sigma_k = 0 \quad [-] \quad (2.20)$$

V případě obecné napjatosti se často používá kritérium Huber-Mises-Hencky, zkráceně HMH. Plastického stavu je dosaženo v momentě, kdy intenzita napětí bude rovna napětí na mezi kluzu. Matematické vyjádření tohoto kritéria lze zapsat podle následující rovnice: [12]

$$\sigma_{red} = \sigma_k \quad [\text{MPa}] \quad (2.21)$$

$$\sigma_k = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad [\text{MPa}] \quad (2.22)$$

$$f(\sigma_{red}, \sigma_k) = \sigma_{red} - \sigma_k = 0 \quad [-] \quad (2.23)$$

σ_{red} [MPa] – redukované napětí

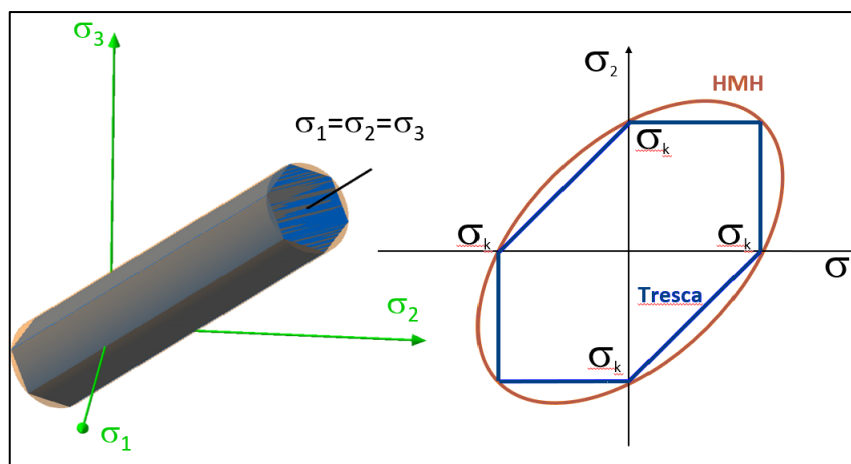
Další kritérium, často srovnávané s HMH, je podmínka plasticity Tresca-Guesst. Vychází z předpokladu, že podmínka je splněna při vzrůstu smykového napětí ve skluzové rovině na kritickou hodnotu potřebnou pro pohyb dislokace. Toto lze vyjádřit pomocí následujících vztahů: [12]

$$\tau_{max} = \tau_{krit} \quad [\text{MPa}] \quad (2.24)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \cdot |\sigma_{max} - \sigma_{min}| \quad [\text{MPa}] \quad (2.25)$$

$$\tau_{krit} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_k \quad [\text{MPa}] \quad (2.26)$$

Podmínku plasticity lze také graficky znázornit jako plochu v souřadném systému hlavních napětí $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. V případě HMH podmínky danou plochou v prostoru je válec, jehož osa je definována rovnicí $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. U podmínky podle Tresca-Guesst tvar plochy je šestiboký hranol. V obou případech lze pomocí grafického řezu vytvořit i rovinné znázornění elastické a plastické oblasti v souřadnicích σ_1, σ_2 viz obr. 2.9. [12]



Obr. 2.9. Porovnání podmínky plasticity podle HMH a Tresca-Guesst. [12]

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly 2.2, biaxiální testy nacházejí uplatnění i v oblasti numerických simulací. Cílem takovéto počítačové simulace je získání výsledků, které se blíží co nejvíce realitě, čímž odpadá mnoho složitých experimentálních zkoušek provedených za účelem odladění tvářecího procesu. Mezi jednu z nejpoužívanějších a nejuniverzálnějších metod pro řešení takových úloh patří metoda konečných prvků (FEM). Je využívána například i v oblastech pružnosti a pevnosti, hydromechaniky, termomechaniky a další. Aby bylo možné tuto metodu prakticky použít, je třeba mít k dispozici materiálová data, která jsou získávána kromě jiných právě i z biaxiálních technologických zkoušek. Aby bylo možné určit vztah (korelaci) mezi počítačovou simulací a reálným tvářecím procesem (např. lisování), je provedena simulace již dobře známého procesu s experimentálně ověřenými hlavními deformacemi. [13]

Výpočty v simulaci jsou provedeny pomocí iterací. Nejdříve je vygenerována deformační síť, složená z trojúhelníkových či čtvercových prvků, které jsou přepočítávány s každou další iterací. K vychylování tvářecího nástroje dochází v dostatečně krátkých úsecích s ohledem na velmi malé vygenerované prvky. Po každé změně deformace následuje sled procesů: generování prvků v ploše, iterativní úprava prvků pro rovnoměrné rozmístění, korekce prvků v uzlových bodech (v blízkosti měnícího se tvaru povrchu). Tento sled operací se opakuje do doby, než je dosaženo konečné polohy. Příkladem simulačního programu je například PAM-STAMP 2G. [14]

2.2 Technologické zkoušky tvářitelnosti plechů

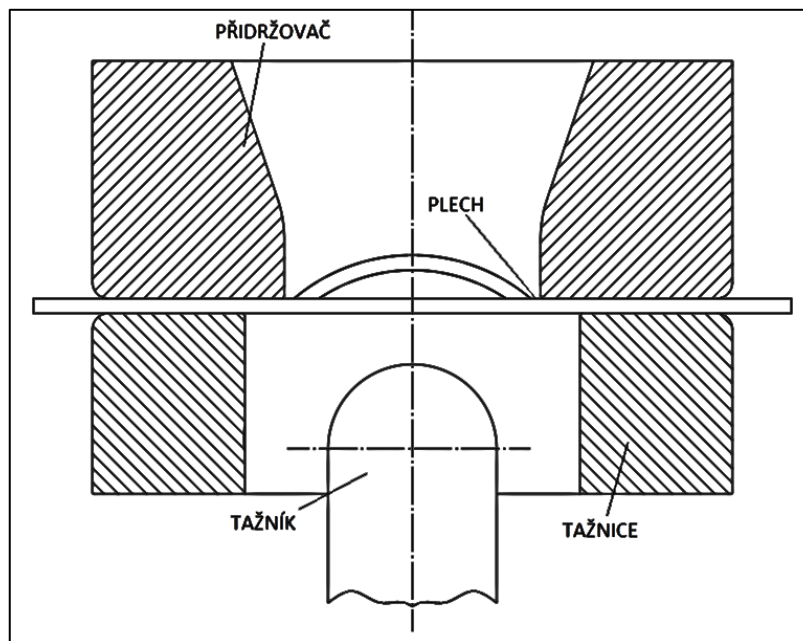
Technologické zkoušky určené pro zkoušení tvářitelnosti plechů slouží ke stanovení bližších vlastností a chování plechů, které nebylo možné zjistit například běžnou zkouškou jednoosým tahem. Poskytují nám širší pohled na vhodnost daného materiálu pro praktické využití v reálném procesu tváření, např. tváření automobilových karosérií, navíc jsou svým provedením jsou těmto reálným procesům velmi podobné. U hlubokotažných plechů k nejčastěji používaným testům patří zkouška hloubení podle Erichsena, Schmiedtova kalíškovací zkouška, Fukuiho zkouška tažení v kuželové tažnici nebo Tomlenova hydraulická zkouška (Bulge test). Plechy, určené na jiné účely, mohou být zkoušeny např. na střídavý ohyb či lámavost a další.

2.2.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

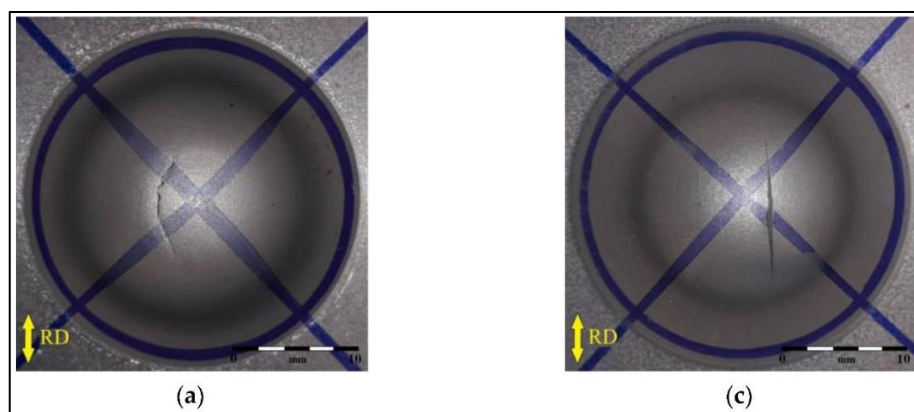
Zkouška hloubením podle Erichsena patří k nezákladnějším testům pro zkoušení tvářitelnosti. Používá se k vyhodnocování schopnosti materiálu podrobit se plastické deformaci při natahování ve více směrech. Na základě výsledků lze určit vhodnost různých tříd materiálů pro konkrétní praktické užití v oblasti tváření plechů. Je popisována normou ČSN EN ISO 20 482. [15]

Princip testu spočívá v upnutí čtvercového zkušební vzorku mezi matici a přidržovač plechu. Tažník s kulovým koncem postupně zajíždí do materiálu (obr. 2.10.) rovnoměrně plynulým pohybem, který je zajišťován mechanickým ručním nebo hydraulickým způsobem. Test probíhá do doby než se ve vzorku začnou objevovat trhliny, podle jejich směru je následně možné určit anizotropie a také vhodnost materiálu pro danou operaci. Za trhlínu je považováno natrhnutí v celé tloušťce. Trhliny jdoucí v radiálním směru jsou vypovídající pro anizotropní materiál s vláknitou strukturou, a tedy nevhodný pro hlubokotažení. Pokud se vytvářejí praskliny kulovitého tvaru (obr. 2.11.), pak se jedná o hlubokotažný plech vhodný k tváření. Měřená je hloubka vrchlíku h , která je úměrná tvářitelnosti plechu. Tato hloubka představuje Erichsenovo číslo IE. Je možné ji změřit jako dráhu tažníku z nulové polohy, tedy od místa prvního dotyku tažníku se vzorkem, až do polohy vzniku první trhliny. Toto číslo je kromě hloubky deformovaného vrchlíku závislé také na tloušťce plechu. Při vyhodnocování testu se posuzuje také vzhled povrchu vytlačeného kulového vrchlíku. Ocele s hrubšími zrny mohou vykazovat dobré vlastnosti pro hluboké tažení, avšak

problémem může být jejich vzhled například ve spotřebním automobilovém průmyslu, kdy povrch karosérií musí být lesklý a hladký. [1], [15]



Obr. 2.10. Schématické znázornění zkoušky hloubení podle Erichsena. [16]

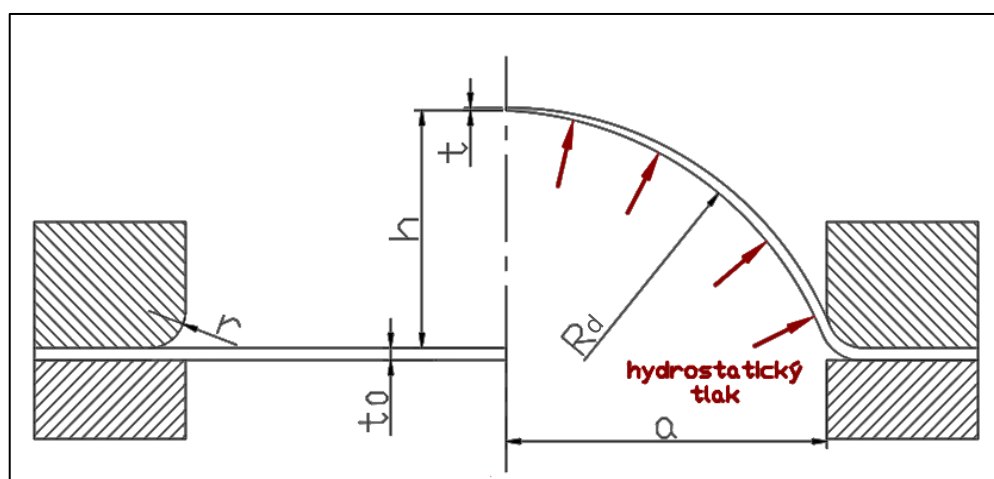


Obr. 2.11. Různé tvary trhliny ve zkušebním vzorku. a) trhlina typická pro hlubokotažné materiály, c) trhlina u nevhodného materiálu pro hluboké tažení. [17]

K výhodám této zkoušky patří její jednoduchost, rychlá a relativně snadná příprava zkušebních vzorků. K nevýhodám patří značný nesoulad ve výsledcích pro jednu jakost plechu, nedají se získat informace o mechanických vlastnostech v různých směrech, tedy anizotropii. V případě ručního řízení mohou být výsledky také ovlivněny samotnou obsluhou stroje, neboť celý průběh je značně závislý na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku. [1]

2.2.2 Hydraulická zkouška podle Tomlena (bulge test)

Hydraulická zkouška podle Tomlena byla vyvinuta pro určování a předpovídání materiálových vlastností tenkých plechů, jako je například Youngův modul pružnosti, Poissonovy konstanty, nebo zbytkové napětí. Jak je znázorněno na obrázku 2.12., při této zkoušce je vzorek umístěn a pevně zajištěn nad otvor s přívodem hydraulické kapaliny. Na jednu stranu plechu působí rovnoměrně rozložený hydrostatický tlak vyvozený pomocí kapaliny (nejčastěji olej), což způsobuje vnitřní dvouosé rozložení napětí a následné vyboulování materiálu směrem ven. Deformace a napětí mohou být určeny pomocí měření tlaku P a výšky deformovaného vrchlíku h . Tato vyboulovací zkouška je flexibilní metoda, umožňující také charakterizovat elastickou, plastickou a časově závislou deformaci plechu. V dnešní době velkou výhodou je možnost měření deformace pomocí fotogrammetrických metod. Nad vzorkem je rozmístěn pár kamer, které snímají nanesenou deformační síť a pomocí numerických výpočtů je docíleno potřebných výsledků. [18]



Obr. 2.12. Geometrie hydraulického vyboulovacího testu, kde hodnota a je vzdálenost mezi formou a středem vzorku, t je tloušťka plechu po deformaci, t_0 je původní tloušťka plechu, R je rádius vyboulení, h je výška vrchlíku a r je rohový rádius formy. [19]

Výhodou této metody je relativní rychlost a jednoduchost, rovnoměrné působení tlaku po celé ploše vzorku, možnost sestavení křivky zpevnění po dokončení testů, a navíc je tato zkouška oproti zkoušce hloubením podle Erichsena přesnější. Naopak její nevýhodou je relativně složitě zařízení. [2]

Biaxiální napětí lze spočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P \cdot R_d}{2 \cdot t} \quad [\text{MPa}] \quad (2.27)$$

P [MPa] – hydrostatický tlak kapaliny

R_d [mm] – poloměru zaoblení vzorku

t [mm] – aktuální tloušťka plechu

Aktuální tloušťka plechu se spočítá ze vztahu:

$$t = t_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad [\text{mm}] \quad (2.28)$$

t_0 [mm] – počáteční tloušťka vzorku

φ_3 [-] – logaritmičká deformace

Z důvodu ekvivalentního biaxiálního napětí se používají hodnoty intenzity napětí σ_i a intenzity deformace φ_i . Tyto veličiny se vypočítají dle vztahu 2.29 a 2.30. [20]

$$\sigma_i = \sigma_1 \cdot \frac{P}{2} \quad [\text{MPa}] \quad (2.29)$$

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{12}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2} \quad [-] \quad (2.30)$$

φ_1 [-] – hlavní deformace

φ_2 [-] – vedlejší deformace

Tato metoda je vhodná také pro materiály s nízkým Youngovým modulem, např. polyimidy. Tyto materiály mohou být také zkoušeny na adhezní vlastnosti (testování známé jako blistrování), což je pouze rozšíření tohoto vyboulovacího testu. Tlak aplikovaný na vzorek se zvyšuje, dokud nedochází k oddělování substrátu od vrstvy základního materiálu. [18]

2.2.3 Fukuiho zkouška tažením v kuželové tažnici

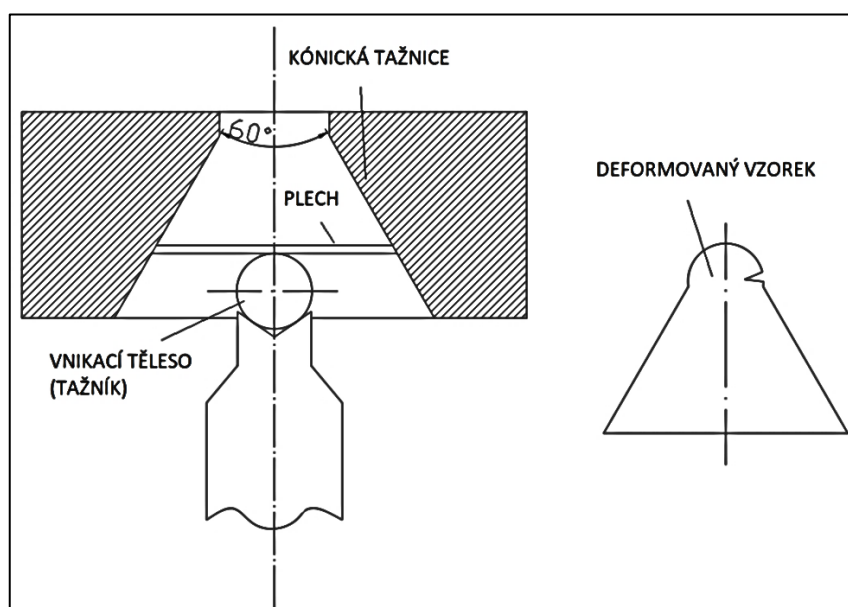
Tato zkouška slouží k posouzení tvářitelnosti tenkých plechů. Jako příklady charakteristik tvářitelnosti mohou být např. maximální zatížení tahem, hloubka kuželového přístřihu až do vzniku trhlin, největší průměr výtažku v okamžiku vzniku trhliny. Tento test je specifikovaný podle Japonské normy JIS Z2249. Provedení testu spočívá v tažení kulatého vzorku (může být s předvrtaným otvorem nebo bez) do

kuželové tažnice pomocí plochého cylindrického tažníku a bez použití přidržovače (bez vlivu přidržovací síly), až do doby vzniku prvních trhlin (obr. 2.13.). Největší průměr kuželového výtažku je důležitý pro určení součinitele tažení m_F , což je zároveň ukazatel tváritelnosti, jenž vyplývá z tohoto testu. Je možné ho spočítat ze vztahu 2.31. Čím bude nižší hodnota toho výrazu, tím je zkoumaný plech vhodnější k hlubokému tažení. Konečný bod tohoto testu není naštěstí kritický, neboť po vzniku trhliny nedochází ke změně průměru kuželového výtažku. [21]

$$m_F = \frac{d_1}{D_0} \quad [-] \quad (2.31)$$

d_1 [mm] – největší průměr kuželového výtažku

D_0 [mm] – původní průměr vzorku

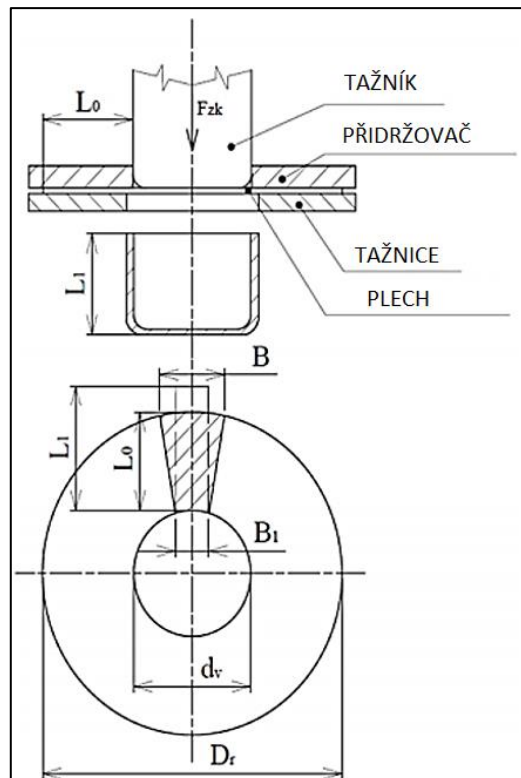


Obr. 2.13. Schématické znázornění Fukuiho zkoušky [22]

V praxi je stále veliký zájem o tento proces z důvodu vysokých požadavků na průmysl, za účelem produkce lehkých a zároveň pevných komponentů. Materiál by měl být schopen dosáhnout vysokého napětí bez vzniku lomu, ustát tlakové napětí bez vzniku zvrásnění, udržet tvar po vyjmutí materiálu z formy, zachovat si hladký povrch a odolat povrchovým poškozením. Některé výrobní procesy pak mohou fungovat pouze za předpokladu, kdy tvářecí vlastnosti materiálu budou v určitém úzkém rozmezí. [21]

2.2.4 Schmiedtova kalíškovací zkouška

Kalíškovací zkouška je používána pro hodnocení hlubokotažnosti materiálu. Probíhá na základě vytahování kalíšku z plechu s použitím přidržovače. Je vhodná pro vytahování kulatých symetrických výtažků. Nevýhodou je časová náročnost zkoušky, neboť je třeba experimentálně určit maximální možný průměr zkušební vzorku, a to bez vzniku trhlin. Proto je třeba cyklus tažení několikrát opakovat s postupným zvyšováním průměru přístřihu. Cílem zkoušky je najít hodnotu stupně tažení K , kde K je převrácená hodnota minimálního součinitele tažení m_{min} . Tyto dvě hodnoty lze vyjádřit dle vztahů 2.32 a 2.33. Zkušební přístřih o průměru $D = d + 2L$ a průměru tažníku $d = 50$ mm se táhne na výtažek s výškou $L_1 > L$ (viz obr. 2.14.). [2], [7]



Obr. 2.14. Schéma kalíškovací zkoušky. [2]

$$m_{min} = \frac{d_t}{D_r} \quad [-] \quad (2.32)$$

$$K = \frac{1}{m_{min}} \quad [-] \quad (2.33)$$

d_t [mm] – průměr tažníku

D_r [mm] – průměr přístřihu

Tato metoda je vhodná pro zkoušení hlubokotažnosti také z důvodu blízké podobnosti výroby výtažků v praxi. Z výsledků lze určit i anizotropii mechanických vlastností zkoušeného materiálu, konkrétně díky tvorbě cípatosti viz obr. 2.15. Princip zkoušky se aplikuje v ČSN 42 0409 ke zjišťování anizotropie hliníkových plechu a jejich slitin. Používá se následující vztah: [2]

$$r = \frac{v_1 - v_2}{v_2} \quad [-] \quad (2.34)$$

v_1 [mm] – střední výška kalíšku k hornímu okraji cípu

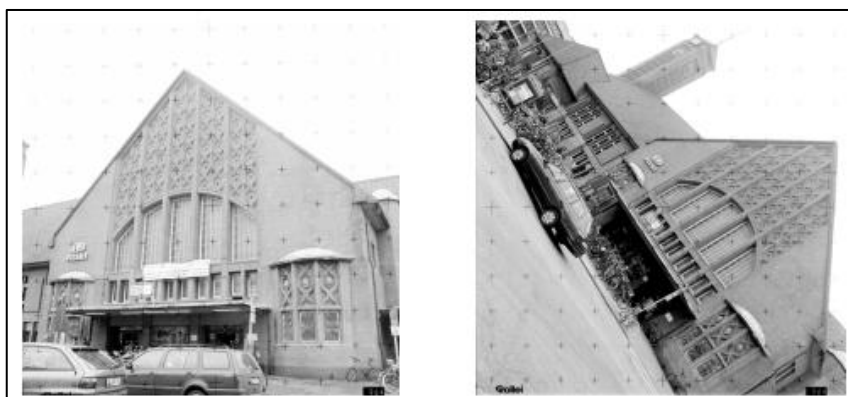
v_2 [mm] – střední výška kalíšku k spodnímu okraji cípu



Obr 2.15. Typická cípatost u vytaženého kalíšku pod 0° a 90° ke směru válcování plechu. [23]

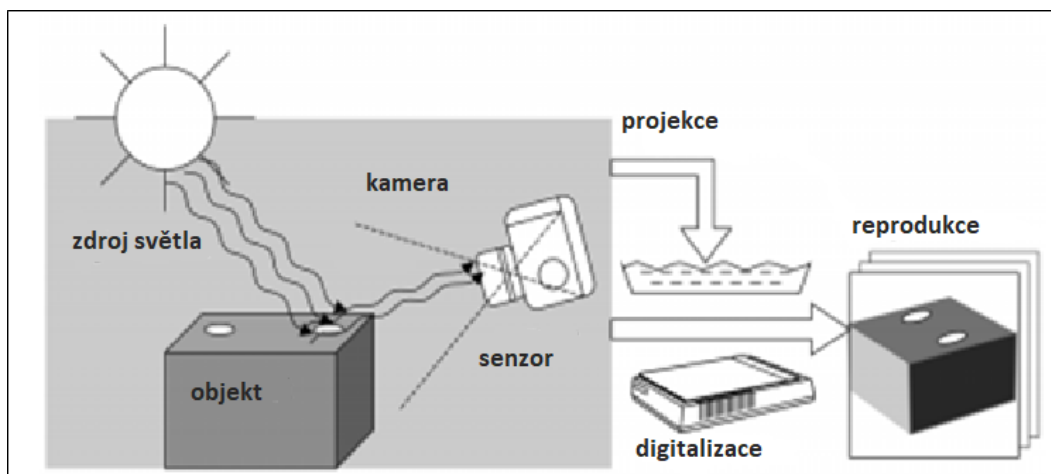
2.3 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je vědní obor, který zahrnuje metody měření a interpretace obrazu za účelem odvození tvaru a polohy objektu pomocí minimálně dvou nebo více jeho fotografií. V podstatě se jedná o trojrozměrnou rekonstrukci v digitální formě (souřadnice a derivované geometrické elementy) nebo v grafické formě (obrázky, kresby, mapy). Plochy, které však není možné na snímku vidět, nelze rekonstruovat. To zahrnuje jak skryté části, objektu jako například zadní část domu, tak i části s horším kontrastem nebo části příliš malých rozměrů jako jsou cihly ve fasádě budovy. Fotografie nebo obrázky představují kdykoliv zpřístupnitelné uložení informací. Fotogrammetrické metody se dají použít za každé situace, pokud měřený objekt může být fotograficky zaznamenáván. Příklad fotogrammetrických snímků je uveden na obrázku 2.16. Při redukci trojrozměrného objektu na dvojrozměrný obraz dochází ke ztrátě informací. [24]



Obr. 2.16. Příklad fotogrammetrických snímků budovy. [24]

Vzhledem k faktu, že bod v prostoru lze definovat pomocí tří souřadnic, pozici dvojrozměrného obrazu je možné definovat pouze dvěma. Dochází ke geometrickým změnám, které jsou způsobeny tvarem objektu, relativním umístěním kamery vůči objektu, perspektivním zobrazením a defektem optické čočky. Jsou zde i radiometrické změny, neboť elektromagnetické záření zachycené na obrázku je ovlivněno přenosovým prostředím (vzduch, sklo) a záznamovým médiem (film, elektronický senzor). Proto je pro rekonstrukci digitálního 3D objektu důležité stanovit a popsat optické procesy při vytváření fotogrammetrického snímku. Toto zahrnuje všechny prvky, které mohou přispívat k tomuto procesu: světelné zdroje, vlastnosti povrchu objektu, látkové prostředí, které přenáší světlo, senzory a kamera, zpracování obrazu, film, vývoj a další procesy viz obr. 2.17. [24]

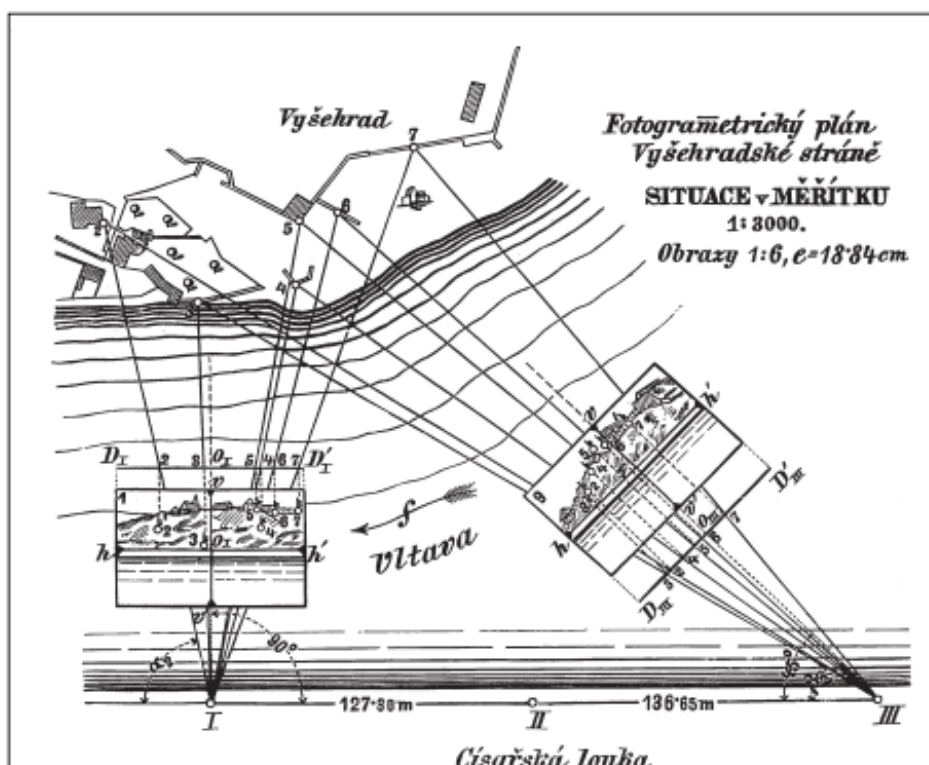


Obr. 2.17. Přejchod z trojrozměrného objektu na dvojrozměrné obrázky. [24]

Dále jsou vyžadovány metody pro interpretaci a měření obrazu. Dociluje se identifikace obrazu objektu z jeho tvaru, jasů nebo barev. Z každého bodu obrázku lze získat hodnoty intenzity, hodnoty šedi, hodnoty barvy pomocí radiometrických dat, a pozice v obrázku pomocí geometrických dat. Toto vyžaduje měřicí systémy s příslušnou geometrickou a optickou kvalitou. Z těchto měření a matematických výpočtů (transformací) mezi obrazem a objektem je možné sestavit konečný model. [24]

2.3.1 Historie fotogrammetrie

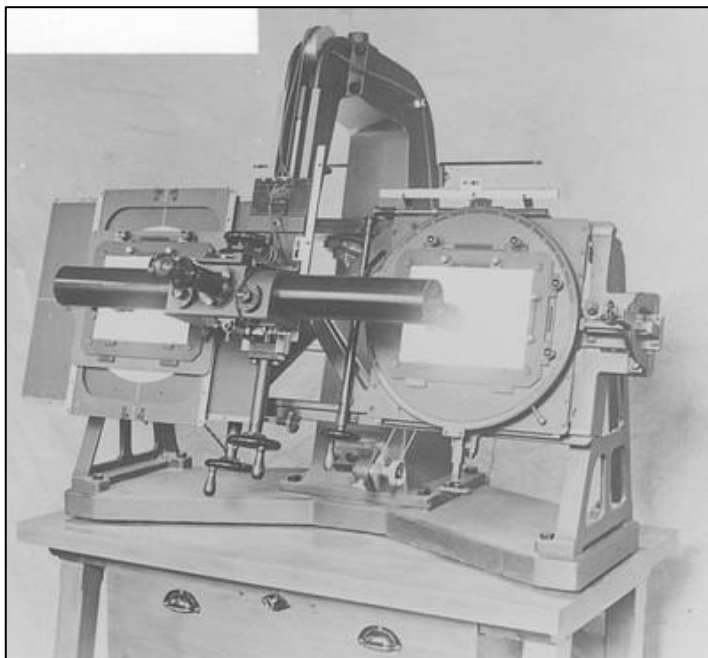
První zmínky o fotogrammetrii sahají dále než vynalezení samotné fotografie. První osoba, která využila principu fotogrammetrie, byl Leonardo da Vinci. Sestrojil dírkovou komoru, která uživateli umožňovala překreslování zkoumaného objektu pomocí centrální projekce. Na tento vynález navázal Jan Kepler, který přidal do komory spojnou čočku a nazval to camera clara. Historický vývoj fotogrammetrie postupoval dále skrze objevení fotografie díky vynálezci J. N. Niepce a L. Dagaurre. O zdokonalení fotografie pomocí procesu pozitiv a negativ se zasloužil H. F. Talbot. Díky tomu bylo možné vytvořit více stejných fotografií z jednoho negativu. K dalšímu rozvoji fotogrammetrie přispěl slovenský vědec J. M. Petzval. Dokázal zkonstruovat úplně první moderní objektiv a zavedl do geometrické optiky přesné výpočetní metody. [25]



Obr. 2.18. Fotogrametrický plán Vyšehradské stráně. [25]

Za zakladatele fotogrammetrie je považován francouzský vědec A. Laussedat, kterého napadlo fotografické snímky používat za účelem měření. První fotografický přístroj na získávání pozemních fotogrammetrických snímků (fototeodolit) podle jeho návrhu zkonstruoval mechanik Brunner roku 1859. První český vědec, který u nás zhotovil první fotogrammetrické měření byl K. Kořistka. Ze dvou míst (Hradčany a Petřín) byly pořízeny snímky, u kterých pomocí průsekové metody úspěšně určil polohu různých bodů na území Prahy (viz. obr. 2.18.). Dále se fotogrammetrií blíže zabýval F. Steiner. Tomu se povedlo v letech 1891 – 1893 vydat první učební texty týkající se fotogrammetrie. V dalších letech nabylo významnosti této měřicí metody a již v letech 1893 – 1897 došlo pomocí průsekové metody k zmapování Vysokých Tater v měřítku 1 : 25 000, avšak tato metoda nebyla stále zdaleka dokonalá. K vylepšení této metody došlo na začátku 20. století pomocí použití principu stereoskopie. Za vznik stereofotogrammetrie se zasloužil C. Pulfrich, který jako první sestrojil stereokomparátor, přístroj pro měření snímkových souřadnic (viz obr. 2.19). Od tohoto přístroje se pak odvíjely další, složitější přístroje pro analogové vyhodnocování. Se stoupajícím zájmem o lítání rostl i zájem o leteckou fotogrammetrii, kde první snímky v roce 1858 zaznamenal francouzský novinář, spisovatel a vzduchoplavec Nadar. Další větší rozmach v oblasti letecké fotogrammetrie nastal

až za první světové války za účelem špionáže. Fotogrammetrické kamery spolu s vyhodnocovacími přístroji prošli rychlým vývojem. První letecká stereofotogrammetrie se na našem území uskutečnila roku 1921 na území Trutnova. [25]



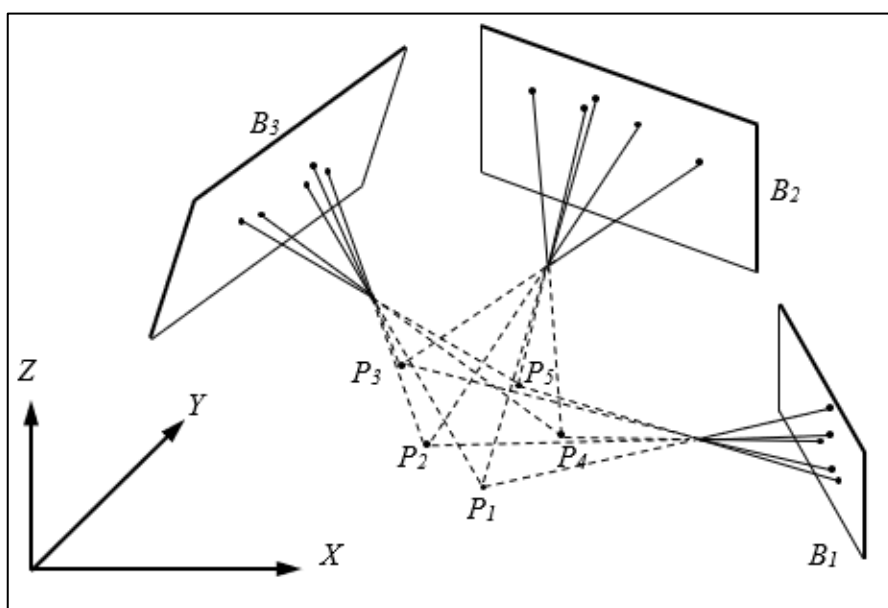
Obr. 2.19. Stereokomparátor podle návrhu německého fyzika Carl Pulfricha. [26]

Později současně s rozvojem výpočetní techniky se pozornost v oblasti vyhodnocení fotogrammetrických snímků přenesla na analytickou metodu. Z důvodu velmi náročných výpočtů se metoda dříve nepoužívala, ačkoliv se o ní vědělo. Princip analytického stroje byl patentován již v roce 1957 finským vědcem Uki Helavou. Konstrukce, která byla schopna tuto výpočetní metodu úspěšně použít, byla sestavena o dvacet let později. Základem stroje byl stereokomparátor, digitální odečítání polohy ovládacích prvků a dostatečně výkonný počítač. Po roce 1980 došlo k dalšímu radikálnímu vývoji výpočetní techniky a bylo již možné dostatečně rychle zpracovávat data a uchovávat je na velkokapacitním uložení. Koncem 80. let 20. století vznikali první digitální systémy a na to navazující digitální fotogrammetrie. [25]

2.3.2 Princip a matematický základ fotogrammetrie

Při použití fotogrammetrie je možné určit polohu bodu v trojrozměrném prostoru pomocí triangulace (trigonometrický výpočet pro určení souřadnic a vzdáleností) více svazků pozorovacích paprsků. Pokud je známá prostorová orientace každého svazku paprsků v souřadném systému objektu, z průniků paprsků lze zjistit požadované

souřadnice trojrozměrného objektu (viz obr. 2.20.). [27]

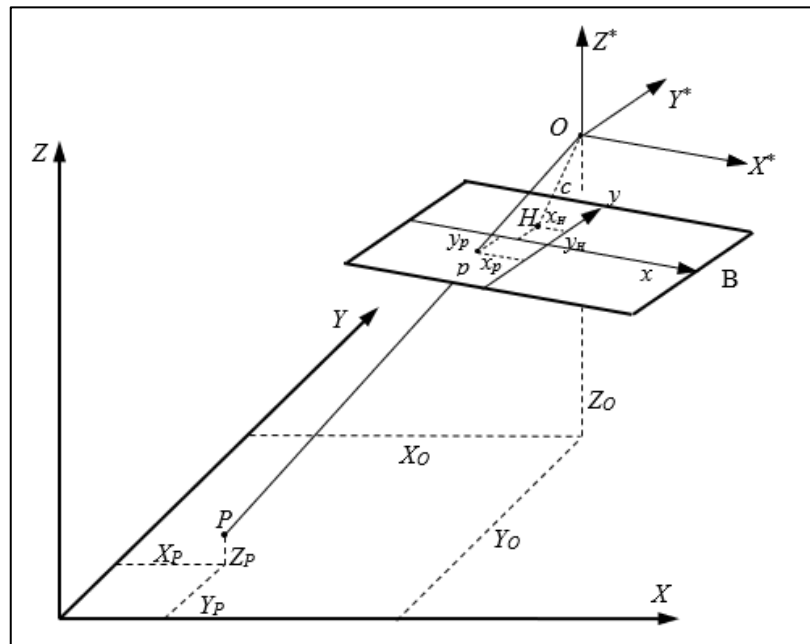


Obr. 2.20. Předpověď souřadnic bodů P_i pomocí triangulace svazků pozorovacích paprsků z různých rovin obrazů B_i . [27]

K matematickému popisu projekce objektu se zavádí pojem model kamery.

2.3.2.1 Model kamery

Model kamery se především používá za účelem popisu projekce objektu do obrazové roviny kamery. Za předpokladu, že paprsky světla jsou popsány jako rovné čáry, lze popsat model kamery tak, jak tomu je na obrázku 2.21. Bod objektu značený $P(X_p, Y_p, Z_p)$ a jeho obraz $p(x_p, y_p)$ v obrazové rovině B stejně jako centrální projekce $O(X_o, Y_o, Z_o)$ leží na stejné projekční čáře. [27]



Obr. 2.21. Model kamery. [27]

- B - obrazová rovina
- c - ohnisková vzdálenost
- x, y - souřadný systém obrazu
- x_H, y_H - souřadný systém ohniska v obrazové rovině
- x_P, y_P - souřadný systém bodu objektu P
- X, Y, Z - souřadný systém objektu
- X^*, Y^*, Z^* - pomocný souřadný systém
- X_O, Y_O, Z_O - souřadnice projekčního centra O v souřadném systému objektu
- X_P, Y_P, Z_P - souřadnice sledovaného bodu P v souřadném systému objektu

Vztah mezi souřadným systémem objektu a souřadným systémem obrazu lze matematicky vyjádřit pomocí kolineárního předpokladu: [27]

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \frac{-c}{z_p^*} \cdot \begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\begin{bmatrix} X_p^* \\ Y_p^* \\ Z_p^* \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_P & -X_O \\ Y_P & -Y_O \\ Z_P & -Z_O \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

X_P^*, Y_P^*, Z_P^* [mm] – pomocné souřadnice bodu objektu P

dx, dy [mm] – elementy zkreslení objektivu

R – matice rotace

Ohnisková vzdálenost c , souřadnice této vzdálenosti (x_H , y_H) a elementy zkreslení objektivu (dx , dy) jsou základními parametry kamery, které slouží k popisu vnitřní orientace. Hodnoty, které určují polohu projekčního centra $+(X_0, Y_0, Z_0)$ a rotační matici R , jsou závislé na pozici kamery v globálním souřadnicovém systému, určují vnější orientaci a jsou proto nazývány jako parametry vnější orientace. Ortogonální rotační matice R je používána pro transformaci globálních souřadnic na souřadnice pomocné. Lze ji vyjádřit v tomto tvaru: [27]

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.3.3 Rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie může být rozdělena do mnoha kategorií:

- **Rozdělení podle polohy kamery a vzdálenosti k objektu**
 - Satelitní: zpracování satelitních snímků, $h > 200$ km
 - Letecká: zpracování leteckých snímků $h > 300$ m
 - Pozemní: získávání snímků z pevného místa na zemi
 - Fotogrammetrie na blízkou vzdálenost: $h < 300$ m
 - Makro: měřítko obrazu > 1 (mikroskopické zobrazování)
- **Rozdělení podle počtu měřených a vyhodnocovaných obrázků**
 - Tvorba jednoho snímku: monochromatické vykreslování, zpracování pouze jednoho snímku
 - Stereofotogrammetrie: stereoskopické měření snímku, zpracovávání dvou snímků
 - Tvorba více snímků: počet snímků je větší než 2, triangulace svazků
- **Rozdělení podle metod zpracování a zaznamenávání**
 - Tvorba snímků na rovinném měřicím stole: způsob grafického vyhodnocování snímků zhruba do roku 1930
 - Analogová fotogrammetrie: použití analogových kamer a optometrických měřicích systému, zhruba do roku 1980

- Analytická fotogrammetrie: tvorba analogových snímků, měření pomocí počítačů
- Digitální fotogrammetrie: tvorba digitálních snímků, měření pomocí počítačů
- Videogrammetrie: pořizování a měření digitálních snímků
- Panoramatická fotogrammetrie: panoramatické zobrazování a zpracovávání
- Lineární fotogrammetrie: analytické metody, které se zakládají na přímkách a polynomech
- **Rozdělení podle času vyhodnocení snímku**
 - Real time: měření a zaznamenávání dokončeno ve specifikovaném čase odpovídající dané aplikaci
 - Offline: sekvenční a digitální zaznamenávání obrazu, časově nebo polohově odděleno od samotného měření
 - Online: vícenásobný digitální záznam s okamžitým měřením [24]
- **Rozdělení podle použití v topografické oblasti (vyhodnocování ke topografickým a geodetickým účelům)**
 - Letecká: vytváření map a plánů, především středních a velkých měřítek, výhodné pro oblasti s horší přístupností
 - Pozemní: využívá se pro snímání menších a skalnatých území. Nejčastěji nachází uplatnění pro účely projektování staveb (např. přehrady, mosty)
- **Rozdělení podle použití v netopografické oblasti (snímky pro vědecké účely)**
 - Strojírenství: oblast tváření kovů (technologické tvářecí zkoušky), zkoumání deformace, umístění výrobních strojů, monitorování montáže velkých součástí, reverzní inženýrství designu modelu, nahrávání a analýza automobilových bezpečnostních testů, kalibrace a snímání robotů, optické měření tvarů

- Kosmický průmysl: kontrola montáže, simulace vesmírných objektů
- Lesnictví: tvorba nebo obnova lesnických map s měřítkem kolem 1 : 5000, organizace výsadby stromů, plánování těžby dřeva, klasifikace lesních ploch, propočty lesních hmot, předpověď nebo identifikace rozsahu škod způsobených živelnými faktory (vichřice, tornáda, požáry) nebo škůdci (kůrovec)
- Zemědělství: hospodářské úpravy pozemků, projektování meliorací, sledování využití krajiny
- Stavebnictví: měření jejich deformací, modelování celých měst, pozorování výstavby, podklady pro projekty
- Archeologie: měření a snímání archeologických památkových oblastí a chráněných objektů, rekonstrukce
- Oceánografie: mapování mořských oblastí, zátok, pobřeží
- Kriminalistika: snímání míst činu, forenzní vyšetřování, simulace dopravních nehod, sledování povrchu silnic
- Medicína: mikrofotogrammetrie a rentgenofotogrammetrie, průběh a výsledky rehabilitace, pokroky v oblasti zubní chirurgie, tvorba protéz
- Ekologie: sledování znečištění přírodních objektů (vodní toky)
- Těžební průmysl: mapování lomových oblastí [24], [28]

2.3.4 Optické měřicí systémy v oblasti tváření kovů

V dnešní době je kladen velký důraz na automobilový průmysl. Rostoucí náklady nejen v tomto odvětví, ale i v dalších strojírenských disciplínách, způsobují stále větší důležitost inovativních metod a opatření. Používají se relativně rozsáhle simulace, které slouží k vytváření pohybových a deformačních modelů, zrychlení, zkvalitnění a zlevnění výroby. Pomocí optických systémů je možné měřit různé rozměrové veličiny, určovat deformační chování materiálu a stanovit vnitřní rozložení napětí. Mezi nejznámější sortiment optických měřících 3D systémů patří ARAMIS, PONTOS a ARGUS od firmy GOM GmbH. [7], [29]

2.3.4.1 ARAMIS

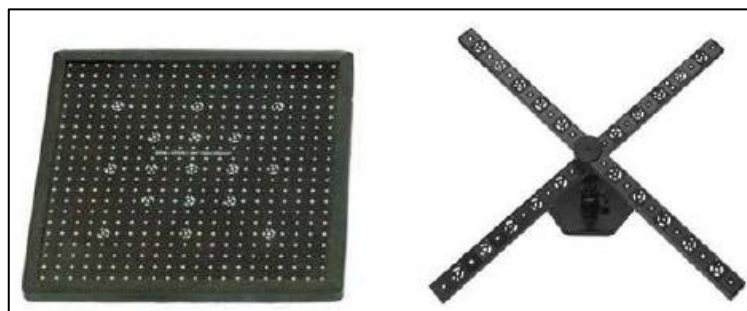
Bezkontaktní optický systém ARAMIS od firmy GOM funguje na principu digitální korelace obrazu, a není omezen výběrem materiálu. Pro měření deformací na povrchu testovaného vzorku se využívá osvědčený postup pomocí diskrétních bodů nebo celoplošného měření. Výstupem takového měření je potom mapa rozložení deformací, které se odlišují barevnou škálou. Velikost testovacího vzorku se pohybuje v řádech od několika milimetrů až po několik metrů. [30]

Pro fotogrammetrické snímání se využívá dvou kamer typu CMOS nebo CCD. Princip zjišťování deformací spočívá v nanesení kontrastního nástřiku (deformační sítě) na povrch měřeného vzorku. Následně dochází k snímání vzorku a rozdělení zkoumané oblasti do menších podoblastí (fazetky), ke kterým jsou jednotlivě přiděleny poměry bílých a černých pixelů. Nástřiky se nanášejí ručně, díky čemuž má každá podoblast svůj originální vzor a je pevně definována. V průběhu měření se vždy navzájem porovnávají podoblasti z referenčního (původního) stavu s podoblastmi v zatíženém stavu. Z výsledku analýzy je možné odvodit posuvy, rychlosti a zrychlení posunutí, deformace, a tvar zdeformovaného vzorku. [30], [31]



Obr.2.23. Bezkontaktní optický systém ARAMIS [30]

Před samotným měřením je nutné systém zkalibrovat, neboť kamery nemají automatické zaostřování. Provádí se pohybem kalibračního objektu skrze nastavený rozsah bodů v ploše nebo objemu, ve které se má konat měření. Na obrázku 2.24. je možné vidět dvě varianty kalibračních objektů (kalibrační destička a kalibrační kříž) využívané pro systém ARAMIS. Nejdříve je potřeba před samotnou kalibrací nainstalovat kamery před zkušební vzorek. Pak je kalibrační objekt držen v prostoru mezi vzorkem a kamerami a je jím pohybováno dle pokynu měřicího systému. [32], [31]



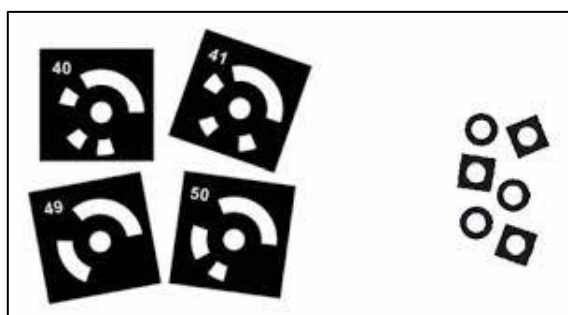
Obr. 2.24. Kalibrační destička – vlevo, kalibrační kříž – vpravo. [32]

2.3.4.2 PONTOS

Pontos je další optický bezkontaktní systém, sloužící pro polohování komponentů, měření deformací a vibrací libovolného počtu referenčních bodů bez závislosti na typu materiálu. Funguje na principu triangulace a je možné jej využít pro analýzu vzorků různých rozměrů (několik milimetrů až několik metrů). 3D zobrazení je realizováno pomocí dvou synchronizovaných snímacích kamer. Objekt musí být nejprve označen optickými body, které jsou v průběhu měření snímány a následně dochází k propočtům jejich souřadnic, posunutí a deformaci každého bodu. V této oblasti se používají dva typy měřicích bodů, konkrétně kódované a nekódované viz obrázek 2.26. Kódované body jsou systémem automaticky rozpoznány a jsou jim udělena binární označení. Naopak u nekódovaných bodů se vyhodnocuje jejich poloha. U tohoto systému je také možné měření online, kdy dochází k okamžitému automatickému vyhodnocování nasnímaných fotek. [30], [31]



Obr. 2.25. Optický bezkontaktní systém PONTOS. [30]



Obr. 2.26. Kódované body – vlevo, nekódované body – vpravo. [33]

2.3.4.3 ARGUS

Bezkontaktní optický systém určený k měření a analyzování deformací plechových součástí, které prošly procesem tváření (např. lisování). Měřením lze získávat data o změně tvaru, velikosti měřených ploch, nebo o hlavním a vedlejším přetvoření. Pomocí těchto zjištěných veličin lze následně optimalizovat tvářecí proces. Výsledky mohou být prezentovány pomocí barevných map vyobrazených přes geometrii měřených ploch. [30]

K měření se využívá fotoaparátů s vysokým rozlišením a se schopností vyhodnocení reálných vzorků. Pro úspěšné aplikování této měřicí metody je opět třeba nanést deformační síť, která se po tvářecí operaci proměruje a vyhodnocuje. Měřit lze jak velké, tak i malé výlisky (až několik metrů). Na základě výsledků je možné sestavit FLD diagram (forming limit diagram) pro porovnání výsledků ze simulací nebo z reálného měření. [30]

3 Experimentální část

3.1 Cíl diplomové práce

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv mají různé rychlosti nárůstu tlaku při hydrostatické zkoušce vyboulováním na zpevnění materiálu, a jakým způsobem ve vzorku dochází k uvolňování napětí a zároveň vzrůstu deformace (relaxaci). Pro experimentální měření byl použit materiál ve formě plechu s označením HX180BD+Z100MCO (označení dle DIN EN 10346), výrobce Voest Alpine Eurostahl GmbH.

Přehled jednotlivých po sobě jdoucích kroků učiněných pro dosažení cíle diplomové práce byl následující:

- 1) Příprava plochých zkušebních tyček pro statickou zkoušku tahem a kulatých vzorků pro bulge test pomocí tabulových nůžek a výstředníkového lisu.
- 2) Provedení statické zkoušky tahem za účelem získání základních materiálových charakteristik a dat o jednoosé napjatosti daného materiálu. Zkouška probíhala na trhacím zařízení v laboratoři mechanických zkoušek a tribologie. Teoretické poznatky k této zkoušce byly představeny v kapitole 2.1.1.
- 3) Příprava vzorků na bulge test nanesením deformačního nástřiku a následná realizace zkoušky na dvojčinném hydraulickém lisu v laboratoři tvářecích procesů. Pro jednotlivé vzorky byly voleny různé řídicí parametry (rychlost deformace, režim s lineárním zatěžováním a zatěžováním s tlakovou výdrží). Teoretické poznatky k bulge testu jsou detailně popsány v kapitole 2.2.2.
- 4) Fotogrammetrické snímání deformací při vyboulovací zkoušce a vyhodnocení naměřených dat pomocí optického bezkontaktního systému Mercury RT od firmy Sobriety s.r.o.
- 5) Nakonec po provedení zmíněných zkoušek a měření byla data za účelem dosažení hlavního cíle vzájemně porovnána a vyhodnocena.

3.2 Testovaný materiál

Pro experimentální část této diplomové práce byl zvolen a použit hlubokotažný plech HX180BD+Z100MCO. Jedná se o válcovaný žárově zinkovaný 0,7 mm tlustý ocelový plech. Vykazuje vysokou pevnost v oblastech tváření za studena.

Vysvětlení značení oceli:

- H - ploché ocelové produkty určené k tváření za studena
- X - způsob válcování (za studena nebo za tepla) nespecifikováno
- 180 - minimální mez kluzu $R_{p0,2}$ v řádech MPa
- B - ocel zpevněná speciálním výrobním procesem
- D - určeno pro žárové pokovování
- Z - povrchová úprava (pozinkováno)
- 100 - minimální množství nanesené ochranné vrstvy zinku v řádech g/m^2
- M - minimalizovaný lesk
- C - chemicky pasivovaný povrch
- O - olejovaný povrch

Popisovaný materiál se vyznačuje základními charakteristiky a chemickým složením uvedeným od výrobce (viz tabulka 3.1. a 3.2).

Tab. 3.1. Mechanické vlastnosti materiálu HX180BD.

	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa] min.	Tažnost A_{80mm} [%] min.	Exponent deformačního zpevnění n_{90} min.	BH [MPa] min.	Plastická anizotropie r_{90} min.
Materiálový list	180 - 240	290 - 360	34	0,16	35	1,5

Tab. 3.2. Chemické složení materiálu HX180BD.

Obsah doprovodných prvků podle hmotnosti [%]							
C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al	Nb max.	Ti max.
0,1	0,5	0,7	0,06	0,025	≤ 0,1	0,09	0,12

3.3 Statická zkouška tahem

Ke zjištění základních materiálových charakteristik byla realizována statická zkouška tahem, specifikována dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Samotná tahová zkouška byla provedena na zkušebním trhacím zařízení TIRAtest 2300 s integrovaným průtahoměrem

3.3.1 Příprava vzorků

Pro tyto zkoušky se používají buď poměrné nebo nepoměrné vzorky, lišící se v tvaru průřezu, kde poměrná má průřez kruhový a nepoměrná průřez obdélníkový. V případě tohoto experimentu byly zvoleny nepoměrné vzorky s obdélníkovým průřezem. Pro přípravu takových vzorků bylo třeba nejprve nastříhat na elektrických tabulových nůžkách MS2004 tabule plechu na dlouhé úzké pásy.



Obr. 3.1. Tabulové nůžky MS2004.

Dále se z pásků na výstředníkovém lisu LEN-P 40 (obr. 3.2.) s upevněným střížným nástrojem nastříhali ploché zkušební vzorky. Ty byly vystříženy ve třech směrech vůči směru válcování, tedy 0° , 45° a 90° , pro každý směr po pěti zkušebních tyčkách.



Obr. 3.2. Výstředníkový lis LEN-P 40.

Bylo také třeba stanovit velikost počátečního průřezu vzorku pro budoucí výpočty materiálových charakteristik, proto bylo pomocí digitálního úchylkoměru MITUTOYO 543-561-1 (obr. 3.3.) naměřeno po deseti hodnotách šířky a tloušťky, ze kterých byl dopočítán aritmetický průměr.



Obr. 3.3. Měření rozměrů zkušební tyčky pomocí úchylkoměru MITUTOYO.

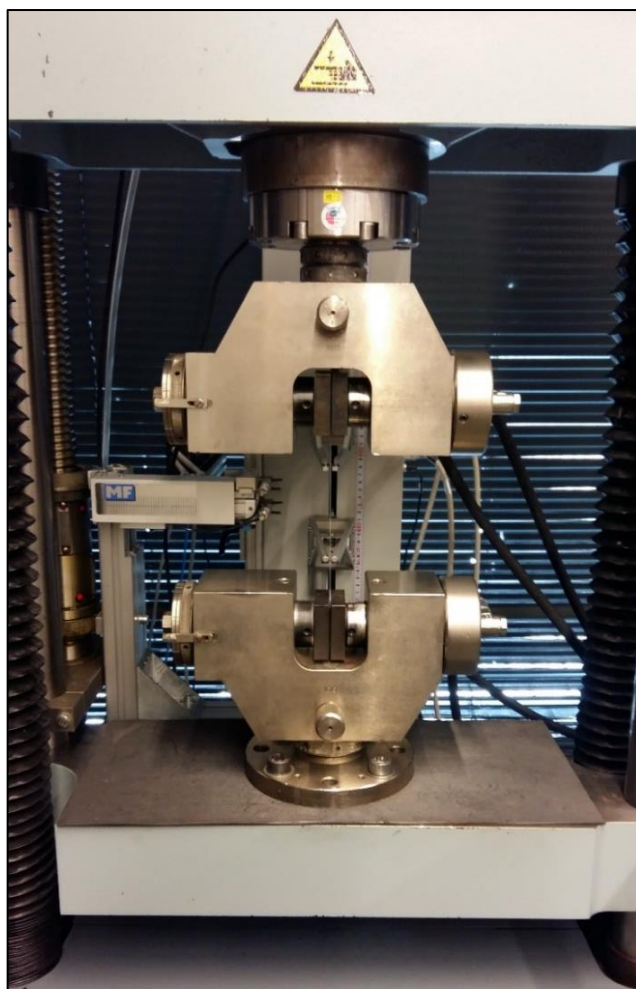
Jako počáteční délka vzorku byla brána měřená délka průtahoměru $L_e = 80$ mm, jak je specifikováno dle normy ČSN EN ISO 6892-1.

Tab.3.3. Rozměry zkušební tyčky.

Měřená délka průtahoměru	80,00 mm
Počáteční průměrná šířka vzorku	0,710 ± 0,003 mm
Počáteční průměrná tloušťka vzorku	20,17 ± 0,02 mm

3.3.2 Vlastní měření

Zkušební vzorky byly postupně upnuty do hydraulicky ovládaných čelistí v ose trhacího zařízení TIRatest 2300 (obr. 3.4.). Po dosažení předepnutí tyčky o velikosti 100 N došlo k automatickému uzavření průtahoměru pro snímání prodloužení vzorku. Po spuštění testu docházelo k zatěžování vzorku silou F a její zaznamenávání v závislosti na prodlužování ΔL . Nastavení parametrů zkoušky, jako je rychlost posuvu příčnicku, bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1.



Obr. 3.4. Upnutý zkušební vzorek v čelistech mechanického zařízení TIRatest 2300.

Zkouška byla ukončena automaticky v okamžiku dosažení nastaveného kritéria poklesu síly o 40 %. U vzorku došlo vždy k porušení materiálu v oblasti tvorby krčku viz obrázek 3.5.



Obr. 3.5. Porušená zkušební tyčka.

3.3.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení

Dalším krokem bylo vyhodnocení tahové zkoušky, které se uskutečnilo pomocí softwaru LabNET. Spočítány byly výsledné hodnoty meze pevnosti v tahu R_m , smluvní meze kluzu v tahu $R_{p0,2}$, Youngova modulu pružnosti E , homogenní tažnosti A_g , tažnosti A_{80mm} . Součinitel normálové anizotropie r byl zjišťován dle normy EN 10113:2020 v rozmezí hodnot deformace při hodnotě deformace $\varepsilon = 12$ až 20 %. Hodnoty koeficientu normálové anizotropie byly měřeny na pěti zkušebních tyčkách od každého směru odebrání, dohromady na patnácti vzorcích. Tyto zjištěné a naměřené hodnoty jsou souhrnně uvedeny v tabulce 3.4 včetně střední směrové hodnoty x_s měřených veličin počítané dle vztahu 3.1 a výběrové směrodatné odchylky spočítané dle vztahu 3.3.

$$x_s = \frac{x_{0^\circ} + 2 \cdot x_{45^\circ} + x_{90^\circ}}{4} \quad (3.1.)$$

x_{0° , x_{45° , x_{90° - hodnoty veličin ve směrech 0° , 45° a 90° vůči směru válcování plechu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.2.)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3.)$$

\bar{x} – střední hodnota výběru

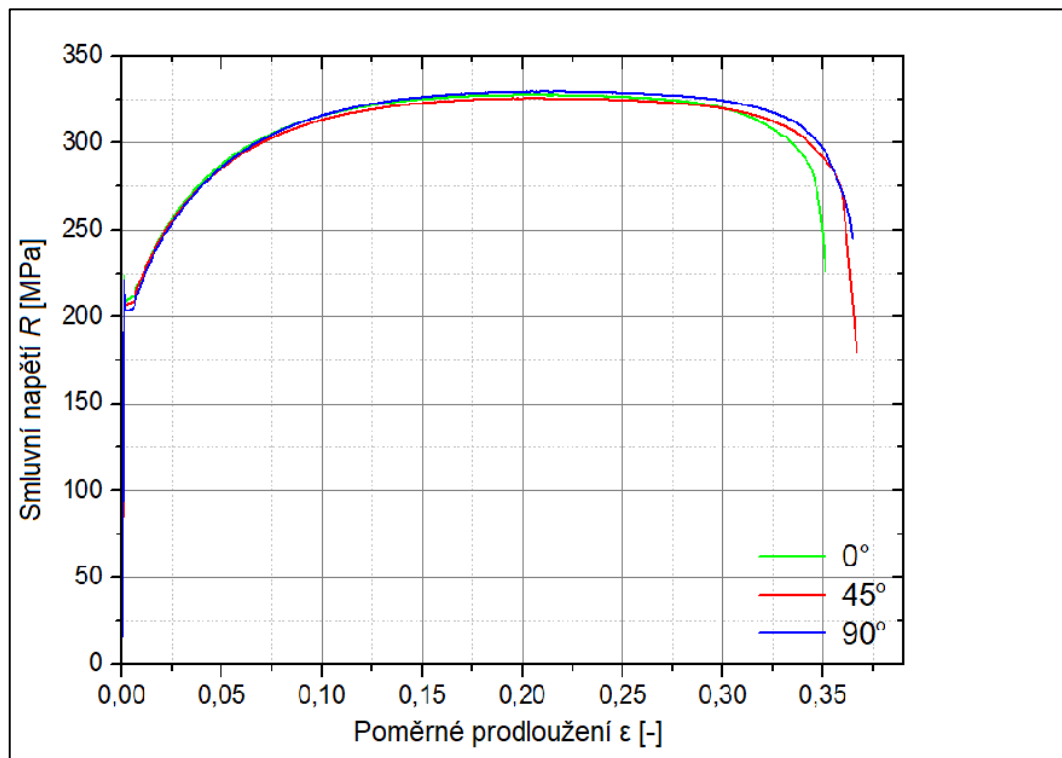
x_i – dílčí hodnota i -tého prvku výběru

n – počet prvků výběru

Tab.3.4 Naměřené mechanické vlastnosti materiálu HX180BD+Z100MCO.

Směr odebrání vzorku	R_{eL} [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	E [MPa]	r [-]
0° s	203,20 0,64	224,03 0,55	329,70 0,35	20,65 0,42	35,92 0,37	198430 1055	1,643 0,016
45° s	207,36 1,39	226,81 1,67	327,88 0,18	20,31 0,47	35,17 0,58	204006 1365	1,615 0,028
90° s	204,97 0,84	219,99 0,98	325,90 0,23	20,61 0,24	36,90 0,84	206210 1141	2,032 0,052
x_s	205,72	224,41	327,84	20,47	35,79	203163	1,726

Diagram, ve kterém program znázornil závislost zatěžující síly na prodloužení zkušební vzorku, se nazývá pracovní diagram. Tyto hodnoty byly přepočítány na diagram smluvní pomocí vzorců 2.1 a 2.10, které jsou uvedeny v kapitole 2.1.1. Příklad charakteristického průběhu statické zkoušky tahem pro jednotlivé směry je vidět na obrázku 3.6. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze.



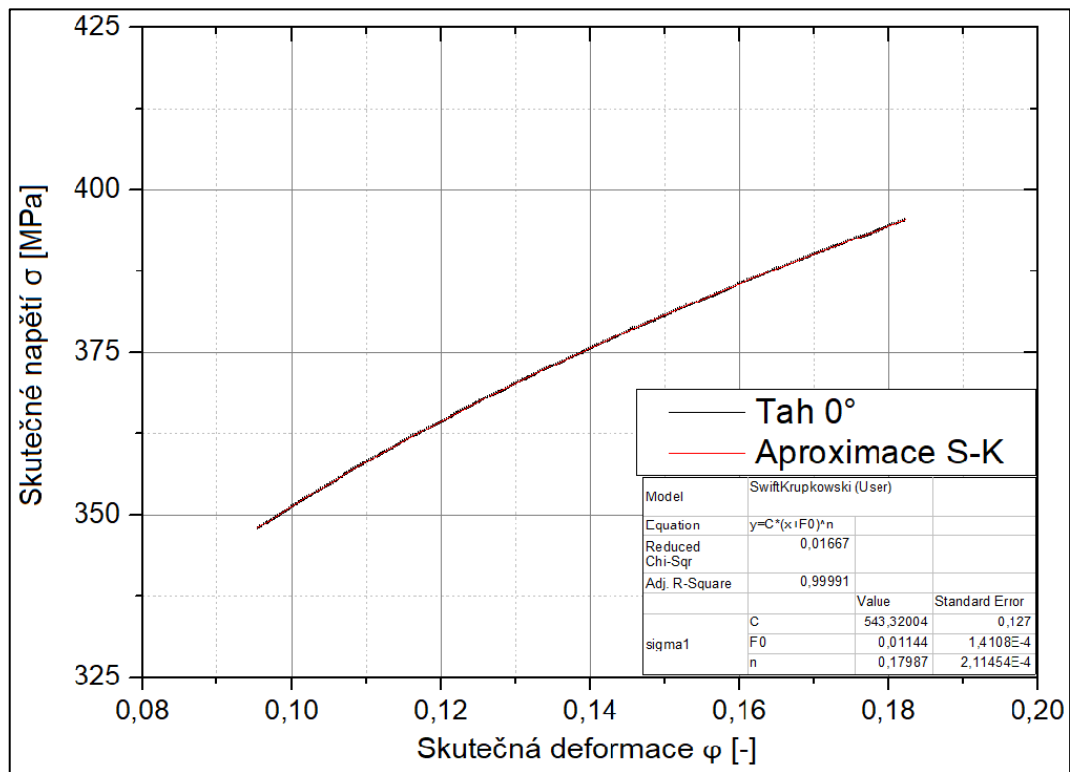
Obr.3.6. Vzájemné porovnání smluvních tahových diagramů naměřených pro vzorky (HX180BD+Z100MCO), odebíraných ve třech směrech vůči směru válcování. Vzorky vykazují rozdílné mechanické vlastnosti v závislosti na zvoleném směru.

Dále pomocí vztahů 2.7 a 2.10, které jsou již popsány v kapitole 2.1.1., proběhl přepočítání smluvního tahového diagramu na skutečný. V programu Origin Pro 9 byla provedena aproximace skutečného tahového diagramu za účelem zjištění deformačního chování materiálu, tedy získání koeficientu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n . Obě tyto hodnoty stanovují tvar aproximační křivky. K aproximaci se dnes velmi často používá Hollomonův aproximační vztah 2.15, uvedený v kapitole 2.1.1., avšak pro přesnější výsledek byl použit matematický vztah s ofsetovou deformací φ_0 podle Swift-Krupkowski, kde aproximovaná křivka neprochází středem souřadného systému, ale protíná osu napětí.

$$\sigma = C \cdot (\varphi + \varphi_0)^n \quad [\text{MPa}] \quad (3.4.)$$

φ_0 [MPa] – ofsetová deformace

Aproximace skutečných tahových diagramů byla provedena v souladu s normou EN 10 130 v rozmezí deformací $\varepsilon = 10$ až 20 %, viz obrázek 3.7.



Obr.3.7. Příklad aproximovaného skutečného diagramu podle matematické funkce Swift-Krupkowski a zjištění deformačních konstant u zkušební vzorku, odebraného ve směru 0°.

Tab. 3.5. Souhrn vypočítaných aproximačních konstant pro vzorky odebíraných ve třech směrech.

Směr odebrání vzorku	C [MPa]	n [-]	ϕ_0 [-]
0°	542,34	0,1788	0,0123
s	0,80	0,0014	0,0009
45°	534,87	0,1754	0,0099
s	0,96	0,0012	0,0006
90°	535,43	0,1807	0,0078
s	3,53	0,0065	0,0044
x_s	536,88	0,1776	0,0100

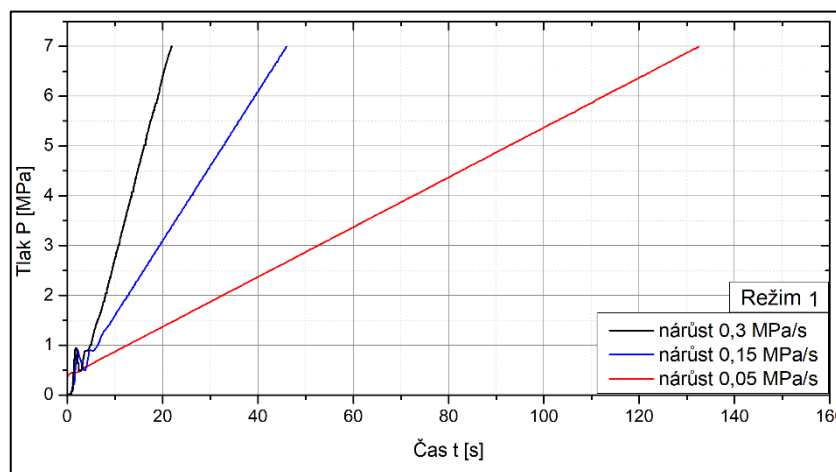
3.4 Bulge test

Oproti statické zkoušce tahem, která slouží ke zjištění materiálových charakteristik působením jednoosého namáhání, u bulge testu dochází ke dvouosému namáhání a tím se i více blíží k reálné průmyslové výrobě.

Jeho velkou výhodou, díky využití tlakového oleje namísto tažníku, je eliminace tření v oblasti vrchlíku, čímž dochází také k rovnoměrnému rozložení deformací. Je to zkouška, která se dnes často využívá i pro definici materiálových modelů v oblasti numerických simulací k popisu diagramů mezních přetvoření nebo k popsání plastického stavu materiálu (popsáno v kapitole 2.1.2).

Tato zkouška probíhala ve více režimech s různými testovacími parametry, které byly pro dosažení cíle této práce zvoleny následovně:

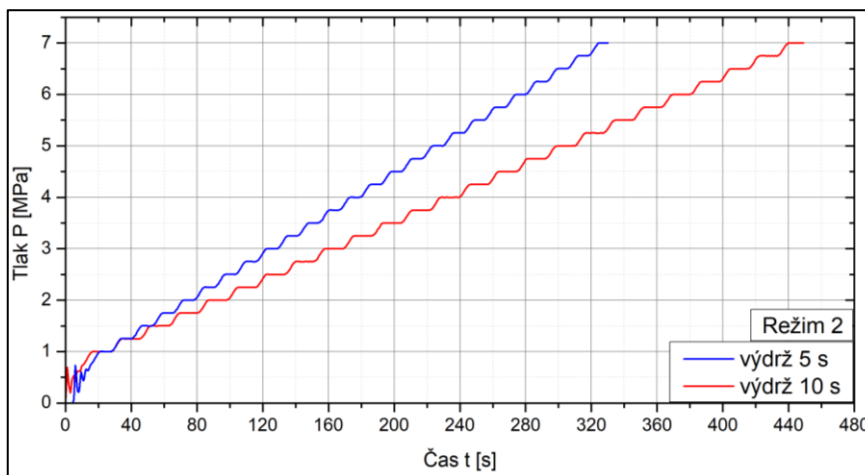
- 1) První režim byl zvolen pro otestování vlivu rychlosti tváření na výsledné křivky zpevnění. Nastaven lineárně zvyšující se tlak se třemi variantami rychlosti nárůstu tlaku 0,05 MPa/s, 0,15 MPa/s a 0,3 MPa/s. Pro každou tuto rychlost bylo otestováno pět vzorků. Průběhy závislosti tlaku na čase tohoto režimu lze pozorovat na obr. 3.8.



Obr.3.8. Charakteristický průběh režimu 1.

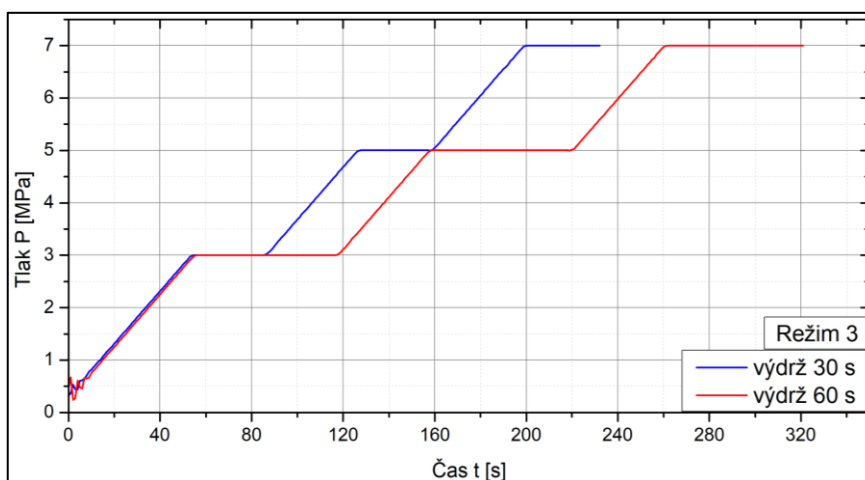
- 2) Druhý režim byl zvolen pro otestování vlivu výdrže na výsledné křivky zpevnění. Závislost tlaku na čase nebyla lineární, ale byly nastaveny časové prodlevy neboli tlakové výdrže (tzv. ramp test). U tohoto režimu byly zvoleny dvě varianty. První s tlakovou výdrží po dobu 5 sekund, druhá varianta s tlakovou výdrží po dobu 10 sekund. Obě tyto varianty měly stejnou rychlost nárůstu tlaku 0,05 MPa/s. Vzrůst tlaku mezi

jednotlivými výdržemi byl nastaven na hodnotu 0,25 MPa, a to z důvodu vytvoření dostatečného množství diskrétních bodů pro vyhodnocení. Pro každou variantu bylo otestováno znovu pět vzorků. Průběhy závislosti tlaku na čase tohoto režimu lze pozorovat na obr. 3.9.



Obr.3.9. Průběhy (tlak-čas) režimu 2.

- 3) Třetí režim byl zvolen pro otestování charakteru relaxace napětí. Pro tento režim byly zvoleny tři tlaky o hodnotě 3, 5 a 7 MPa s variantou dvou časových výdrží 30s a 60s na těchto zvolených hodnotách, pro každou variantu bylo měřeno 5 vzorků. Pro všechny vzorky byl zvolen vzrůst tlaku 0,05 MPa/s. Tyto parametry byly zvoleny tak, aby bylo možné určit trvání relaxace napětí. Průběhy závislosti tlaku na čase tohoto režimu lze pozorovat na obr. 3.10.



Obr.3.10. Průběhy (tlak-čas) režimu 3.

Souhrnný přehled všech těchto tvářecích parametrů je zachycen v tabulce 3.6.

Tab. 3.6. Souhrn vstupních řídicích parametrů Bulge testu.

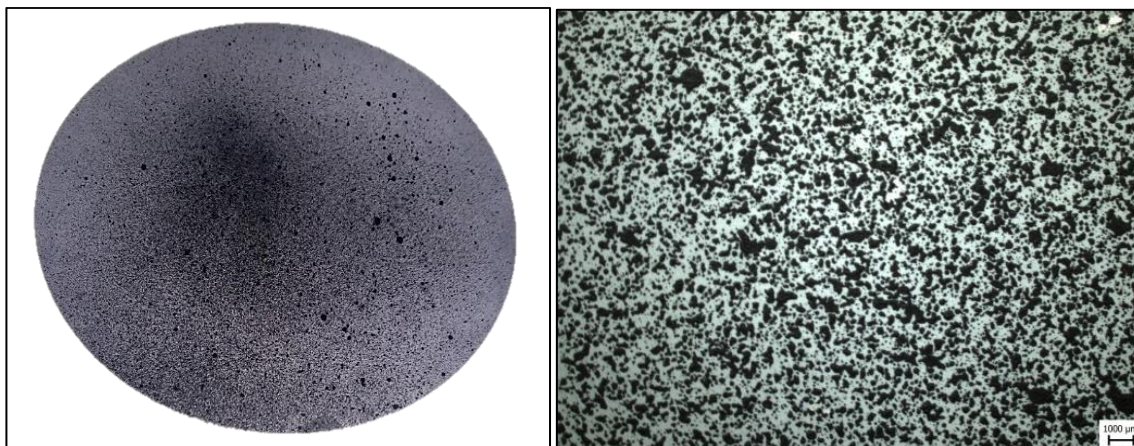
Režim	Rychlost nárůstu tlaku [MPa/s]	Doba výdrže [s]	Vzrůst tlaku mezi výdržemi [MPa]
1	0,03	-	-
	0,15	-	-
	0,05	-	-
2	0,05	5	0,25
	0,05	10	0,25
Režim	Rychlost nárůstu tlaku [MPa/s]	Doba výdrže [s]	Hodnota tlaku s výdrží [MPa]
3	0,05	30	3, 5, 7
	0,05	60	3, 5, 7

3.4.1 Příprava vzorků

Před realizací samotného bulge testu bylo nutné připravit sadu testovacích vzorků. První kroky výroby přístřihů probíhaly obdobně jako u přípravy zkušebních tyček pro statickou zkoušku tahem. I zde bylo nutné nejprve nastříhat pásy plechu pomocí tabulových nůžek a na výstředníkovém lisu s upevněným střížným nástrojem nastříhat kruhové vzorky o průměru 210 mm.

Dalším krokem bylo nanesení tzv. patternu na povrch vzorku (obr. 3.11.) za účelem bezkontaktní analýzy deformace testovaného vzorku pomocí fotogrammetrické metody. Tato metoda vyžaduje vytvoření kontrastního patternu na povrchu vzorku, který následně umožňuje výpočet deformace. Pro vytvoření kontrastního patternu se nejčastěji používá metoda nástřiku dvou barev (bílá a černá). Postup nanášení sítě byl následující. Nejdříve bylo nutné povrch vzorku odmastit pro zajištění přilnavosti patternu. Odmaštění bylo provedeno ve dvou fázích (technickým benzínem a acetonem). Na povrch vzorku byl nastříkán bílý akrylový nástřik tak, aby překryl kompletně barvu původního materiálu v oblasti budoucí deformace. Tloušťka vrstvy musí být co nejtěnější, aby nedošlo k poškození vrstvy při deformaci plechu. Po částečném zaschnutí barvy byla nanesená černá akrylová barva. Díky ní na bílém podkladu vznikl nepravidelný vzor tvořený z černých kapiček, tzv. pattern. Po usušení byl vzorek připraven k testování. Testování musí probíhat ihned po zaschnutí barvy,

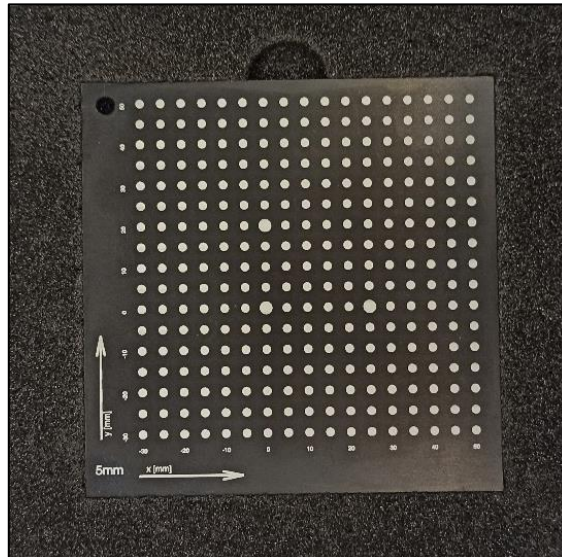
aby nedocházelo k nadměrnému vysychání barev a byla tak zajištěna elasticita petternu.



Obr. 3.11. Připravený vzorek s nanesenou deformační sítí.

3.4.2 Příprava optického systému

Pro analýzu deformace byl použit bezkontaktní systém Mercury RT firmy Sobriety s.r.o. Nejprve bylo potřeba kamery umístit na požadované místo ve stroji. Důležité bylo také zajistit potřebnou vzdálenost a dostatečné osvětlení sledovaného místa takovým způsobem, aby nedošlo k jeho přesvícení nebo naopak podsvícení. Na pracovní plochu byla umístěna kalibrační destička (obr. 3.12.), na které se obě kamery pomocí softwarově zobrazujících se zelených křížků mechanicky zaostří. Pak byly nastaveny příslušené clony na základě intenzity osvětlení se snahou získat stejný výsledek pro obě kamery. Po nastavení clon se přešlo ke kalibraci, čímž se zajistí odpovídající poloha a orientace snímaných bodů (pixelů) ve 3D modelu (maximální povolená chyba je 0,5 pixelu). To bylo provedeno tak, že kalibrační destička s kódovanými body byla podle pokynů softwaru z různých úhlů a vzdáleností nasnímána. Na základě toho byl s určitou přesností vypočítán a definován pracovní objem.



Obr. 3.12. Použitá kalibrační destička.

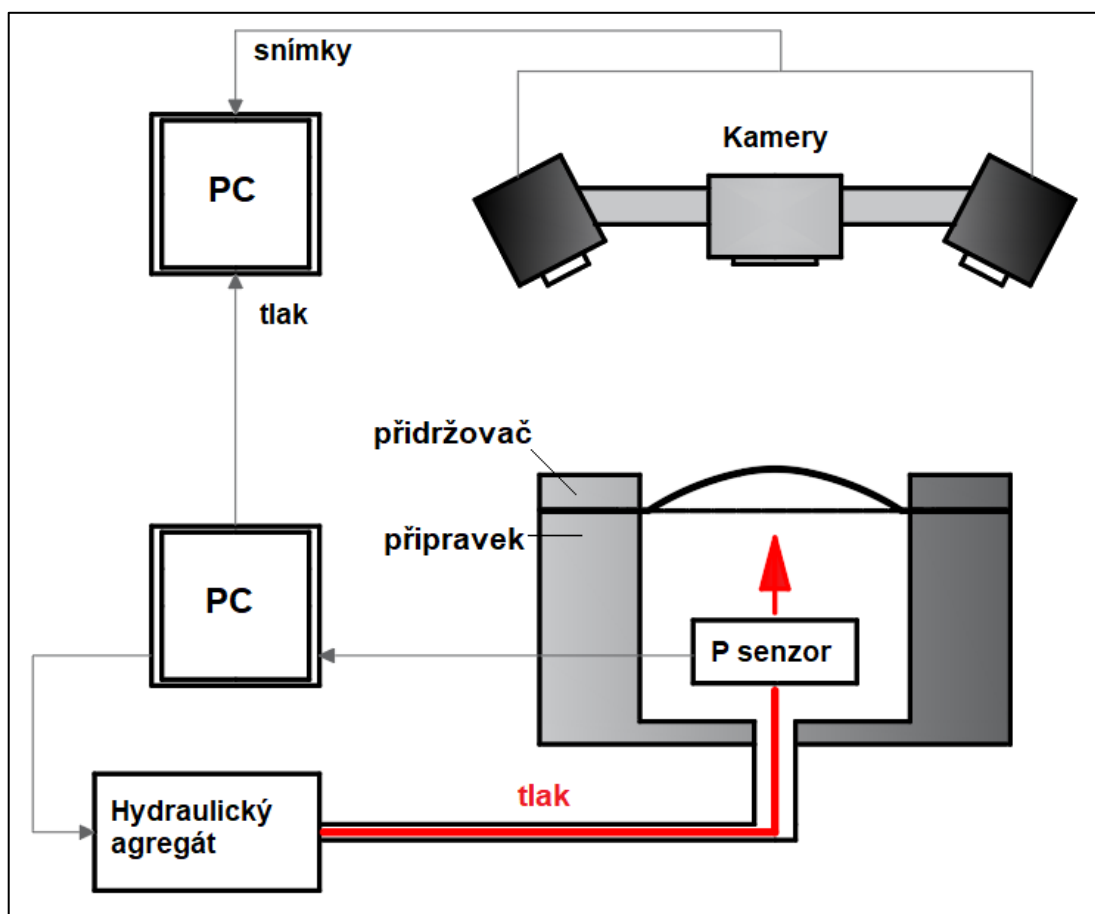
3.4.3 Vlastní měření

Měření probíhalo v prostorách laboratoře tvářecích procesů na Technické Univerzitě v Liberci a bylo provedeno na dvojčinném hydraulickém lisu CBA 300/63 (obr. 3.13). Cílem měření bylo získání křivek zpevnění.



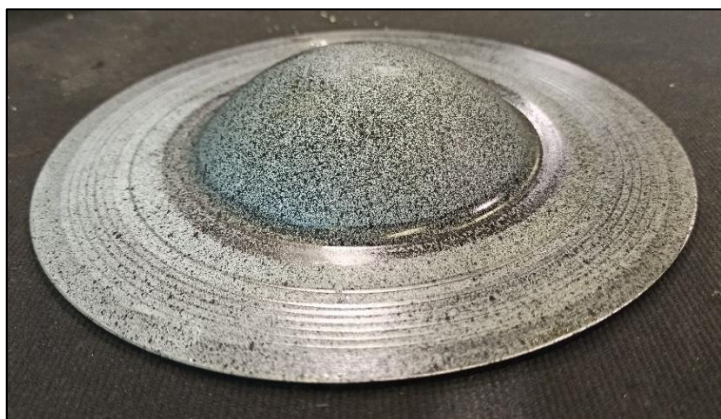
Obr. 3.13. Dvojčinný hydraulický lis CBA 300/63 s připevněnými kamerami.

K zařízení byl připojen notebook, skrze který byl řízen tlak oleje vyvozený hydraulickým agregátem. Na obrázku 3.14. je znázorněno schéma zapojení zařízení.



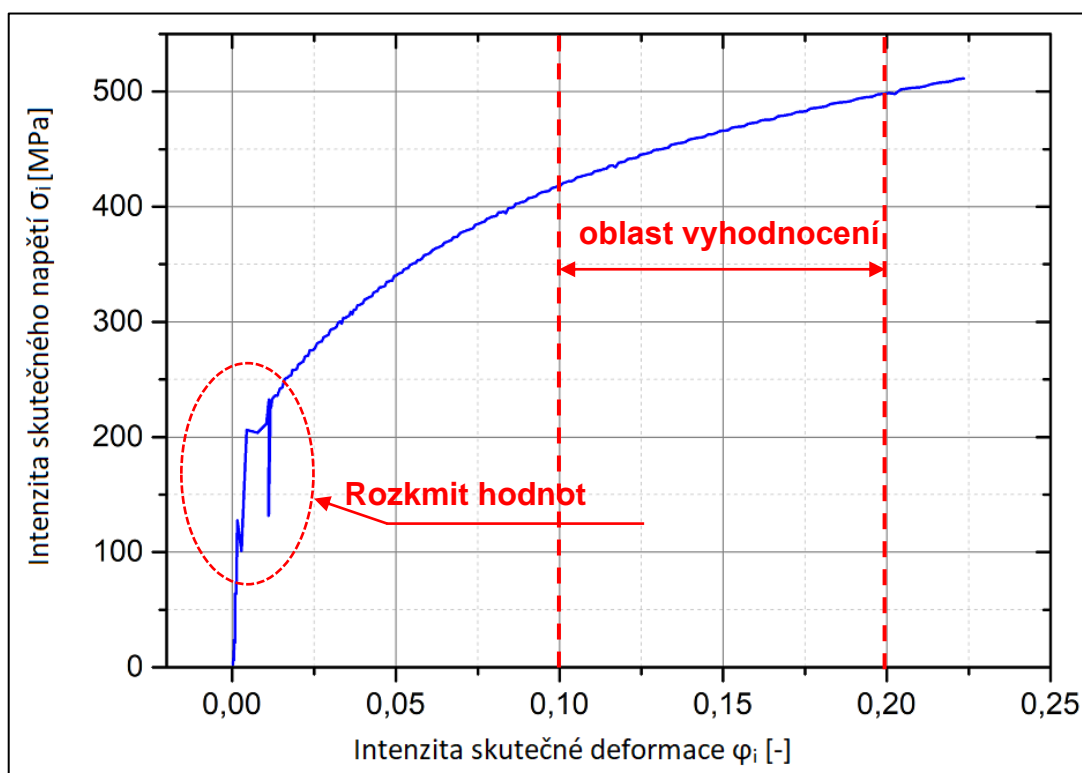
Obr. 3.14. Schéma zapojení bulge testu.

Vzorek byl nejdříve umístěn do přípravku pevně zajištěn pomocí přidržovače. Kamery byly od vzorku odděleny ochranným sklem, aby nedošlo ke kontaktu kamer s tlakovou kapalinou při vzniku praskliny ve vzorku. Poté došlo ke spuštění bulge testu současně s optickým systémem. Tlak oleje se začal řízeně zvyšovat podle předem zadaných parametrů a docházelo k postupnému nárůstu deformace, která byla zachycována na snímky přednastavenou frekvencí 18 Hz. Kritérium pro ukončení testu bylo dosažení hodnoty tlaku 7 MPa, kdy ještě nedocházelo k porušení vzorku, ale vzorek již dosáhl dostatečné deformace (obr. 3.15.).



Obr. 3.15. deformovaný vzorek.

Na začátku každého testu byl do určité hodnoty zaznamenán rozkmit hodnot tlaku, jako je tomu znázorněno na obrázku 3.16. Tento jev byl způsoben PID regulátorem tlaku na hydraulickém agregátu. Tyto počáteční výkyvy hodnot však na výsledek neměly vliv, neboť u křivek zpevnění se vyskytují mimo vyhodnocovaný interval deformací.



Obr. 3.16. Rozkmit hodnot způsobený regulací tlaku.

Data pro deformační analýzu byla dále zpracována pomocí specializovaného softwaru MercuryRT x64 v.2.9. Jak bylo řečeno na začátku kapitoly, bulge test byl proveden za účelem získání křivek zpevnění. Ty se sestavují z hodnot intenzity napětí a intenzity deformace. Všechny vztahy nutné pro tyto výpočty jsou již uvedeny v kapitole 2.2.2.(2.27, 2.28, 2.29, 2.30), avšak pro přehlednost postupu jsou zde vypsány znovu.

Výpočet intenzity napětí:

$$\sigma_i = \sigma_1 - \frac{P}{2} \quad [\text{MPa}]$$

P [MPa] – hydrostatický tlak kapaliny

R_d [mm] – poloměr zaoblení vzorku

t [mm] – aktuální tloušťka plechu

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P \cdot R_d}{2 \cdot t} \quad [\text{MPa}]$$

$$t = t_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad [\text{mm}]$$

t_0 [mm] – počáteční tloušťka vzorku

φ_3 [-] – deformace ve směru tloušťky

Výpočet intenzity deformace:

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{12}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2} \quad [-]$$

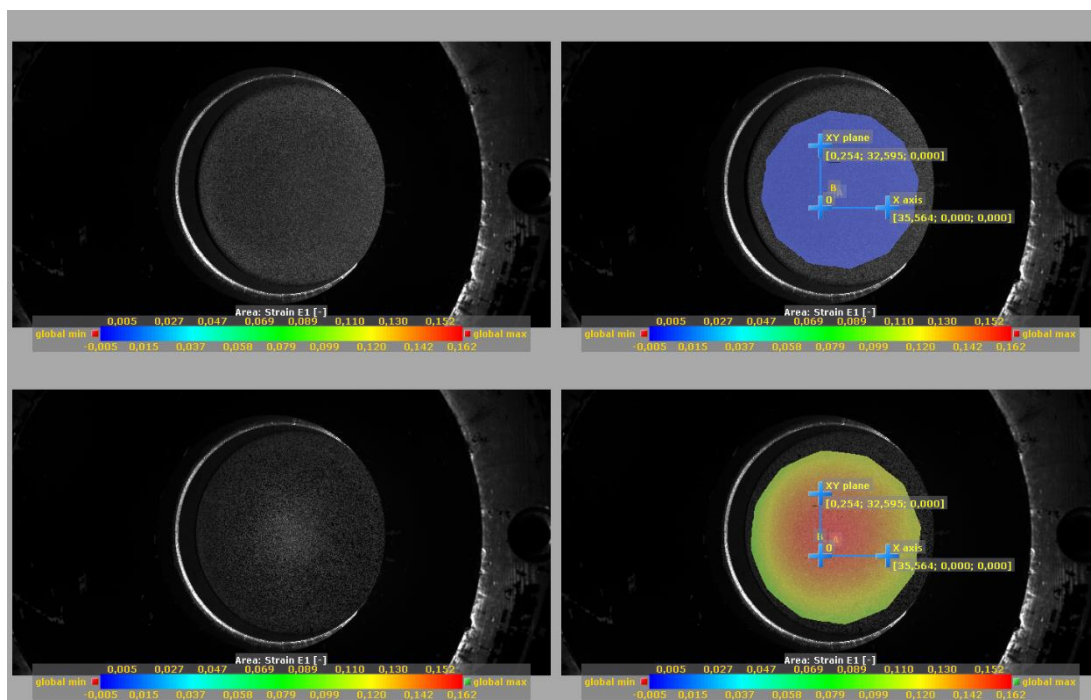
φ_1 [-] – hlavní deformace

φ_2 [-] – vedlejší deformace

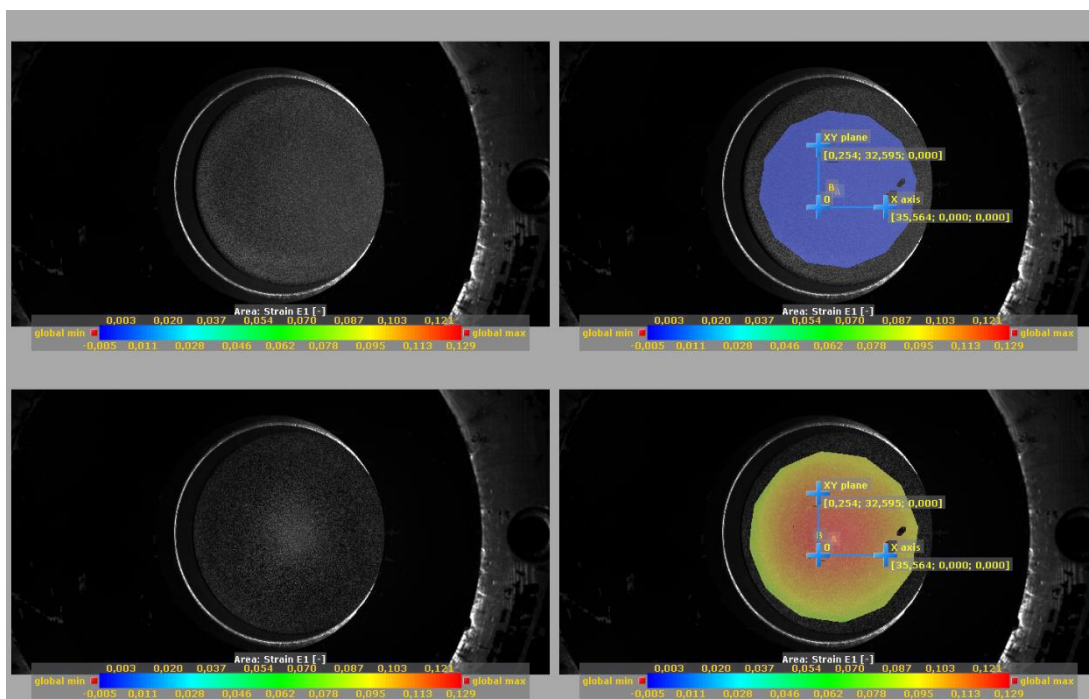
Aby bylo možné vypočítat tyto hodnoty intenzity napětí a deformace, bylo třeba získat tři důležité veličiny (tlak P , poloměr zakřivení R_d a deformace φ_1 , φ_2 a φ_3). Hodnoty tlaku byly získány z tlakového senzoru umístěného pod testovaným vzorkem.

Pro zjištění hodnot deformací a poloměru zakřivení muselo v softwaru dojít nejprve k rozdělení nasnímané oblasti na fazetky s doporučeným nastavením překrytí 30 %. Ke každé takto vytvořené oblasti byl spočítán a přiřazen odstín šedi, na základě kterého bylo možné neustále propočítávat polohu těchto fazetek.

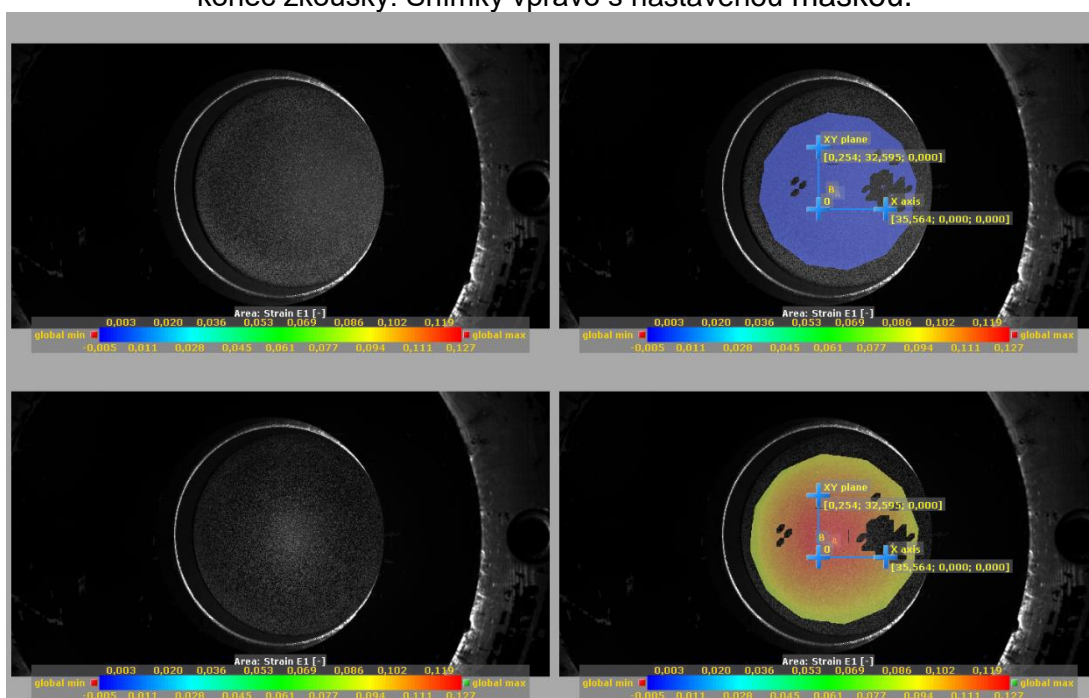
Průběh měření deformace z pohledu kamery je zaznamenán na obrázcích 3.17., 3.18. a 3.19. Jsou zde ukázány příklady všech tří režimů měření, pro každý režim dvě dvojice snímků (počátek a konec zkoušky). Aby bylo v softwaru možné provést potřebné výpočty, bylo také třeba na prvních snímcích vyfocených na počátku zkoušky určit oblast, na které měl výpočet probíhat. Tato oblast se nazývá maska a lze ji na obrázku pozorovat vždy na snímku vpravo jako barevnou označenou plochu. Konkrétní barva v oblasti označuje globální hodnotu plošné deformace. Měřená oblast byla dále rozdělena na dva sektory A a B. Sektor A je celá oblast označená maskou, která se díky velkému množství naměřených bodů použila pro výpočet poloměru zakřivení. Sektor B je malá oblast uprostřed vzorku, ze které byly získány hodnoty hlavní a vedlejší deformace, a díky tomu byla i dopočítána aktuální tloušťka plechu.



Obr. 3.17. Režim 1. Vrchní dvojice snímků – začátek zkoušky, spodní dvojice snímků – konec zkoušky. Snímky vpravo s nastavenou maskou.



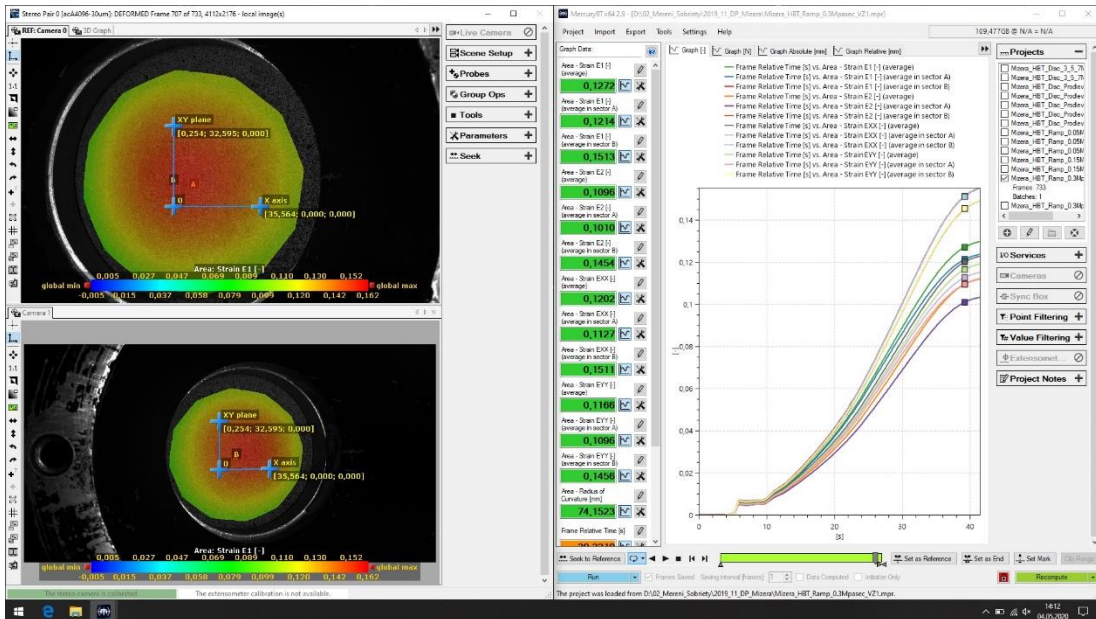
Obr. 3.18. Režim 2. Vrchní dvojice snímků – začátek zkoušky, spodní dvojice snímků – konec zkoušky. Snímky vpravo s nastavenou maskou.



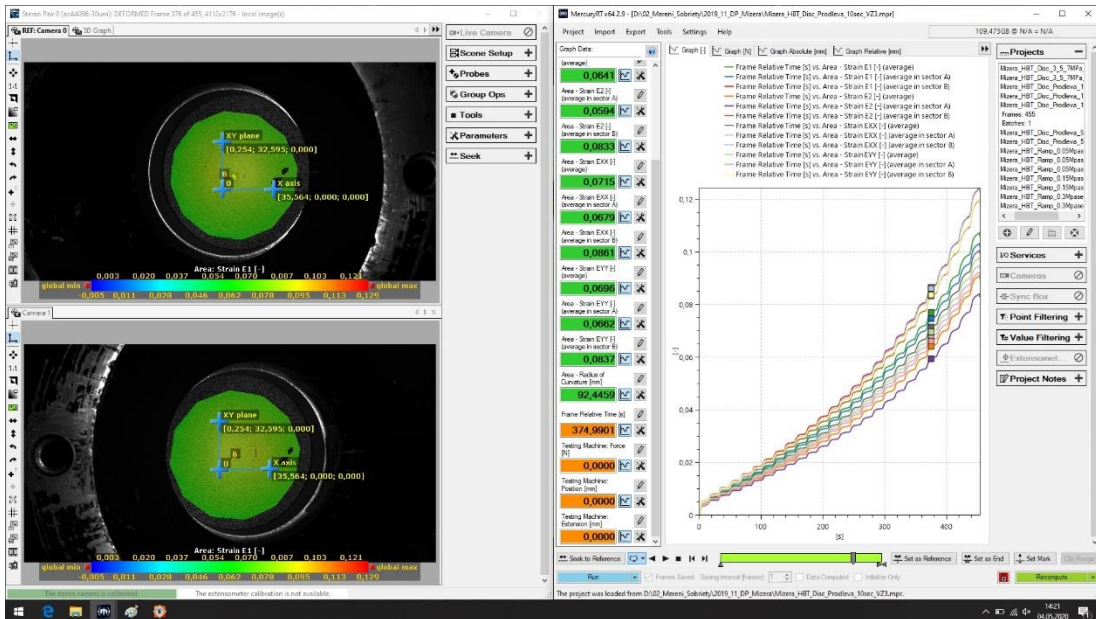
Obr. 3.19. Režim 3. Vrchní dvojice snímků – začátek zkoušky, spodní dvojice snímků – konec měření. Snímky vpravo s nastavenou maskou.

Na obrázku 3.19 na snímku z konce měření v oblasti masky jsou patrná místa, která se softwaru označit nepodařila. Způsobeno to bylo pravděpodobně nerozpoznáním části patternu, avšak na výsledek to zásadní vliv nemělo.

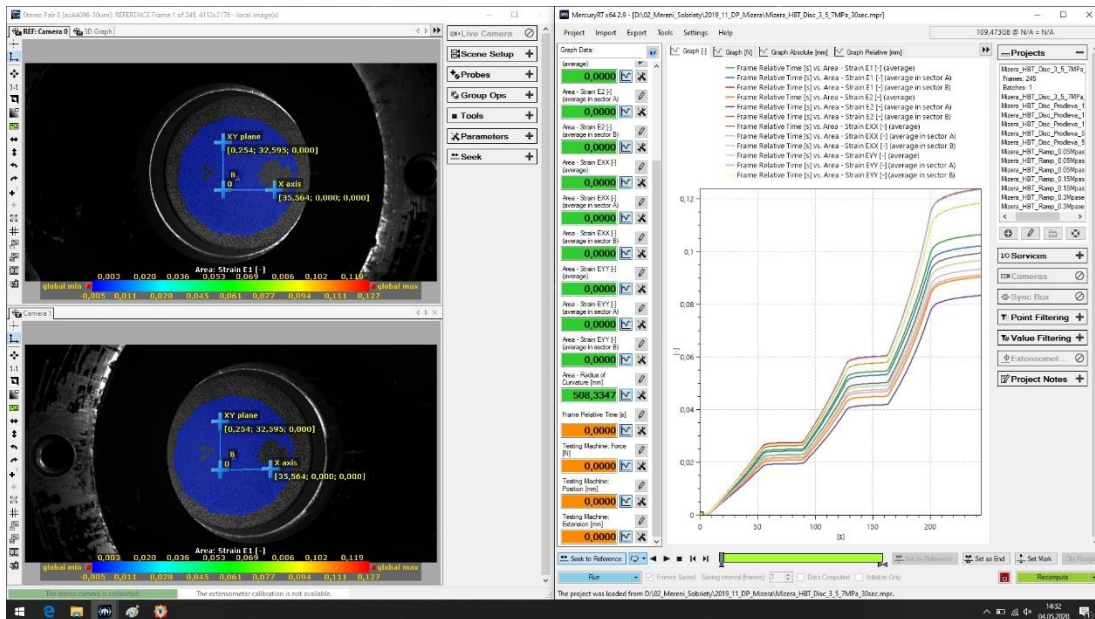
Na obrázcích 3.20., 3.21. a 3.22 lze vidět pracovní prostředí zmiňovaného softwaru MercuryRT x64 v.2.9. U každého je graficky znázorněný průběh závislosti deformace na čase. I zde je vidět velký rozdíl mezi třemi režimy.



Obr. 3.20. Režim 1. Pracovní prostředí MercuryRT x64 v.2.9.

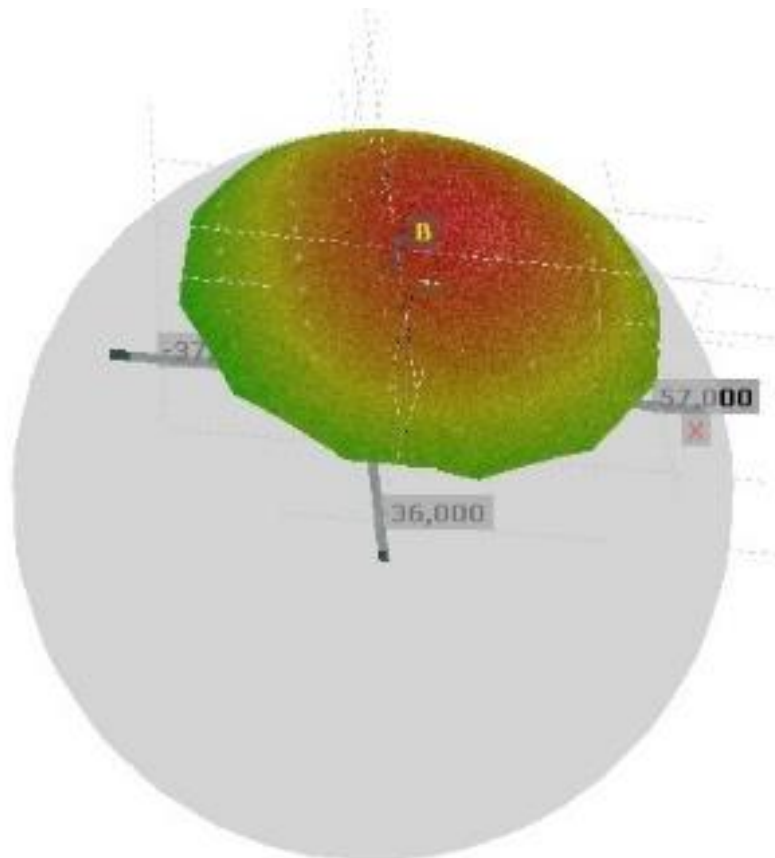


Obr. 3.21. Režim 2. Pracovní prostředí MercuryRT x64 v.2.9.



Obr. 3.22. Režim 3. Pracovní prostředí MercuryRT x64 v.2.9.

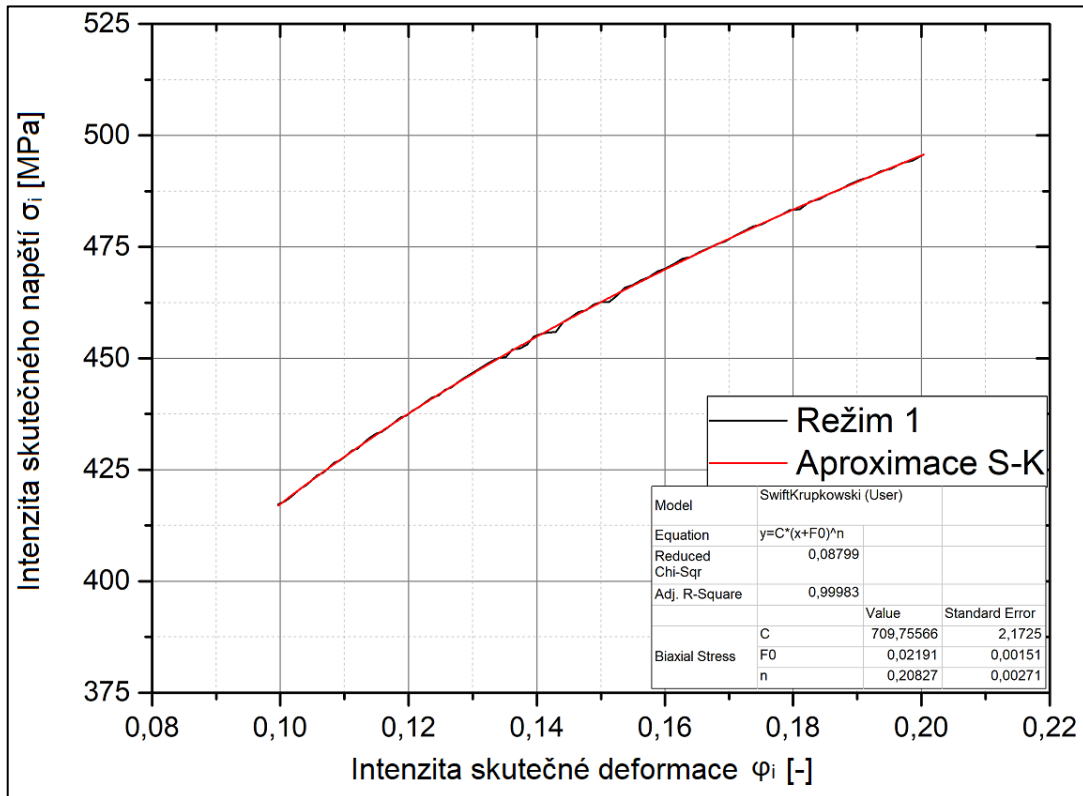
Poloměr zaoblění R_d byl získán doplněním měřených bodů ze sektoru A na vytvořenou sféru, viz obrázek 3.23.



Obr. 3.23. Zjišťování poloměru zaoblění deformovaného vzorku pomocí vytvořené sféry.

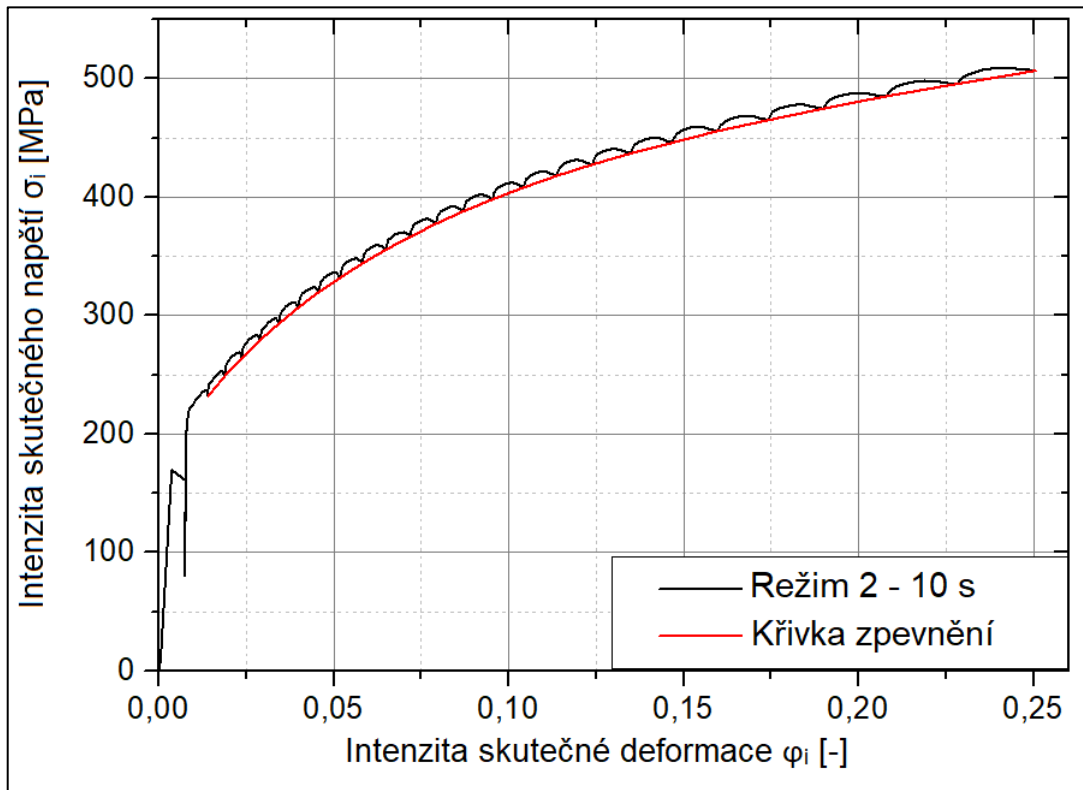
Dalším krokem bylo zpracovat naměřená data v programu Origin Pro 9 a vytvořit grafické průběhy křivek zpevnění pro jednotlivé zkušební vzorky.

Aby mohly být získány hodnoty C , n a φ_0 , pro dvouosé namáhání a lepší porovnání průběhů zpevnění, došlo i zde k proložení aproximujícími křivkami podle matematické funkce Swift-Krupkowski v intervalu deformací $\varphi_i \in \langle 0,1;0,2 \rangle$. Příklad průběhu křivky zpevnění charakteristického pro režim 1 je znázorněn na obrázku 3.24.



Obr. 3.24. Ukázka křivky zpevnění aproximované funkcí Swift-Krupkowski pro biaxiálně testovaný vzorek (režim 1 – nárůst 0,05 MPa/s).

V případě režimu 2 musel být pro tvorbu křivky zpevnění zvolen trochu odlišný postup. Bylo nezbytné najít všechny hodnoty intenzity napětí a deformace v bodech, kde končila každá jednotlivá tlaková výdrž. Všechny tyto diskrétní body byly pak proloženy křivkou (obr. 3.25.), která je výslednou křivkou zpevnění a lze ji aproximovat.

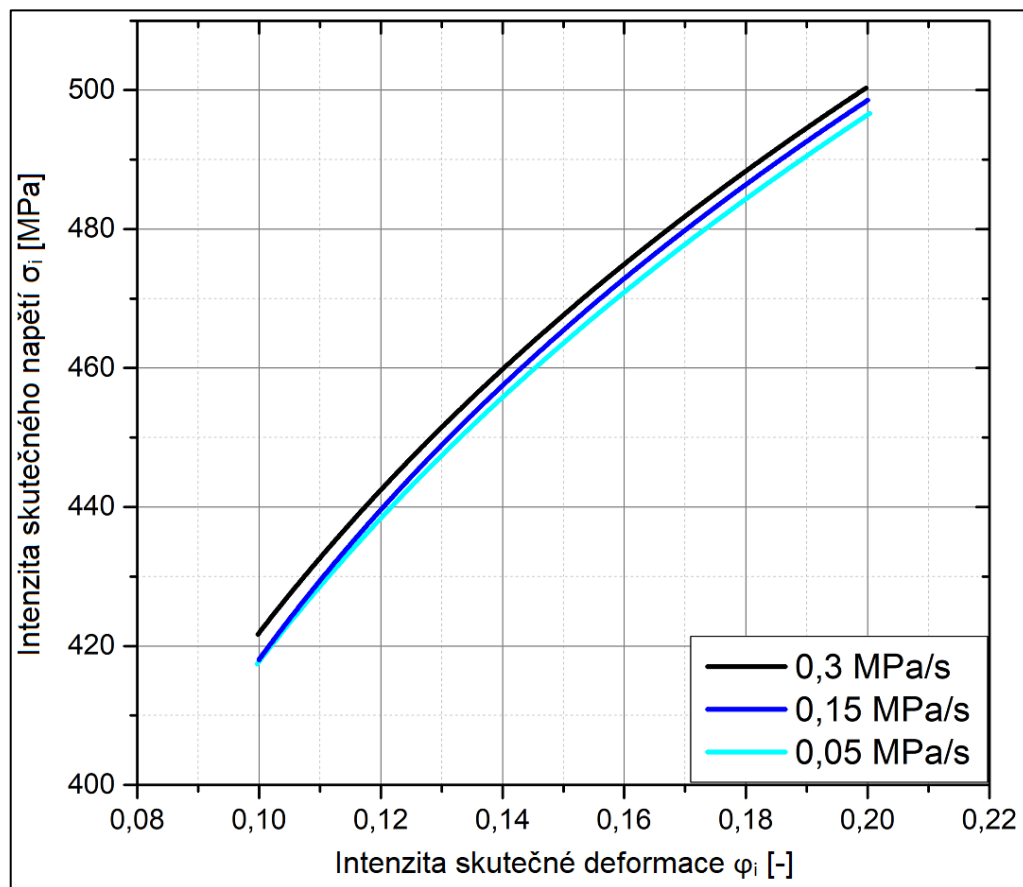


Obr. 3.25. Ukázka tvorby křivky zpevnění v případě režimu 2.

3.5 Výsledky měření

3.5.1 Režim 1

V rámci režimu 1 jsou na obrázku 3.26. uvedeny průměrné křivky zpevnění za každou zvolenou rychlost nárůstu tlaku (0,3 MPa/s, 0,15 MPa/s a 0,05 MPa/s). Při porovnání křivek je patrné, že k větší míře zpevnění dochází u vzorků testovaných při rychlejších nárůstech tlaku. Intenzity napětí a deformací pro sestavení grafů byly analogicky získány podle postupu popsaného v předešlé kapitole.



Obr. 3.26. Porovnání vlivu třech různých rychlostí nárůstu tlaku na výslednou křivku zpevnění.

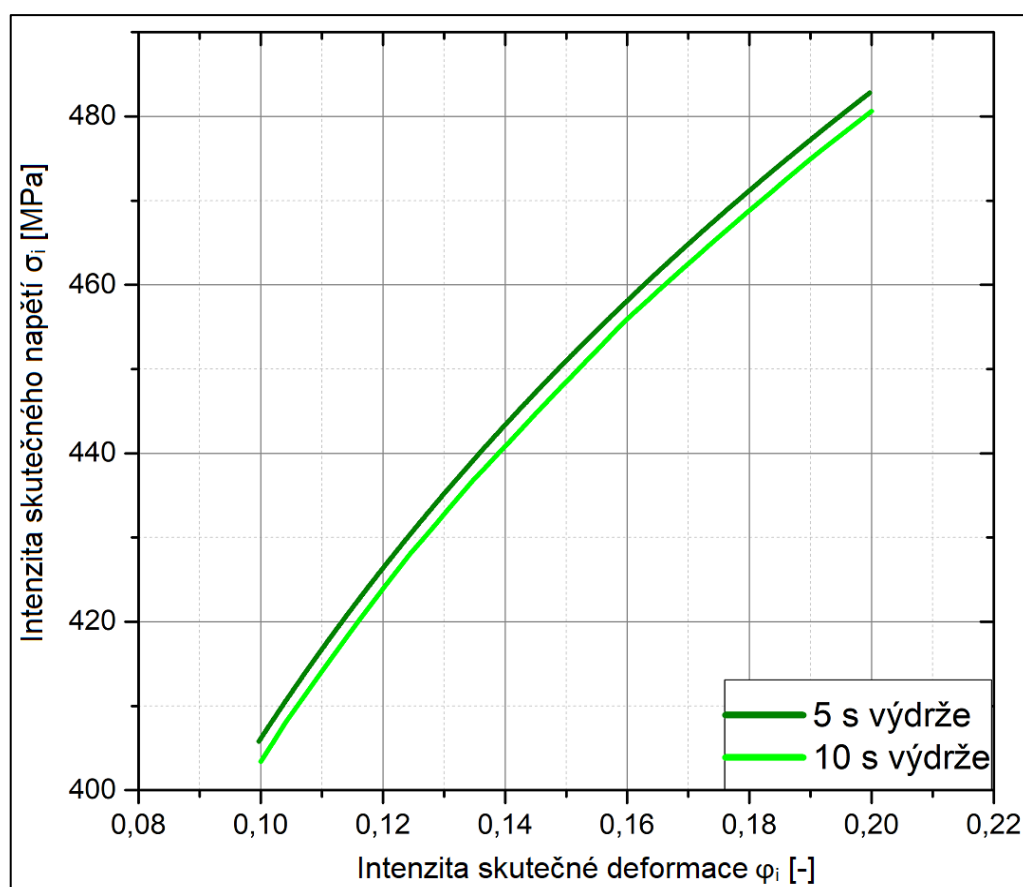
Výsledné hodnoty koeficientu monotónního zpevnění C , exponentu deformačního zpevnění n a osetové deformace ϕ_0 jsou uvedeny v tabulce 3.7.

Tab. 3.7. Přehled zjištěných parametrů C , n a φ_0 pro režim 1.

Parametry zkoušení vzorku	C [MPa]	n [-]	φ_0 [-]
0,3 MPa/s	711,61	0,2022	0,0246
s	1,26	0,0025	0,0005
0,15 MPa/s	708,92	0,1993	0,0295
s	1,31	0,0011	0,0045
0,05 MPa/s	706,14	0,1991	0,0280
s	0,99	0,0015	0,0023

3.5.2 Režim 2

Průměrné křivky zpevnění pro vzorky testované v režimu 2 pomocí tzv. ramp testu, kdy v průběhu měření vždy po vzrůstu tlaku o 0,25 MPa nastala 5s nebo 10s výdrž, jsou graficky porovnány na obrázku 3.27. K výraznějšímu zpevnění materiálu došlo u vzorků s 5s výdržemi.



Obr. 3.27. Porovnání vlivu dvou dob trvání tlakových výdrží na výslednou křivku zpevnění.

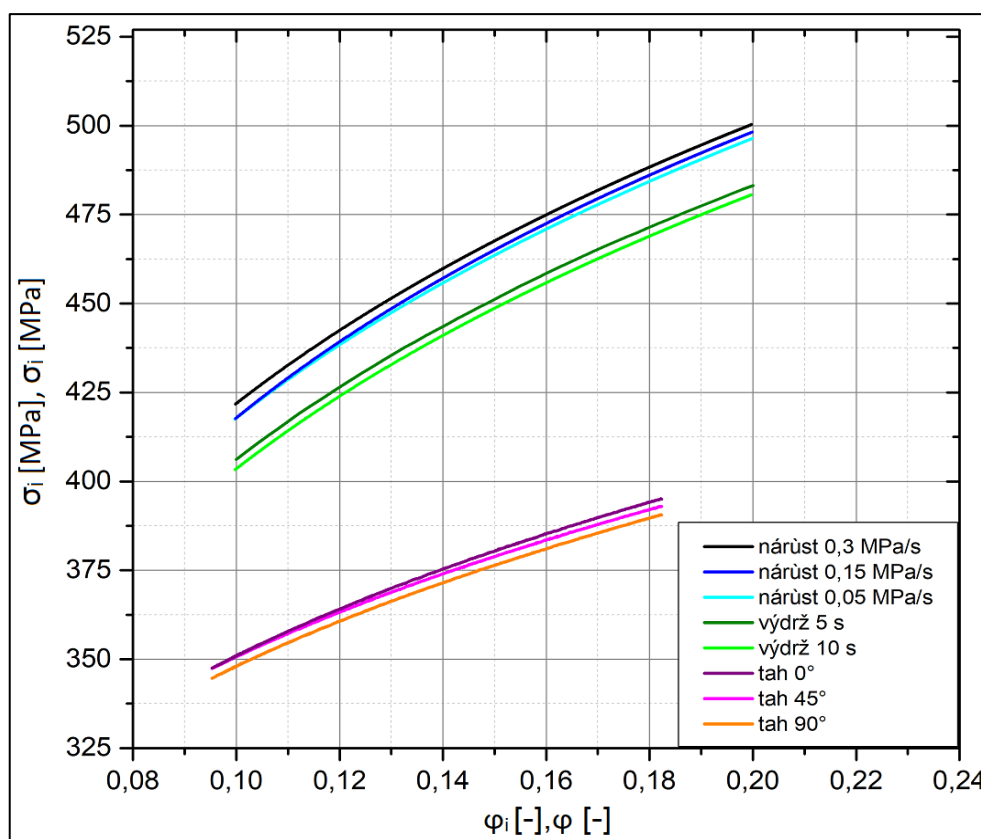
Výsledné hodnoty koeficientu monotónního zpevnění C , exponentu deformačního zpevnění n a ofsetové deformace φ_0 pro režim 2 jsou uvedeny v tabulce 3.8.

Tab. 3.8. Přehled zjištěných parametrů C , n a φ_0 pro režim 1

Parametry zkoušení vzorku	C [MPa]	n [-]	φ_0 [-]
výdrž 5 s	687,27	0,2012	0,0268
s	1,89	0,0012	0,0016
výdrž 10 s	684,23	0,2003	0,0283
s	1,38	0,0005	0,0018

3.5.3 Režim 1, 2 a statická zkouška tahem

Pro názorné porovnání křivek zpevnění, jak z hlediska zvolených testovacích režimů 1 a 2 (kontinuální průběh a ramp test), tak i z hlediska jednoosého a dvouosého napětí (bulge test, statická zkouška tahem), byl vytvořen graf se všemi zmíněnými křivkami zpevnění viz obr. 3.28.



Obr. 3.28. Porovnání křivek zpevnění pro jednoosou napjatost (statická zkouška tahem) a dvouosou napjatost (režim 1 a 2).

Při porovnání křivek namáhaných na dvouosé napětí oproti jednoosému je zřejmé mnohem výraznější zpevnění materiálu. Vysoké hodnoty exponentu deformačního zpevnění n svědčí o rovnoměrném rozložení deformací při vyboulování. Nejvíce se mechanicky zpevňuje materiál testovaný v režimu 1 s rychlostí nárůstu tlaku 0,3 MPa/s. Dosahuje hodnot koeficientu monotónního zpevnění C téměř o 180 MPa větších, než je tomu u vzorků testovaných na jednoosý tah.

Při vzájemném porovnání režimů 1 a 2 je patrné, že vzorky testované s nastavenými tlakovými výdržemi dosahují nižších hodnot koeficientu C , přibližně až o 30 MPa. To může být způsobeno vlivem relaxace napětí (relaxace bude řešena v další kapitole) během 5s nebo 10s výdrží a zároveň nižší rychlostí nárůstu tlaku, která jak se ukázalo u vyhodnocení režimu 1 má vliv na zpevnění materiálu.

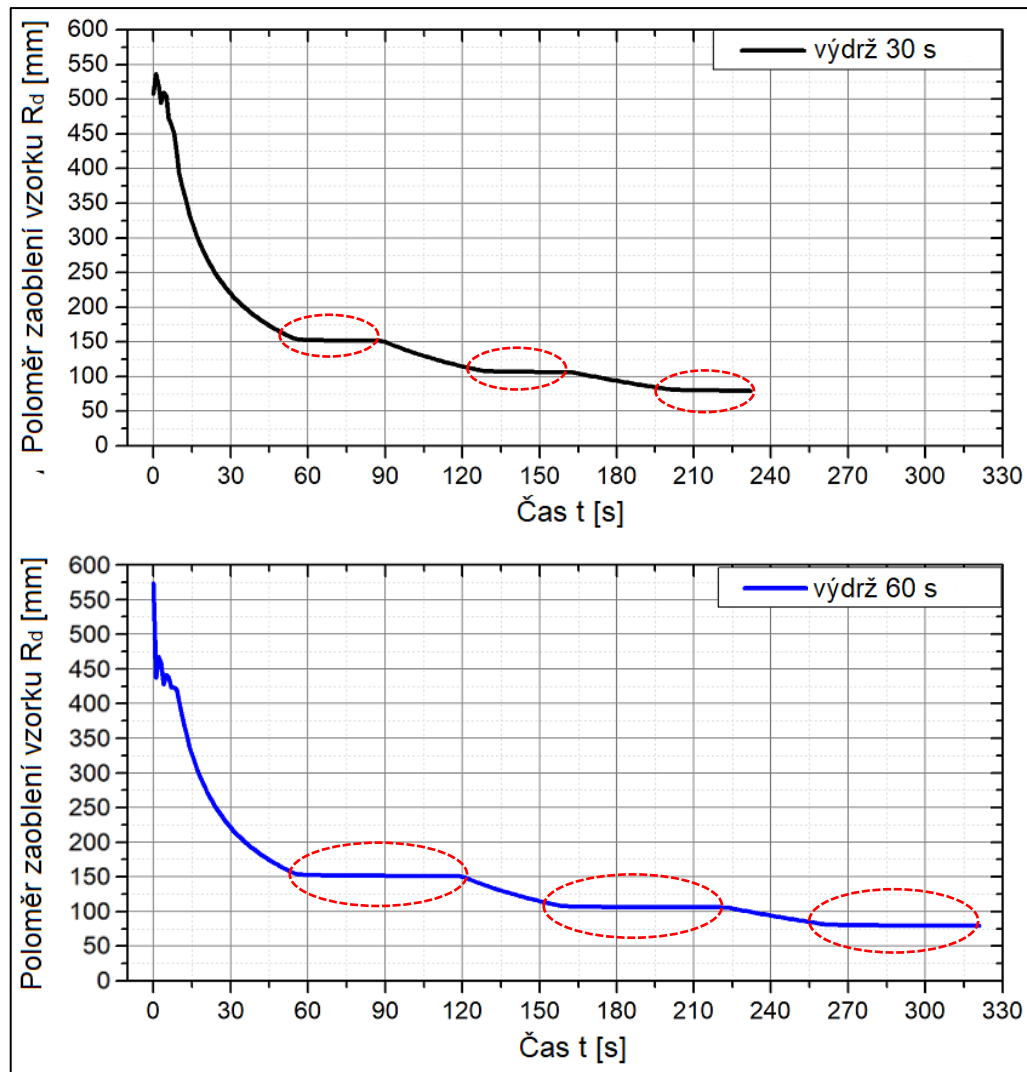
Souhrnný přehled zjištěného koeficientu C , n a ofsetové deformace φ_0 je uveden v tabulce 3.9.

Tab. 3.9. Souhrn zjištěných aproximačních koeficientů (koeficientu monotónního zpevnění C , exponent deformačního zpevnění n a ofsetová deformace φ_0).

Bulge test				
Způsob zkoušení	Parametry zkoušení vzorku	C [MPa]	n [-]	φ_0 [-]
Kontinuální nárůst tlaku	0,3 MPa/s s	711,61 1,26	0,2022 0,0025	0,0246 0,0005
	0,15 MPa/s s	708,92 1,31	0,1993 0,0011	0,0295 0,0045
	0,05 MPa/s s	706,14 0,99	0,1991 0,0015	0,0280 0,0023
Nárůst tlaku s výdržemi	výdrž 5 s s	687,27 1,89	0,2012 0,0012	0,0268 0,0016
	výdrž 10 s s	684,23 1,38	0,2003 0,0005	0,0283 0,0018
Statická zkouška tahem				
	Směr válcování	C [MPa]	n [-]	φ_0 [-]
	0° s	542,34 0,80	0,1788 0,0014	0,0123 0,0009
	45° s	534,87 0,96	0,1754 0,0012	0,0099 0,006
	90° s	535,43 3,53	0,1807 0,0065	0,0078 0,0044

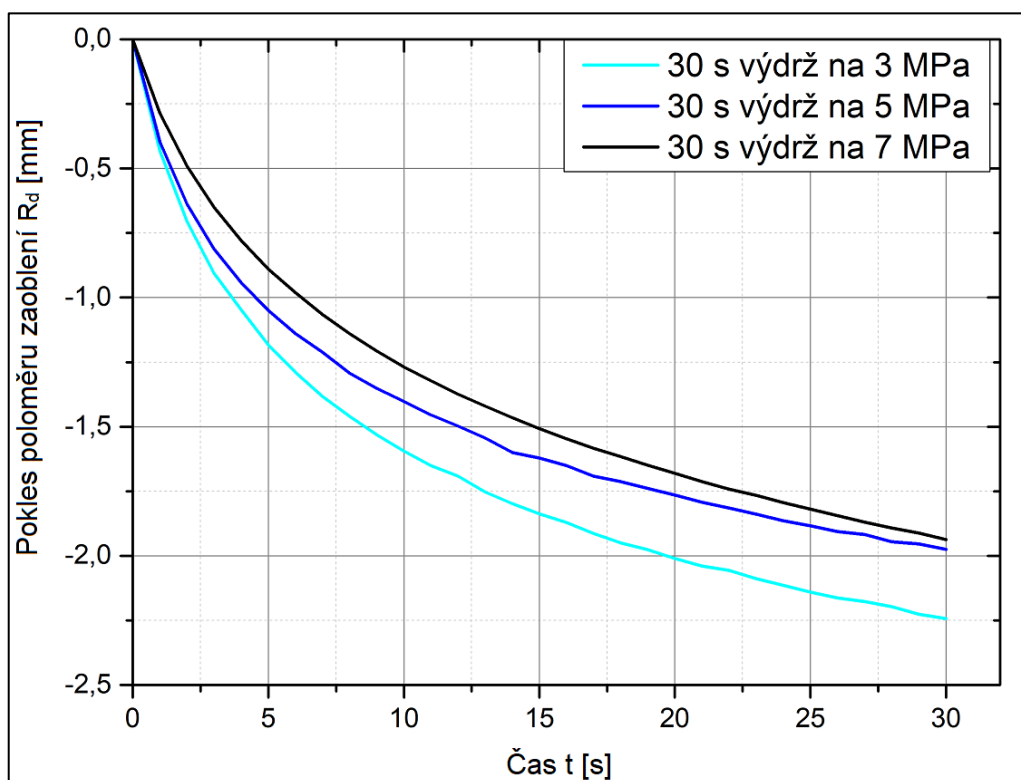
3.5.4 Režim 3

Režim 3 proveden za účelem zjištění relaxačního chování materiálu během 30s a 60s dlouhých výdrží na hodnotách 3, 5 a 7 MPa. Tyto zkoumané oblasti jsou označeny v grafech, které znázorňují, jak se vyboulováním vzorků od začátku spuštění bulge testu zmenšoval jejich poloměr zaoblění (obr. 3.29).

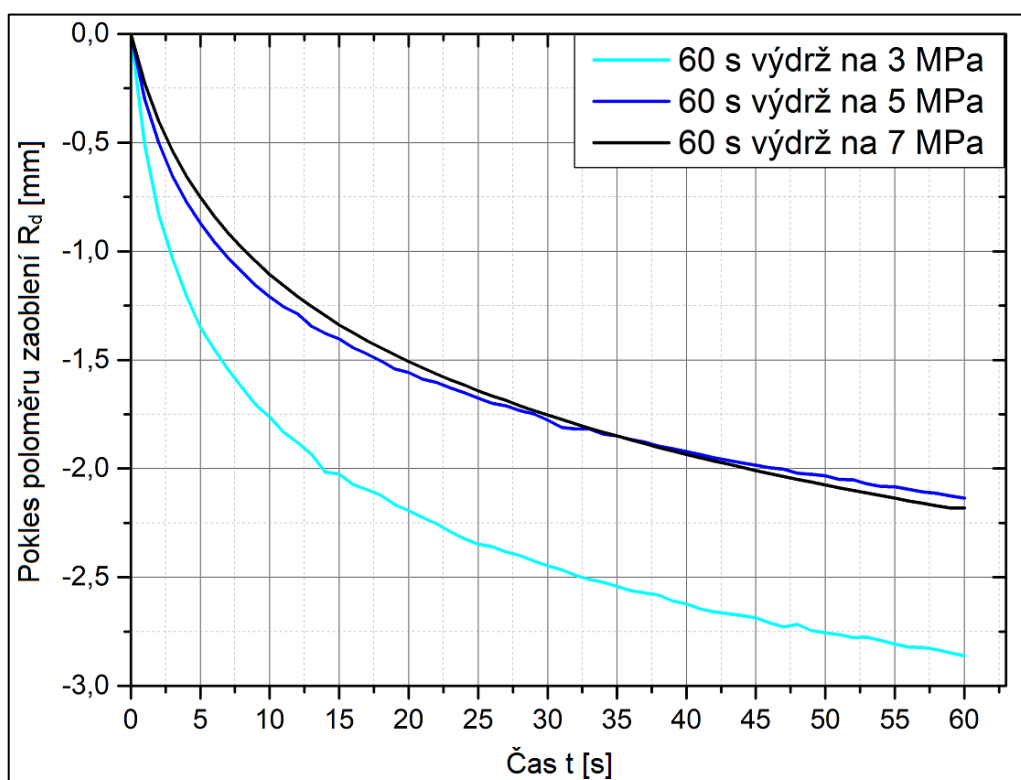


Obr. 3.29. Závislost změny poloměru zaoblění za čas. Červeně jsou zde označeny oblasti zkoumaných tlakových výdrží.

Tyto označené oblasti jsou blíže znázorněny na obrázcích 3.30. a 3.31., které ukazují grafickou závislost poklesu poloměru zaoblění během dané délky trvání výdrže. Zde je možné vidět, že tvary křivek jsou exponenciálního charakteru. K nejintenzivnějšímu poklesu poloměru zaoblění dochází vždy zhruba v prvních pěti sekundách trvání výdrže. K největšímu celkovému poklesu poloměru dochází v obou případech grafů u první výdrže na hodnotě tlaku 3 MPa.



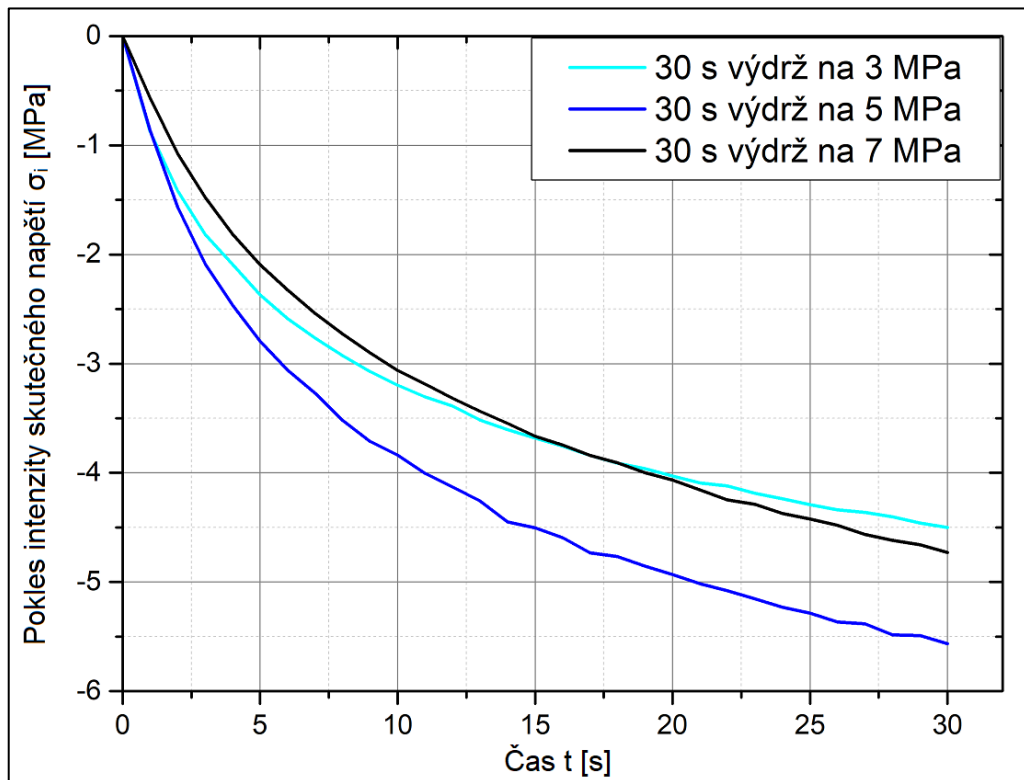
Obr. 3.30. Změna poloměru zaoblění během 30 s při výdržích na 3, 5 a 7 MPa.



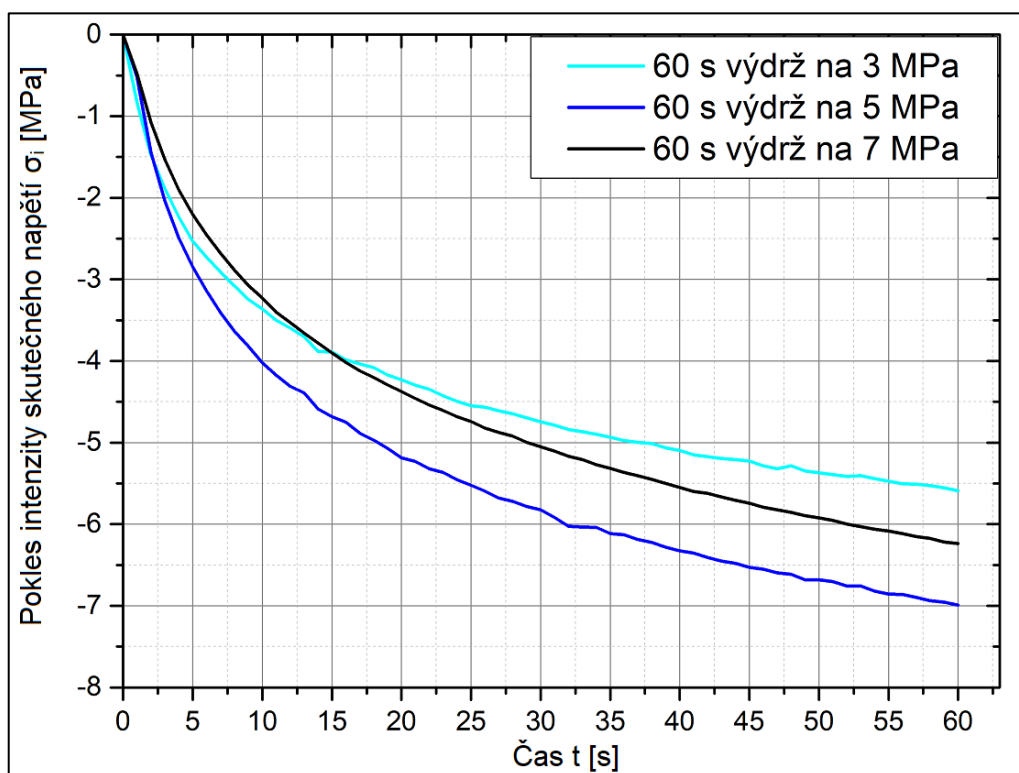
Obr. 3.31. Změna poloměru zaoblění během 60 s při výdržích na 3, 5 a 7 MPa.

Na obrázcích 3.32 a 3.33 jsou již porovnány průběhy relaxace napětí, tedy závislosti poklesu intenzity napětí za čas. Zde vyšlo, že i relaxace v průběhu tlakových výdrží je exponenciálního charakteru. Je vidět pokles intenzity napětí, který se ani během 60 sekund nezastavil. Aby bylo možné zjistit, do jaké doby se tato relaxace ustálí, musely by být nastaveny ještě delší časy trvání tlakových výdrží.

Zde opět k nejstrmějšímu poklesu intenzity napětí dochází u obou grafů vždy zhruba v prvních 5 sekundách trvání výdrže. Největší pokles intenzity napětí nastal u vzorků s 30s výdržemi při tlaku 5 MPa o hodnot zhruba 5,5 MPa intenzity napětí. U vzorků s 60s výdržemi intenzita napětí nejvíce klesla opět při tlaku 5 MPa o hodnotu téměř 7 MPa.

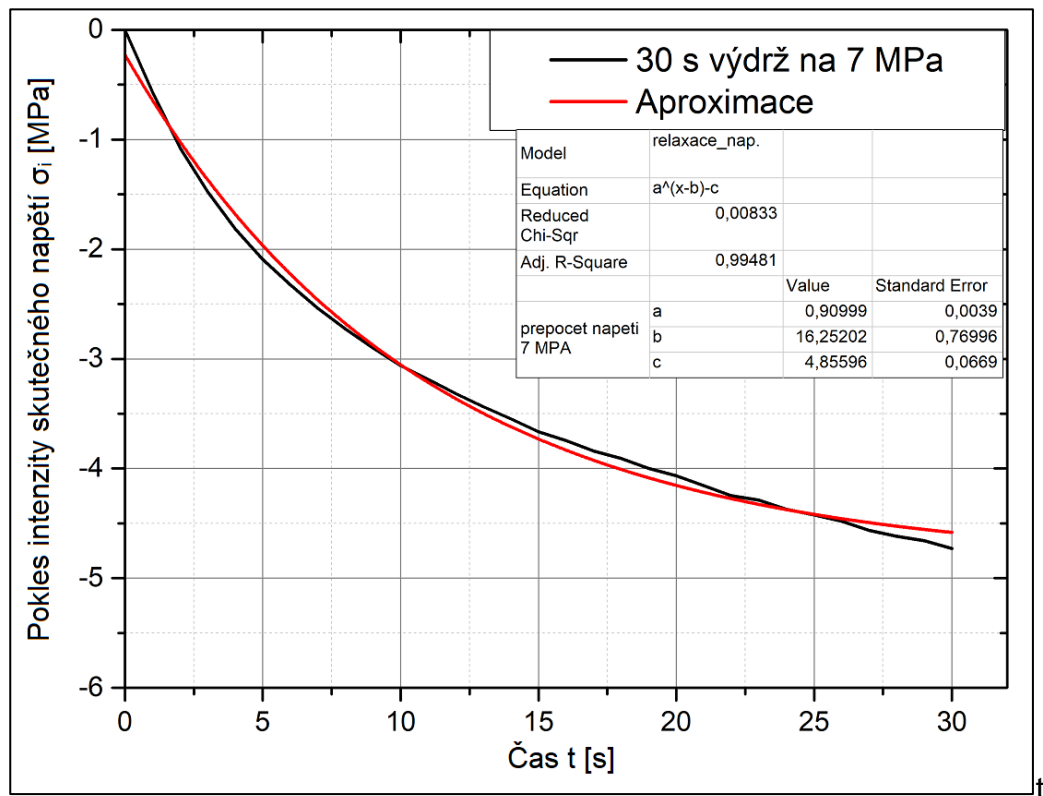


Obr. 3.32. Relaxace napětí během 30 s při výdržích na 3, 5 a 7 MPa.



Obr. 3.33. Relaxace napětí během 60 s při výdržích na 3, 5 a 7 MPa.

Aby bylo možné ještě blíže specifikovat charakter poklesu intenzity napětí v závislosti na čase, bylo třeba najít matematickou funkci, která by nám umožnila tuto závislost popsat. Jako příklad byla proložena relaxační křivka (30s výdrž na 7 MPa) aproximací dle funkce $y = a^{(x-b)} - c$ (obr.3.34.), kde a , b , c jsou koeficienty a x je nezávislá proměnná. Dá se říci, že tato funkce se velmi blíží tvaru této relaxační křivky a je možné ji použít i pro aproximaci ostatních průběhů.



Obr. 3.34. Aproximace relaxační křivky funkcí $y = a^{(x-b)} - c$.

4 Diskuse a porovnání výsledků

V rámci experimentálního měření byly provedeny zkoušky hydrostatickým vyboulováním na hydraulickém lisu CBA 300/63. V odborné literatuře lze nalézt dostatek informací o principu této zkoušky i způsobu vyhodnocení naměřených dat spolu s prezentací možných využití výsledků měření. Pro tento test však nejsou normou pevně dané podmínky testování, jako je například rychlost zatížení nebo zavedení průběžných tlakových výdrží, při kterých dochází k relaxaci napětí. V rámci řešení diplomové práce proto byly provedeny experimenty ve 3 různých režimech (metodika a režimy popsány v kapitole 3.4.), aby bylo možné prokázat, zda má rychlost nárůstu tlaku vliv na výsledné křivky zpevnění, a také za účelem zjištění charakteru relaxace napětí a jeho vlivu na výsledek.

Při analýze vlivu rychlosti tlaku na křivku zpevnění v rámci prvního režimu testování bylo zjištěno, že rychlost nárůstu tlaku má vliv na křivku zpevnění, kdy větší míru zpevnění vykazují vzorky testované při vyšším nárůstu tlaku, což je možné pozorovat na obrázku 3.26. v kapitole 3.5.1. Výsledné hodnoty koeficientu monotónního zpevnění C u vzorků s nárůstem tlaku $0,3 \text{ MPa/s}$ jsou vyšší o $0,77 \%$ než je tomu u vzorků $0,05 \text{ MPa/s}$, v případě exponentu deformačního zpevnění n je rozdíl $1,53 \%$.

U druhého režimu byly do průběhu měření nastaveny pravidelné tlakové výdrže (v prvním případě 5 s dlouhé, v druhém případě 10 s dlouhé). V rámci porovnatelnosti výsledků měření při testování vlivu doby výdrže byla volena konstantní rychlost nárůstu tlaku $0,05 \text{ MPa/s}$. Nárůst tlaku na výsledek zkoušky tak neměl vliv. Při porovnání křivek zpevnění zjištěných při 5 s a 10 s výdrží výsledky opět ukazují, že doba výdrže má vliv, a větší míru zpevnění (obrázek 3.27. v kapitole 3.5.2) vykazuje křivka získaná při 5 s výdrži. U koeficientu C se hodnoty liší o $0,44 \%$, v případě exponentu n je to $0,45 \%$. Tyto rozdíly jsou s nejvyšší pravděpodobností zapříčiněny působící relaxací napětí v průběhu tlakové výdrže, přičemž k tomuto úbytku napětí bude docházet déle u vzorku s výdrží 10 s . Vliv relaxace napětí lze pozorovat ještě při porovnání prvního režimu (vzorky s $0,05 \text{ MPa/s}$ bez výdrží) a druhého režimu (vzorky s $0,05 \text{ MPa/s}$ s 10 s výdržemi), kde rozdíl hodnot koeficientu C je $3,1 \%$ a rozdíl hodnot exponentu n $0,60 \%$. Grafické průběhy jsou znázorněny na obrázku 3.28. v kapitole 3.5.3.

Třetí režim byl zvolen až na základě výsledků z druhého režimu, neboť z 10s výdrží není patrné, jak dlouho může k relaxaci docházet nebo jakého charakteru je pokles napětí v závislosti na čase (např. lineárního, exponenciálního atd.). Proto byla zvolena měření se zavedenými tlakovými výdržemi po dobu 30 s a 60 s. Z vyhodnocených dat však vyplývá, že k poklesu napětí dochází bez přestání po celou dobu výdrže, a k ustálení by bylo třeba zvolit pravděpodobně ještě mnohem delší časy. Zjištěno také bylo, že k nejintenzivnějšímu poklesu vzhledem k exponenciální závislosti napětí-čas dochází v prvních pěti sekundách trvání výdrže. Pokud vycházíme z celkové hodnoty poklesu napětí dosaženého za dobu 30s (nebo 60s), je pokles v prvních 5s cca 50 % (40 % v prodlevy 60s).

Z naměřených výsledků je patrné, že všechny testované zatěžovací režimy mají vliv na výsledné křivky zpevnění materiálu. Jak již bylo uvedeno výše, při uvažování vlivu rychlosti nárůstu tlaku je však tento rozdíl maximálně v řádech jednotek procent. S ohledem na velikost směrodatných odchylek je tak možné považovat tyto rozdíly z technického hlediska za nevýznamné. Při sledování vlivu doby výdrže (relaxace napětí) je vidět, že rozdíly v naměřených hodnotách jsou u koeficientu monotónního zpevnění (v textu označován jako C) významné. Křivka zpevnění se posouvá směrem k nižším hodnotám s rostoucí dobou výdrže. Tento pokles má exponenciální charakter, jak bylo prokázáno v kapitole 3.5.4.

5 Závěr

Cílem této práce bylo stanovení vlivu rychlosti nárůstu tlaku při hydrostatické zkoušce vyboulováním na křivku zpevnění materiálu a relaxaci napětí v tvářeném materiálu.

Jako testovaný materiál pro tento experiment byl zvolen plech s označením HX180BD+Z100MCO. Jedná se o válcovaný žárově zinkovaný 0,7 mm tlustý ocelový plech, který vykazuje vysokou pevnost při tváření za studena. Možnost využití tohoto materiálu může být například v oblasti výroby automobilových karoserií.

Ke zjištění základních materiálových charakteristik včetně křivek zpevnění pro jednoosou napjatost byla realizována statická zkouška tahem, provedena na trhacím zařízení TIRAtest 2300.

Za účelem analýzy deformace tvářeného vzorku v průběhu hydrostatické zkoušky a následné tvorby křivek zpevnění pro dvouosou napjatost bylo využito bezkontaktního optického systému Mercury RT od české společnosti Sobriety s.r.o. Pro vyhodnocení naměřených dat bylo využito softwaru MercuryRT x64 v.2.9.

Hydrostatická zkouška vyboulováním neboli tzv. bulge test byl proveden na dvojčinném hydraulickém lisu CBA 300/63. Pro měření byly zvoleny tři režimy zatěžování. První režim měl za úkol otestovat vliv různých rychlostí kontinuálního nárůstu tlaku na křivku zpevnění. Druhý režim zkoumal vliv nárůstu tlaku s krátkými výdržemi na křivku zpevnění. Třetí režim měl otestovat vzorky čistě z hlediska relaxačního chování v průběhu dlouhých tlakových výdrží.

Ze získaných dat z experimentálního měření vyplývá, že čím rychleji dochází k růstu tlaku v průběhu bulge testu, tím více se materiál bude zpevňovat. Výsledky zároveň ukazují na nižší hodnoty zpevnění v případě nekontinuálních tlakových průběhů s výdržemi oproti průběhu kontinuálnímu. Čím je výdrž delší, tím zpevnění neustále klesá v důsledku relaxace. Tato relaxace podle naměřených dat probíhá po celou dobu výdrže až do maximální zadané hodnoty šedesáti sekund, kdy neustále docházelo k poklesu napětí a růstu deformace. Křivka tohoto poklesu napětí v závislosti na čase má tvar matematické exponenciální funkce, z čehož lze i odvodit nejintenzivnější pokles napětí z počátku trvání výdrže.

Dosažené výsledky diplomové práce lze uplatnit v oblasti numerického

modelování technologických procesů při definici výpočtových modelů deformačního chování materiálu. Znalost deformačního chování při biaxiálním zatížení je dnes již jedním ze základních parametrů nutných pro matematickou predikci chování materiálu při tváření.

S ohledem na výsledky měření je patrné, že na výslednou křivku zpevnění má vliv jak rychlost nárůstu tlaku, tak i relaxace napětí. V případě požadavku na co nejpřesnější výsledek numerické simulace je také třeba brát v úvahu reálné podmínky, při kterých je daný díl v praxi tvářen.

6 Seznam použité literatury

- [1] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2 vyd. Bratislava : Alfa, 1989.
- [2] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., NOVOTNÝ, K. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5. V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [3] LIU, WEI. Identification of strainrate dependent hardening sensitivity of metallic sheets under in-plane biaxial loading. *Researchgate*. [Online] březem 2015. [Citace: 1. duben 2020.] <https://www.researchgate.net/publication/278827607>.
- [4] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [5] Zkouška tahem. *In: ELUC*. [Online] [Citace: 03. únor 2020.] Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1566>.
- [6] SOBOTKA, J. *Tváření a lepení, Cvičení č. 3: Statická zkouška tahem (základní měřené a vyhodnocované veličiny)*. Liberec : Katedra strojírenské technologie, TU v Liberci, 2018.
- [7] ŠVORC, J. *Konstrukce přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena: Construction of the Erichsen cupping test jig*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2019. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Pavel Solfronk.
- [8] Mechanical properties. *Vidya Mitra*. [Online] [Citace: 03. únor 2020.] Dostupné z: http://eacharya.inflibnet.ac.in/data-server/eacharya-documents/55d31af3e413010f24d8f40c_INFIEP_201/4796/ET/lecture11.htm
- [9] KUHN, H. *ed. ASM handbook. Volume 8, Mechanical testing and evaluation*. Materials Park : ASM International, 2000. 0-87170-389-0.
- [10] Advanced metal-forming technologies for automotive applications. *sciencedirect*. [Online] 2012. [Citace: 04. únor 2020.] Dostupné z: https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B978184569561350003X-f03-07-9781845695613.gif?_

- [11] What is planar biaxial test. *Testresources*. [Online] 2020. [Citace: 5. duben 2020.] Dostupné z: <https://www.testresources.net/applications/test-types/planar-biaxial-test/>.
- [12] SOLFRONK, P. *Tváření a lepení – 6. přednáška - Podmínky plasticity*. Liberec : Katedra strojírenské technologie, TU v Liberci, 2019.
- [13] KÁBRT, P., ŠANOVEC, J. Testování softwaru PAM STAMP modelovými zkouškami. *Docplayer*. [Online] 2000. [Citace: 6. duben 2020.] Dostupné z: <https://docplayer.cz/13129642-Testovani-softwaru-pam-stamp-modelovymi-zkouskami.html>.
- [14] BARAN, L. *Vliv stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu: Effect of stress state on the hardening curves at the deep-drawing material*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2014. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Pavel Solfronk.
- [15] SINGH, M., CHOUBEY A. K., SASIKUMAR C. Formability Analysis of Aluminium Alloy by Erichsen Cupping Test Method. *sciencedirect*. [Online] 28. deben 2017. [Citace: 11. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317300895>.
- [16] Cupping Test to Erichsen (ISO 20482) and Olsen (ASTM E643-84) . *zwickroell*. [Online] [Citace: 11. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/en/materials-testing/sheet-metal-testing/cupping-test/erichsen-iso-20482-olsen-astm-e-643-84>.
- [17] SANTOS, O. S., PEREIRA B. A., BUTUC M. C., VINCZE G., FESTAT A. J., MOREIRA L. P. Development of a Device Compatible with Universal Testing Machine to Perform Hole Expansion and Erichsen Cupping Tests. *MDPI*. [Online] 2020. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-1702/8/1/2/htm>
- [18] KUO-SHEN, CH., KUANG-SHUN O. Chapter 17 - MEMS Residual Stress Characterization: Methodology and Perspective. *sciencedirect*. [Online] 04. srpen 2015. [Citace: 02. 11 2020.] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323299657000178>.

- [19] SAROJ, K. P., BIRENDRA K. B., PANKAJ CH. J. Chapter 3 - Experimental and numerical analysis of Al–Cu sheets using hydraulic bulging process. *sciencedirect*. [Online] 24. květen 2019. [Citace: 11. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128165645000037>.
- [20] SOBOTKA, J., SOLFRONK, P., DOUBEK, P., ZUZÁNEK, L. The hydraulic bulge test and its importance for the vegter yield. [Online] Brno: 2013. [Citace: 24. únor 2020.] Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/30f0/09f35f86f1c43cc13effd554fb84bb198b98.pdf?_ga=2.93223453.1814626708.1582554327-2557961.1580293778.
- [21] UDAY KUMAR, R. Analysis of Fukui's Conical Cup Test. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. [Online] leden 2013. [Citace: 12. únor 2020.] Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/55d2/ce989781234ed882b5699c19939bb826135a.pdf>.
- [22] BHADURI, A. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*. Singapur : Springer Series in Materials Science, 2018. ISBN 978-981-10-7209-3.
- [23] HIRSCH J. R., ENGLER O., KALZ S. Simulation of sheet anisotropy. *Researchgate*. [Online] říjen 2006. [Citace: 13. únor 2020.] Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283408609_Simulation_of_Sheet_Anisotropy.
- [24] LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S., HARLEY, I. Close Range Photogrammetry: Principles, techniques and applications. [Online] Whittles publishing, 2006. [Citace: 17. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.tutissolutions.com/sites/default/files/pdfebook/Full%20page%20Html%20interface/pdf/Photogrammetry.pdf>.
- [25] BÖHM, J. *Fotogrammetrie - učební texty*. Ostrava : Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut geodézie a důlního měřictví, 2002.

- [26] Bibliothek, Deutsche Digitale. Stereokomparator nach Pulfrich (Zeiss), mit Blinkmikroskop. *Omnia*. [Online] [Citace: 18. únor 2020.] Dostupné z: http://www.omnia.ie/index.php?navigation_function=2&navigation_item=%2F2048417%2Fitem_BPBQBTXBQVKIO4UFHFODIVU77JX56RXX&repid=1.
- [27] BEHRING, D., THESING, J., BECKER, H., ZOBEL, R. Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualization of 3D Displacements in Crash Investigations. [Online] Society of Automotive Engineers, 2001. [Citace: 19. únor 2020.] Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2a4a/c3dcd6d60648471dda7138cc48580561ab1a.pdf>.
- [28] Dělení a využití fotogrammetrie. *spszem*. [Online] SPČ zeměměřičská, Praha. [Citace: 19. únor 2020.] Dostupné z: <https://spszem.cz/storage/files/659/1-2-Deleni-a-vyuziti.pdf>.
- [29] 3D optické měřicí metody. *technikaath*. [Online] 02. říjen 2008. [Citace: 21. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.technikaath.cz/aktuality/3d-opticke-merici-metody>.
- [30] 3D měřicí systémy. *MCAE Systems*. [Online] Kuřim: MCAE Systems, 2017. [Citace: 24. únor 2020.] Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/kategorie/3d-merici-systemy/>.
- [31] GULT, M. Zjišťování mezních stavů deformace bezkontaktním systémem ARAMIS: Determination of Deformation Limit States by Contactless System Aramis. [Online] Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Pavel Solfronk.
- [32] PICKERD, V. 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, srpen 2013. [Citace: 24. únor 2020.] Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a594163.pdf>.
- [33] VOLEK, A. Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos. [Online] Brno, 2008. [Citace: 24. únor 2020.] Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/64019>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný.

[34] MATERIÁLŮ, METODY ZKOUŠENÍ KOVOVÝCH. stavební, Technická Univerzita Ostrava - Fakulta. [Online] [Citace: 03. únor 2020.] Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi12/cvi12.pdf>.

7 Seznam příloh

Příloha č. 1: Protokol ze statické zkoušky tahem – směr 0°

Příloha č. 2: Protokol ze statické zkoušky tahem – směr 45°

Příloha č. 3: Protokol ze statické zkoušky tahem – směr 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

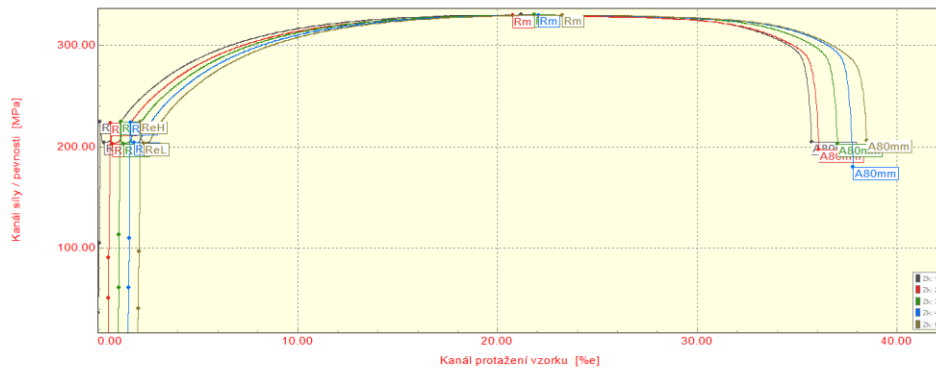
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180BD+Z100MCO (VOEST)
 Rozměry vzorku : [0,7 x20] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. David Mizera
 Datum provedení testu : 1.11.2019
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	0.710	20.180	204.14	224.54	330.01	21.01	35.62	199885
2	0.710	20.180	202.55	223.23	329.13	20.10	35.49	198676
3	0.710	20.180	202.67	224.11	329.94	20.69	35.92	198490
4	0.710	20.180	203.37	223.76	329.66	20.38	36.20	198146
5	0.710	20.180	203.25	224.50	329.78	21.09	36.36	196951

Statistika	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.710	20.180	203.19	224.03	329.70	20.65	35.92	198430
Směrodatná odchylka	0.000	0.000	0.63	0.55	0.35	0.42	0.37	1055
Minimální hodnota	0.710	20.180	202.55	223.23	329.13	20.10	35.49	196951
Maximální hodnota	0.710	20.180	204.14	224.54	330.01	21.09	36.36	199885



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

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

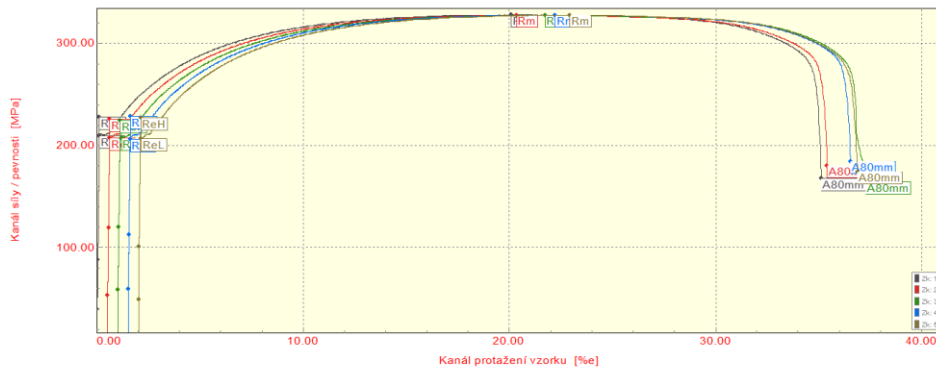
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180BD+Z100MCO (VOEST)
 Rozměry vzorku : [0,7 x20] mm
 Směr odebrání vzorku : 45°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. David Mizera
 Datum provedení testu : 1.11.2019
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	0.710	20.180	209.57	228.09	328.20	19.93	35.06	203476
2	0.710	20.180	207.65	225.84	327.77	19.68	34.82	205294
3	0.710	20.180	207.18	224.54	327.81	20.59	36.19	205536
4	0.710	20.180	206.03	228.66	327.85	20.56	34.96	202337
5	0.710	20.180	206.37	226.93	327.77	20.77	34.80	203388

Statistika	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.710	20.180	207.36	226.81	327.88	20.31	35.17	204006
Směrodatná odchylka	0.000	0.000	1.39	1.67	0.18	0.47	0.58	1365
Minimální hodnota	0.710	20.180	206.03	224.54	327.77	19.68	34.80	202337
Maximální hodnota	0.710	20.180	209.57	228.66	328.20	20.77	36.19	205536



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

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180BD+Z100MCO (VOEST)

Rozměry vzorku : [0,7 x20] mm

Směr odebrání vzorku : 90°

Teplota : RT

Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.

Vypracoval : Bc. David Mizera

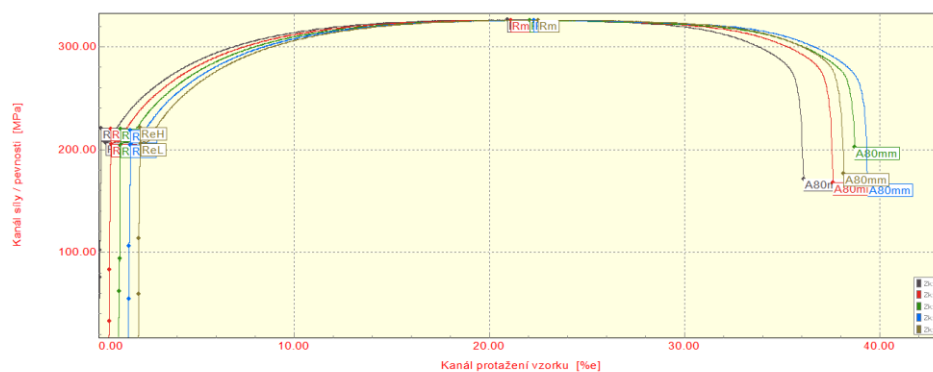
Datum provedení testu : 1.11.2019

Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	0.710	20.180	206.22	220.45	326.20	20.76	36.00	207217
2	0.710	20.180	204.95	220.37	325.85	20.44	37.01	207561
3	0.710	20.180	204.09	219.60	325.62	20.91	37.63	204843
4	0.710	20.180	204.33	218.48	325.77	20.62	37.79	205785
5	0.710	20.180	205.25	221.03	326.08	20.31	36.06	205644

Statistika	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.710	20.180	204.97	219.99	325.90	20.61	36.90	206210
Směrodatná odchylka	0.000	0.000	0.84	0.98	0.23	0.24	0.84	1141
Minimální hodnota	0.710	20.180	204.09	218.48	325.62	20.31	36.00	204843
Maximální hodnota	0.710	20.180	206.22	221.03	326.20	20.91	37.79	207561



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