

Stanovení vlivu rychlosti deformace na výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Radek Čeřovský

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

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





Zadání diplomové práce

Stanovení vlivu rychlosti deformace na výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Čeřovský**
Osobní číslo: S18000227
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Mechanické zkoušky pro testování kovových materiálů (zkoušky normalizované a zkoušky technologické) a možnosti bezkontaktní analýzy deformace
2. Základní materiály používané pro konstrukci karoserie automobilu
3. Experimentální zjištění vlivu rychlosti deformace na výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena pro zvolený hlubokotažný materiál
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] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
- [2] POLMEAR, I. *Ligth Alloy – From traditional Alloys to Nanocrystals*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 421. ISBN 0-7506-6371-5.
- [3] ASM HANDBOOK. *Volume 8 – Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [4] PÓHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.
- [5] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
- [6] TSCHAETSCH, H. *Metal Forming Practise (Processes Machines Tools)*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. s. 405. ISBN-10: 3-540-33216-2.
- [7] LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.

Vedoucí práce:

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


Konzultant práce:

Ing. Jiří Sobotka, 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.

8. června 2020

Bc. Radek Čeřovský

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem rychlosti deformace na výsledek technologické zkoušky hloubením dle Erichsena používané pro hodnocení deformačních vlastností hlubokotažných materiálů. Cílem práce bylo zjistit, zda rychlost deformace ovlivňuje velikost síly a hloubku tažení pro zvolený hlubokotažný materiál HX180BD+Z100MCO. Zvolené rozmezí deformačních rychlostí bylo zvoleno řádově vyšší, než se běžně používá u laboratorních testů s cílem přiblížit se reálně používaným rychlostem tváření v praxi.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části je obecně popsána technologie tažení a problematika materiálových vlastností a jejich zkoušení. V závěru této části se také nachází kapitola o alternativním sledování dějů při tváření.

Experimentální část je pak přímo zaměřena na materiálové vlastnosti zvoleného materiálu. Ten byl testován statickou zkouškou tahem a výše uvedenou zkouškou hloubením dle Erichsena. Použita byla také metoda optického měření průběhu experimentu – fotogrammetrie. V této části práce je také popsán průběh experimentu a popis použitých strojů a zařízení.

Závěr práce obsahuje výsledné grafické zhodnocení experimentu, naměřené hodnoty a zhodnocení výsledků experimentu.

Klíčová slova

tváření, rychlost deformace, materiálové vlastnosti, Erichsenova zkouška hloubením, fotogrammetrie

Abstract

This diploma thesis deals with the influence of the strain rate on the result of the technological test, the cupping test according to Erichsen, used for the evaluation of deformation properties of deep drawn materials. The aim of the work was to find out whether the strain rate affects the magnitude of the force and the drawing depth for the selected deep-drawing material HX180BD+Z100MCO. The selected range of strain rate was chosen proportionally higher than is commonly used in laboratory tests in order to approximate the actual forming speeds used in real technical conditions.

The work has been divided into a theoretical and an experimental part. The theoretical part includes a general description of the technology of drawing and the matters of material quality and their testing. In the conclusion of this part there is also a chapter about alternative ways of monitoring the forming process.

The experimental part is focused on material quality of the selected material. It was examined in a static tensile test and the above-mentioned Erichsen cupping test. Furthermore, an optical measuring method – photogrammetry – was used. In this part there is also an explanation of the process of the experiment and a description of machines and equipment used.

The conclusion of the thesis contains a graphical evaluation of the experiment, measured values and an assessment of findings of the experiment.

Key words

forming, strain rate, material quality, Erichsen cupping test, photogrammetry

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za jeho časovou dispozici, vstřícnost a trpělivost při dohledu na měření a za cenné rady v průběhu měření a zpracování práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala a poskytovala mi zázemí pro studium.

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

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	10
1 ÚVOD	12
2 TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1 Tváření kovů	13
2.2 Napětí a deformace	14
2.2.1 Napětí	14
2.2.2 Deformace	15
2.2.3.1 Deformační odpor	15
2.2.3.2 Elastická deformace	15
2.2.3.3 Plastická deformace	16
2.2.3.4 Rychlost deformace	17
2.3 Tažení	18
2.3.1 Prosté tažení	19
2.3.2 Tažení ve více tazích	21
2.4.3 Speciální metody tažení	21
2.4 Vlastnosti materiálu a jejich zkoušení	21
2.4.1 Mechanické vlastnosti a jejich zkoušení	23
2.4.1.1 Statická zkouška tahem	24
2.4.1.2 Zkoušky tvrdosti	30
2.4.1.3 Zkouška rázem v ohybu	34
2.4.1.4 Zkoušky únavy	36
2.4.2 Fyzikální vlastnosti materiálu	39
2.4.3 Chemické vlastnosti materiálu	41
2.5 Technologické zkoušky materiálu	42
2.5.1 Zkoušky tvárnosti za studena	43
2.5.2 Zkoušky tenkých plechů	45
2.5.2.1 Zkouška hloubením plechů dle Erichsena	46
2.5.2.2 Kalíšková zkouška	49
2.5.2.3 Zkouška hloubením plechů dle Engelhardta	49
2.5.2.4 Hydraulická zkouška vyboulováním (Bulge test)	50
2.5.2.5 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)	50
2.5.3 Zkouška plechů a pásů střídavým ohybem	51
2.5.4 Stanovení diagramu mezního přetvoření (FLD)	52
2.6 Fotogrammetrie	53
2.6.1 Historie fotogrammetrie	54

2.6.2 Základní rozdělení fotogrammetrie	55
2.6.3 Matematické základy fotogrammetrie	56
2.6.4 Fotogrammetrie v technické praxi.....	57
2.7 Oceli pro automobilový průmysl.....	58
2.7.1 Hlubokotažné oceli	58
2.7.2 Pevnostní oceli	59
2.7.3 Vysokopevnostní oceli.....	59
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	61
3.1. Materiál	62
3.2 Statická zkouška tahem.....	63
3.2.1 Stroj pro realizaci tahové zkoušky	63
3.2.2 Zkušební vzorky	64
3.2.3 Vyhodnocení tahové zkoušky	65
3.3 Měření Erichsenovy zkoušky	68
3.3.2 Měřicí stroj	69
3.3.1 Příprava vzorků	71
3.3.3 Optické měřicí zařízení Mercury	72
3.3.4 Příprava měření na stroji	73
3.3.5 Příprava měření na optickém zařízení Mercury	75
3.3.6 Postup měření	78
3.3.7 Vyhodnocení Erichsenovy zkoušky hloubením	81
3.3.8 Analýza rozptylu (ANOVA)	94
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	96
5 ZÁVĚR.....	100
Použitá literatura	101
Seznam příloh	103

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	–	tažnost [%]
A _r	–	poměrná atomová hmotnost [-]
ANOVA	–	analýza rozptylu
C _p	–	izobarická molární tepelná kapacita [J.mol ⁻¹ K ⁻¹]
C _v	–	izochorická molární tepelná kapacita [J.mol ⁻¹ K ⁻¹]
ČSN EN ISO	–	označení české normy převzaté z Evropské normy (EN), která byla převzata z normy mezinárodní (ISO)
F	–	síla [N]
F ₀	–	předběžná síla [N]
F ₁	–	přídavná síla [N]
FLC	–	křivka mezního přetvoření
FLD	–	diagram mezního přetvoření
G	–	tíhové zrychlení kladiva [m/s ²]
H ₀	–	nulová hypotéza
H ₁	–	alternativní hypotéza
HBS	–	značení tvrdosti dle Brinella pro kalenou ocelovou kuličku
HBW	–	značení tvrdosti dle Brinella pro kuličku z tvrdokovu
HMa	–	značení tvrdosti dle Martense
HV	–	značení tvrdosti dle Vickerse
IE	–	index hloubení [mm]
K	–	nárazová práce [J]
KC	–	vrubová houževnatost [J/cm ²]
L	–	délka [mm]
L _e	–	počáteční měřená délka zkušební tyče měřená extenzometrem [mm]
N	–	Avogadrova konstanta (N = 6,022*10 ²³ mol ⁻¹) [mol ⁻¹]
R	–	smluvní napětí [MPa]
R _e	–	mez kluzu [MPa]
R _m	–	mez pevnosti [MPa]
S	–	průřez [mm ²]
S ₀	–	počáteční průřez [mm ²]
S _v	–	průřez tyče pod vrubem [cm ²]
T	–	perioda kmitu [s]
T _T	–	teplota tání [°C]

X, Y, Z	–	označení souřadnic souřadného systému
Z	–	kontrakce [%]
c_p	–	izobarická měrná tepelná kapacita [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
c_v	–	izochorická měrná tepelná kapacita [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
fps	–	snímková frekvence [1/s]
g	–	gravitační zrychlení [m/s^2]
k	–	koeficient [-]
kN	–	kilonewton
t	–	čas [s]
m	–	hmotnost [kg]
m_F	–	míra hlubokotažnosti z Fukuiho zkoušky [-]
m_K	–	míra hlubokotažnosti z kalíškové zkoušky [-]
ms	–	milisekunda
n	–	počet atomů v základní buňce krystalové mřížky [-]
r	–	koeficient normálové anizotropie [-]
x', y', z'	–	označení souřadnic souřadného systému
ΔL	–	prodloužení [mm]
α	–	hladina významnosti [-]
ε	–	poměrná deformace [-]
λ	–	měrná tepelná vodivost [$\text{W/m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
ρ	–	hustota [kg/m^3]
σ	–	napětí [MPa]
σ_a	–	amplituda napětí [MPa]
σ_c	–	mez únavy [MPa]
σ_d	–	dolní napětí kmitu [MPa]
σ_h	–	horní napětí kmitu [MPa]
σ_m	–	střední napětí kmitu [MPa]
σ_N	–	časová mez únavy [MPa]
φ	–	skutečná deformace [-]
$\dot{\varphi}$	–	rychlost deformace [s^{-1}]
ω, φ, κ	–	označení sklonů os souřadného systému [°]

1 ÚVOD

V době velkého rozsahu materiálových a výrobních možností je stále hojně uplatněna technologie tváření. Především je tomu tak v dnes tak rozšířeném automobilovém průmyslu. Převážná většina dílů karoserie automobilu se vyrábí technologií tažení plechů. Z důvodu vysoké produktivity jsou na technologii tažení kladeny značné nároky.

Jedním takovým parametrem technologie tažení je rychlost deformace, která souvisí s rychlostí pohybu beranu stroje. Pro technologii hlubokého tažení se tyto rychlosti v dnešní době blíží rychlostem až 500 mm/s. Při těchto vysokých rychlostech tváření jsou známé negativní účinky, kdy s narůstající rychlostí deformace klesá tvářitelnost materiálu. Práce se proto zabývá možností zjišťování tohoto nežádoucího jevu pomocí modifikované zkoušky, hloubením dle Erichsena při použití vyšších rychlostí deformace. I přes to, že tato zkouška je dnes již nahrazována modernějšími přístupy pro deformační analýzu, např. zjišťováním diagramů mezních přetvoření, je pro svoji jednoduchost stále používána v průmyslové praxi jako rychlé měřítko kvality materiálu.

Pro testování byl využíván přípravek pro zkoušku hloubením dle Erichsena umístěný na speciální zařízení se dvěma zatěžujícími hydraulickými moduly se servořízením umožňujícím měnit rychlost tažníku při testu. Pro deformační analýzu bylo při experimentu využito optického měřicího systému MercuryRT pro sledování rozložení deformace během experimentu.

Výsledky měření lze využít pro potřeby rychlého získávání informací o deformační schopnosti tvářeného materiálu při podmínkách blížících se reálnému tváření a dále pak v oblasti definice materiálových modelů používaných při numerických výpočtech procesu tváření.

Práce obsahuje také základní informace o technologii tažení, potřebné pojmy k pochopení technologie, rozdělení materiálových vlastností a jejich zkoušení, materiálech vhodných ke konstrukci karoserie automobilů a možnostech alternativního sledování průběhu tváření povrchů.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Tváření kovů

Tváření kovů je technologický proces, při kterém vlivem působení vnějších sil dochází k řízené deformaci materiálu pro dosažení změny tvaru a rozměrů. Působící vnější síly musí být v mezi plastických deformací, tedy musí být překročena mez kluzu tvářeného materiálu. Tváření je doprovázeno změnami struktury materiálu, které následně mají vliv na mechanické vlastnosti materiálu. [1, 2]

Výhody tváření jsou především vysoké využití materiálu (nevzniká odpad ve formě třísek), vysoká produktivita a velká rozměrová přesnost. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na stroje a nástroje. [1, 2]

Rozdělení tváření dle teploty:

- tváření za studena
- tváření za tepla
- tváření za poloohřevu

Tváření za studena

Tváření za studena probíhá pod teplotou rekystalizace, která je přibližně $0,4T_T$. Při tváření za studena se zpevňuje materiál, čímž se zlepšují mechanické vlastnosti a narůstá odpor proti dalšímu tváření. Při tváření za studena vzniká textura. [1, 2]

Výhodou je již zmíněné zpevnění materiálu, vysoká přesnost rozměrů a kvalitní povrch. [1]

Tváření za tepla

Tváření za tepla se realizuje nad rekystalizační teplotou. Teplota se tedy pohybuje nad hodnotou 70% teploty tání. [1]

Výhoda tohoto postupu je mnohokrát menší potřeba tvářecí síly než u tváření za studena. Naopak nevýhodami jsou hrubnutí zrna vedoucí ke snížení mechanických vlastností a nekvalitní povrch vlivem okují. [1]

Tváření za poloohřevu

Představuje kompromis mezi tvářením za studena a tvářením za tepla. Důvodem je zmenšení potřebné tvářecí síly oproti tváření za studena, mírné zamezení zhrubnutí zrna a dosažení potřebné přesnosti a kvality povrchu. [1]

Rozdělení tváření dle vnější síly:

- tváření plošné – *deformace ve dvou směrech (tažení, ohýbání, stříhání, apod.)*
- tváření objemové – *deformace ve třech směrech (válcování, kování, apod.)*

2.2 Napětí a deformace

Znalost a porozumění pojmu napětí a deformace je v technickém světě velmi důležité. Jedná se o dva základní pojmy nezbytné k pochopení dějů v materiálu.

2.2.1 Napětí

Napětí v materiálu je fyzikální veličina vyjadřující stav tělesa zatíženého vnějším silovým působením a vyjadřuje vztah mezi silami a plochou, na kterou síly působí. Z uvedené definice je patrné, že napětí se vypočítá podílem vnitřní síly a plochy, na kterou síly působí. [1, 3]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

Kde značí: σ – napětí [MPa]

F – síla [N]

S – průřez [mm²]

V namáhaném průřezu mohou vznikat všeobecně dva druhy napětí:

- Normálové napětí – *působící kolmo na plochu průřezu*
- Smykové napětí – *působící v rovině plochy*

2.2.2 Deformace

Deformace je změna polohy atomů, ze kterých je materiál tvořen, vlivem vnější síly, která se navenek projevuje jako změna tvaru materiálu bez vzniku trhlin. [1]

Deformaci můžeme dělit na deformaci pružnou a plastickou. Při pružné deformaci se materiál po odlehčení vnější síly vrátí do původního stavu, zatímco u deformace plastické je změna tvaru při dosažení určité meze trvalá. Tato mez se nazývá mez kluzu. [1]

Pro tváření je využívána deformace plastická. Deformaci pružnou ale nelze úplně opomenout, jelikož i ta má malý vliv na výsledný tvar výrobku. [1]

Velikost deformace je závislá na teplotě, rychlosti zatěžování, napjatosti, zpevnění materiálu, chemickém složení materiálu tření a dalších aspektech. [1]

2.2.3.1 Deformační odpor

Při tváření překonáváme mnoho odporů, které působí proti vnější tvářecí síle a tím se nám snaží zabránit v deformaci materiálu. Součet těchto negativních odporů se nazývá deformační odpor. Jeho velikost závisí na teplotě materiálu, rychlosti deformace, chemickém složení materiálu a stupni deformace. [4]

2.2.3.2 Elastická deformace

Elastická deformace neboli pružná deformace je deformace, která vzniká při působení vnější síly. Tato vnější síla musí být však menší než je síla při mezi kluzu na daném průřezu materiálu či zkoumaném vzorku. Při odlehčení takto velké vnější síly dochází k navrácení tvaru materiálu do původního stavu. [1, 5]

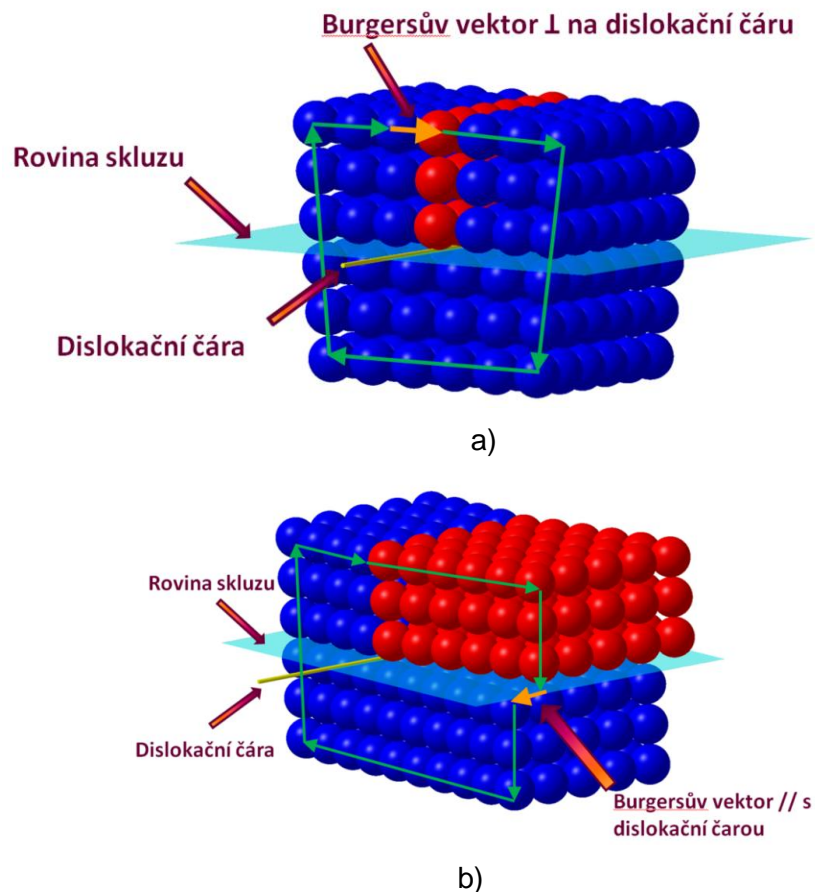
Při tváření je tato deformace mnohokrát méně důležitá než deformace plastická, ale nesmí se úplně opomínat. Pružná deformace má totiž vliv na tzv. *odpružení*, které vzniká, jak už napovídá definice pružné deformace, po odlehčení vnější síly. [1, 5]

2.2.3.3 Plastická deformace

Plastická deformace tvoří základ možnosti tváření materiálu. Vzniká zatížením materiálu silou větší, než je mez kluzu daného materiálu, čímž vznikají již nevratné deformace. [5, 6]

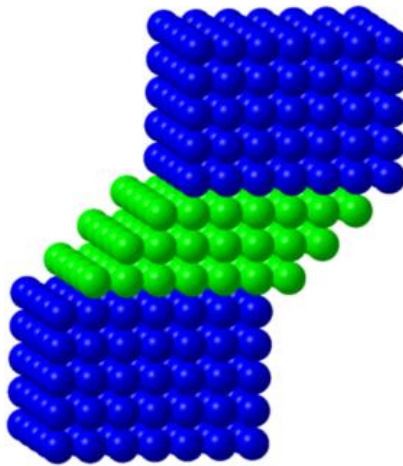
Posouvání atomů při plastické deformaci může nastat dvěma způsoby. Jedná se o mechanismus *skluzu atomů* nebo *dvojčatní*. Rozvíjí se vždy ten mechanismus, který při stanovených podmínkách vyžaduje menší napětí. [6]

Skruz atomů závisí především na čárových poruchách v materiálu. Tyto poruchy se nazývají dislokace a mají za následek vysunování atomů z jejich ustálených poloh, které zaujímají v krystalové mřížce. Dislokace se mohou pohybovat, mohou vznikat a zanikat. Dislokace můžeme dělit na hranové, šroubové či jejich kombinace jak je zobrazeno na *Obr. 1*. [7]



Obr. 1: Dislokace a) hranová, b) šroubová [6]

Dvojčatění je mechanismus plastické deformace, který vzniká při nízkých teplotách a velkých rychlostech deformace jako je tomu například u tváření výbuchem. Podstatou dvojčatění je přesun atomů krystalu o část meziatomární vzdálenosti, přičemž vzniká oblast mřížky souměrná s původní, neposunutou mřížkou podle roviny dvojčatění. [6]



Obr. 2: Mechanismus dvojčatění [6]

2.2.3.4 Rychlost deformace

Rychlost deformace velmi ovlivňuje mechanické chování materiálu. Vyjadřuje stupeň deformace za jednotku času dle (2). [6]

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2)$$

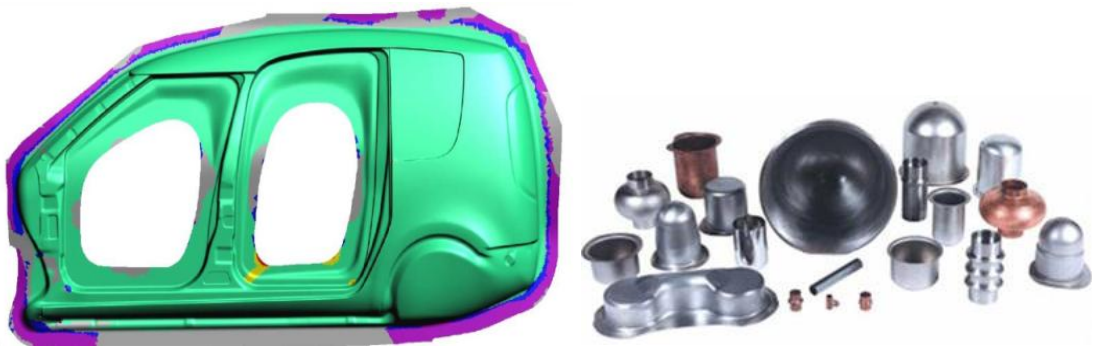
Kde značí: $\dot{\varphi}$ – deformační rychlost [s^{-1}]
 φ – skutečná deformace [-]
 t – čas [s]

2.3 Tažení

Jelikož obsah práce určuje vhodnost daného materiálu k tažení, bylo by vhodné věnovat této technologii pár slov.

Tažení je technologie plošného tváření, při kterém se jedním nebo v několika tazích vyrobí z polotovaru ve tvaru pásu plechu duté těleso. Nástrojem k této technologii je *tažidlo* skládající se z *tažníku* a *tažnice*, případně dalších pomocných konstrukčních částí. Výrobek technologie tažení nazýváme *výtazek*. [1, 8]

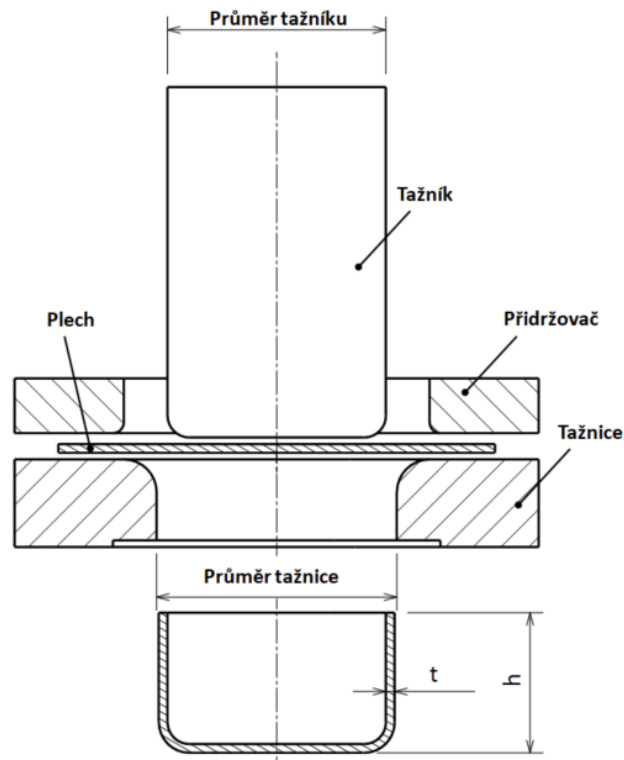
Tažení můžeme rozdělit na tažení s přidržovačem nebo bez přidržovače. Dále na tažení mělké nebo hluboké. Tažení se ztenčením hrany nebo bez ztenčení hrany. Tažení rotačních tvarů a tváření nerotačních tvarů. [1, 8]



Obr. 3: Příklady výrobků technologií tažení [6]

2.3.1 Prosté tažení

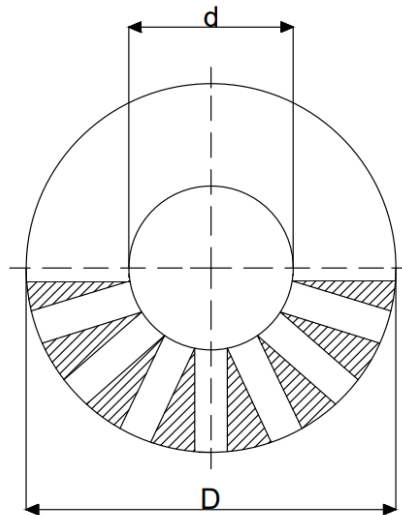
Polotovar ve formě přístříhu je vtahován pohyblivým tažníkem do nepohyblivé tažnice přes hranu tažnice. Tažná síla se počítá z podmínky pevnosti vzniklé válcové nádoby, která se nesmí přetřhnout. Při tažení je nutné uvažovat vliv zpevnění materiálu, které vzniká tvářením za studena a vliv tření. [1]



Obr. 4: Schéma prostého tažení s přidržovačem [6]

Napjatost při tažení se liší v jednotlivých místech výtažku. Dno výtažku je nepatrně deformováno rovnoměrně ve dvou směrech. Válcová část, tedy průřez výtažku, je namáhána čistým tahem. Hrana mezi dnem a válcovou částí je namáhána tříosým namáháním. Výtažek v místě ohybu přes tažnou hranu je namáhán radiálním ohybem a tangenciálním tlakem. Materiál, který se nachází pod přidržovačem, je vlivem přidržovací síly namáhán tlakem. Největší, tedy rizikové namáhání, vzniká u natahovaného průřezu válcové nádoby těsně u dna. Důsledkem je zeslabování tloušťky stěny v tomto místě, což vede k následnému utržení právě v tomto místě. [1, 6]

Při tažení se přesouvá značná část objemu. Pouze část objemu se ale podílí na výsledném průřezu výtažku. To lze vidět na *Obr. 5*, kde vyšrafované trojúhelníčky značí materiál, který se na průřezu výtažku nepodílí. Tato část objemu materiálu má na svědomí protažení výtažku a případné zvlnění materiálu. Toto zvlnění pak může vést až k bránění toku materiálu mezi tažník a tažnici. Při následném potřebném zvýšení tažné síly vzniká riziko prasknutí výtažku v jeho již vytvořené stěně. [1, 8]

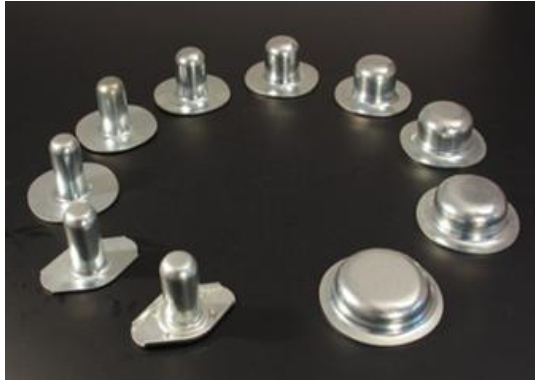


Obr. 5: Důvod vzniku vlnění

Vzniku vln můžeme zabránit přidáním přidržovače. Ten je při složitějších tvarech nezbytnou součástí lisu pro tažení. Přidržovač však mírně pěchuje materiál. Síla přidržovače je součinem měrného tlaku a činné plochy přidržovače. Lze určit experimentálně nebo z již vytvořených grafů. [1, 6]

2.3.2 Tažení ve více tazích

Tažení na více tahů se používá pro hlubší a tvarově složitější tvary výtažků. Jedná se o tažení, kde tažník má dva a více průměrů, které postupně tváří přístřih a již vytvořený kalíšek, který vznikl tažením tažníkem o větším průměru (viz Obr. 6). [6]



Obr. 6: Příklad tažení na více tahů [6]

2.4.3 Speciální metody tažení

Speciální metody tažení se používají při výrobě specifických tvarů výtažku nebo využívají jiné nástroje než kovové.

- Tváření pryží – *pro jednoduché výtažky, nezanechává stopy po nástroji*
- Tváření kapalinou – *pro mělké tažení*
- Hydromechanické tažení – *kombinace klasického tažení s kapalinovým*

2.4 Vlastnosti materiálu a jejich zkoušení

Pro zkoumání vlastností materiálu působíme mechanickým namáháním, které vyvoláme působením vnějších sil. Ty mohou být pouze pružné nebo pružně-plastické. Při mechanickém namáhání je objektem namáhání tuhé těleso, nikoli samotný materiál. Tuhé těleso je v případě zkoumání vlastností daná konstrukční část nebo zkušební těleso z daného materiálu. [5]

Jelikož je práce zaměřena na oblast kovů tak vlastnosti materiálu se budou týkat pouze kovů. Ostatní materiály mohou mít i jiné, důležité vlastnosti, o kterých v této práci nebude zmíněno.

Těleso je definované:

- Materiálem
- Geometrií

Materiál tělesa je definovaný:

- Chemickým složením
- Způsobem výroby a zpracování
- Strukturou
- Homogenitou chemického složení, struktury a vlastností

Geometrie tuhého tělesa je definována:

- Geometrickým tvarem
- Rozměry
- Druhem a kvalitou povrchu

Vlastnosti materiálu můžeme dělit:

- Mechanické vlastnosti – *pevnost, tvrdost, pružnost, houževnatost, atd.*
- Fyzikální vlastnosti – *hustota, teplota tání a tuhnutí, délková a objemová roztažnost, tepelná vodivost, elektrická vodivost, magnetičnost, atd.*
- Chemické vlastnosti – *odolnost proti korozi, žáruvzdornost, žárupevnost, atd.*
- Technologické – *slévatelnost, tvářitelnost, svařitelnost, obrobitelnost, odolnost proti opotřebení, atd.*

2.4.1 Mechanické vlastnosti a jejich zkoušení

Mechanické zkoušky materiálu slouží pro popsání odolnosti materiálu proti vnějším silám. Tyto vnější síly mohou být jak statické tak dynamické. Mechanické zkoušky jsou pro zachování stálých podmínek zkoušení a kvůli opakovatelnosti a možnosti porovnání normalizovány. [8, 9]

Metody zkoušení:

- Přímá metoda
Provádí se při provozních podmínkách, bývají nákladnější a v některých případech je nelze realizovat v těchto podmínkách. [9]
- Nepřímá metoda
Provádí se v normalizovaných laboratořích, bývají rychlé, spolehlivější, levnější a jsou častěji používané. [9]

Rozdělení podle charakteru zatížení:

- Tahem
- Tlakem
- Smykem
- Ohybem
- Krutem

Rozdělení podle působící síly:

- Statické
Síla je zde konstantní nebo velmi pomalu se měnící obvykle až do prasknutí zkušebního tělesa. (např. Statická zkouška tahem)[9]
- Dynamické
Síla na zkušební těleso působí rychle, nárazem cizího tělesa. Jsou to tedy zkoušky nárazové (např. Zkouška rázem v ohybu = Charpyho kladivo). Do této skupiny se také řadí zkoušky cyklické, kde se zatěžující síla rovnoměrně mění. Obvykle má sinusový charakter. (např. Zkouška únavy). [9]

Dále lze tyto zkoušky dělit dle času na krátkodobé a dlouhodobé nebo dle teploty při kterých zkoušky provádíme. [9]

Základní mechanické vlastnosti:

Pevnost – schopnost materiálu odolávat mechanickým silám, které by vedly k porušení celistvosti materiálu [5]

Tvrдость – schopnost materiálu odolávat vniku cizích těles do povrchu zkoušeného materiálu [5, 9]

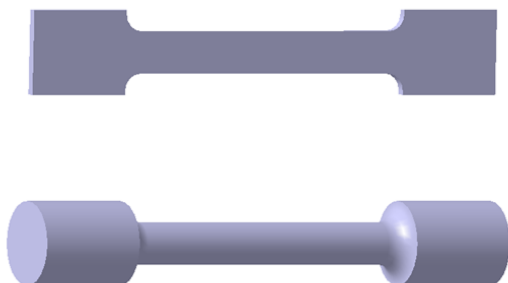
Houževnatost – vlastnost, která představuje množství mechanické energie, která je potřebná k porušení celistvosti zkoušeného vzorku [5, 9]

2.4.1.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je mechanická zkouška, která je založena na natahování zkušební tyče postupně rostoucí silou, z pravidla až do její destrukce, tedy přetržení. Jedná se pouze o jednoosý tah. Tato zkouška je základem pro každý technický materiál, jelikož je jednoduchá a její výsledky jsou v praxi velmi potřebné pro návrh jakékoliv strojní součásti z hlediska volby materiálu a rozměrů. Vzhledem k velkému využití a užitečnosti této zkoušky je zkouška normalizována dle normy ČSN EN ISO 6892. [5, 9, 10]

Zkušební tyče na statickou zkoušku tahem jsou nejčastěji kruhového nebo obdélníkové průřezu. Rozměry zkušební tyče jsou pevně zadány uvedenou normou pro tuto zkoušku. Zkoušku můžeme prohlásit za korektní v případě, když vzorek praskne v prostřední třetině délky měřené extenzometrem. V tomto místě by se měl po překročení meze pevnosti tvořit tzv. krček. Pokud vzorek nepraskne v uvedeném místě, lze předpokládat vyšší nehomogenost materiálových vlastností či struktury nebo vady na povrchu zkušební vzorku. [5, 10]

Na Obr. 8 je zobrazený krček na zkušební tyčce. V první fázi se vzorek deformuje homogenní deformací bez vzniku tohoto krčku. U hlubokotažných materiálů dochází k tvorbě krčku v okamžiku dosažení meze pevnosti materiálu R_m . Deformace se lokalizuje až do okamžiku vzniku lomu [6].



Obr. 7: Model zkušební tyčky



Obr. 8: Krček na zkušební tyčce tahové zkoušky. [6]

Zkouška se provádí na speciálním stroji pro statickou zkoušku tahem (Obr. 9). Tyto stroje se dělí dle možnosti vynaložení maximální síly. Stroje jsou schopné zaznamenávat osovou sílu F a změnu délky zkušební tyče ΔL . [10]



Obr. 9: Trhací stroj

Z naměřených hodnot F a ΔL se získává graf závislosti těchto dvou hodnot. Jedná se o tzv. *pracovní diagram*. Jeho známější ekvivalentem je však diagram, který získáme přepočtem získaných hodnot síly F a prodloužení ΔL dle vztahu (3) a (4). Takto vypočtené hodnoty se nazývají *smluvní hodnoty* a jejich vzájemná závislost tvoří *smluvní diagram*. [10]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (3)$$

Kde značí: R – smluvní napětí [MPa]
 F – síla [N]
 S_0 – počáteční průřez zkušebního vzorku [mm²]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4)$$

Kde značí: ε – poměrná deformace [-]
 L – délka vzorku [mm]
 L_0 – počáteční délka vzorku [mm]

Smluvní hodnoty napětí se zavádějí z důvodu složitosti měření aktuálního průřezu vzorku v průběhu zkoušky. Skutečné hodnoty plochy průřezu vzorku se dají do meze pevnosti jednoduchým způsobem vypočítat ze zákona zachování objemu. V oblasti lokalizace deformace (tvorba krčku) je nutné pro zjištění aktuálního průřezu použít jiné metody, např. fotogrammetrii, více extenzometrů pro měření příčné deformace atd. Skutečné napětí se po zjištění aktuálního průřezu vypočte dle vztahu: [6]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (5)$$

Kde značí: σ – skutečné napětí [MPa]
 F – síla [N]
 S – skutečný průřez [mm²]

Ke skutečnému napětí se počítá skutečná deformace, která je dána vztahem:

$$d\varphi = \frac{dL}{L} \quad (6)$$

Kde značí: φ – skutečná deformace [-]
L – délka zkušební tyče [mm]

Integrací vztahu (6) získáme vzorec:

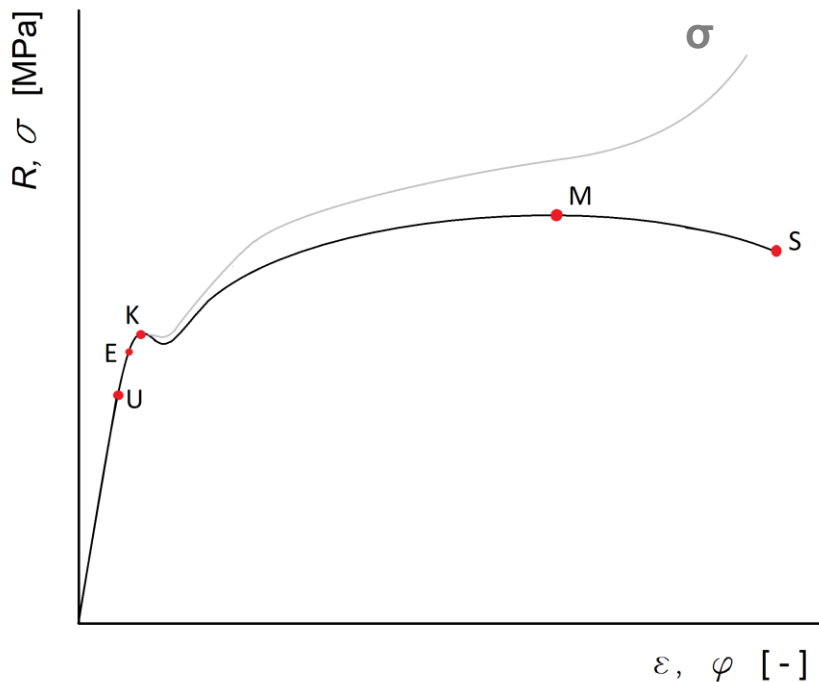
$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{1}{L} = \ln(L) - \ln(L_e) \quad (7)$$

Kde značí: L_e – počáteční měřená délka zkušební tyče [mm]

Úpravou vztahu (7) poté získáme konečný vzorec pro skutečnou deformaci:

$$\varphi = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (8)$$

Zkouškou tahem získáváme mezní hodnoty sil nebo napětí, které jsou zobrazeny v diagramu na Obr. 10 a pro technickou praxi jsou neodmyslitelně důležité.



Obr. 10: Diagram statické zkoušky tahem

Mez úměrnosti (U) – mez, do které je vyvolaná deformace zkušební tělesa přímo úměrná zatížení, platí zde Hookův zákon

Mez pružnosti (E) – mez, která označuje zlomový okamžik mezi situacemi, kdy se materiál po odlehčení vrátí do původního stavu a kdy jsou již deformace trvalé, tedy zlom mezi pružnou a plastickou deformací

Mez kluzu (K) – nejmenší napětí, při kterém nastávají podstatné deformace, které někdy dočasně pokračují, i když se současně nezvyšuje napětí

Mez pevnosti (M) – odpovídá největšímu zatížení před porušením zkušební tyče

Bod S – bod kdy se zkušební těleso přetrhne

Základní hodnoty získané z tahové zkoušky:

- *Mez kluzu (R_e)*
- *Mez pevnosti (R_m)*
- *Tažnost (A)*

Hodnota tažnosti značí maximální poměrné trvalé prodloužení vyjádřené v %.

- *Kontrakce (Z)*

Kontrakce vyjadřuje procentuální poměr rozdílu původního a přetrženého průřezu zkušební vzorku. Využívá se pouze u kruhových průřezů zkušební vzorku.

Díky přeměření rozměrů zkušební tyče před a po zkoušce tahem můžeme také zjišťovat normálovou anizotropii plechů, která značí stálost či nestálost materiálových vlastností v různých směrech. [6]

2.4.1.2 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je vlastnost materiálu, která definuje jeho odpor ke vniku cizích těles do povrchu zkoušeného vzorku. Tvrdot je závislá na mnoha parametrech, jako jsou pružné a tvárné vlastnosti materiálu, tvar vnikacího tělesa, rychlost vnikání nebo doba a síla vnikání. Vnikací těleso se nazývá indentor.[8, 9, 10]

Zkoušky tvrdosti se dělí na:

- Vrypové (Martens)
- Vnikací (Brinell, Vickers, Rockwell)
- Odrazové (Shoreův skleroskop)

Vrypová zkouška dle Martense

Vrypová zkouška dle Martense slouží pro tvrdé a křehké materiály jako je sklo, porcelán a další jim podobné materiály. Tato zkouška se značí HMa. [9] Princip zkoušky je přitlačení diamantového hrotu na leštěný povrch zkoušeného materiálu, kterým pohybujeme definovanou rychlostí. Mírou tvrdosti povrchu materiálu je síla F , která je potřebná k vytvoření vrypu o šířce 0,01 mm. [9]

Vnikací zkouška dle Brinella

Zkouška tvrdosti dle Brinella je založena na vlačování kalené ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu definovaného průměru do povrchu materiálu definovanou silou po definovanou dobu. Mírou tvrdosti je poté vzniklý vtisk kulového tvaru, který se v průmětu zobrazí jako kruh o určitém průměru, který udává tvrdost materiálu. [8, 9, 10]

Tvrdot dle Brinella se označuje HBW při použití kuličky z tvrdokovu nebo HBS při použití kalené ocelové kuličky. Více se však využívá kulička z tvrdokovu, jelikož má větší modul pružnosti než kulička ocelová, tudíž se tolik nedeformuje. [8]

Přednostně se používají kuličky o průměru 10 mm, dále pak 1, 2,5 nebo 5 mm. Doba zatěžování je u ocelí 10 až 15 s, u neželezných kovů a jejich slitin je pak tato doba delší. Zatěžující síla se nejčastěji při použití kuličky o průměru 10 mm používá 30 kN. [8, 9]

Tvrdotost po testu zjistíme buď pomocí tabulek, nebo výpočtem. Výsledná tvrdost se poté vypočte ze vztahu (9). Protože se v tomto vzorci počítá se silou zadanou v kilopondech a v současné době se již používá jednotka síly newton, tak je nutné celý vzorec vynásobit koeficientem k , po jehož přidání můžeme dosazovat sílu v newtonech. [8]

$$HBW = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} * k \quad (9)$$

Kde značí: F – přítlačná síla [N]
 D – průměr vnikací kuličky [mm]
 d – průměr vtisku [mm]
 k – koeficient jednotky síly [-]

Vnikací zkouška dle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je opět založena na vlačování cizího tělesa do povrchu materiálu. Tentokrát se však jedná o diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Indentor se opět vlačuje definovanou silou po definovaný čas do zkušební vzorku. [8, 9]

Výsledkem zkoušky je vryp, jehož aritmetický průměr úhlopříček udává hodnotu potřebnou k dohledání tvrdosti v tabulce. Další možností je výpočet tvrdosti dle vztahu (10). Výsledná tvrdost se označuje HV. [9, 10]

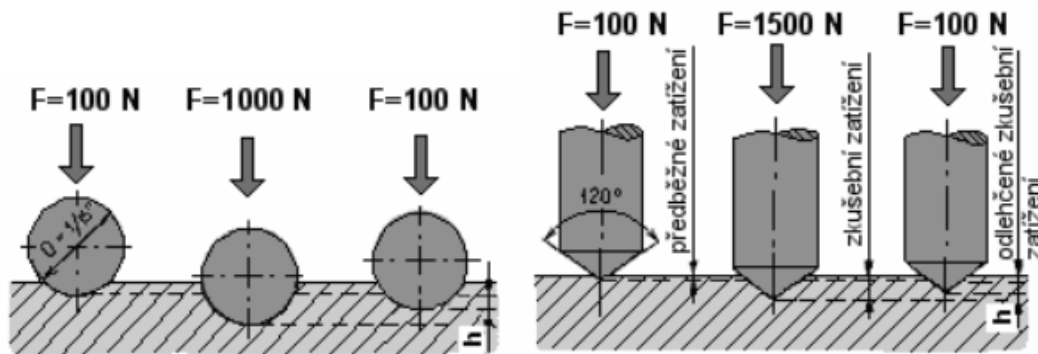
Zjednodušený vzorec výpočtu tvrdosti dle Vickerse:

$$HV = \frac{F}{d^2} * 0,1891 \quad (10)$$

Kde značí: F – přítlačná síla [N]
 d – aritmetický průměr úhlopříček vtisku [mm]

Vnikací zkouška dle Rockwella

Podstatou zkoušky tvrdosti dle Rockwella je vtlačování diamantového kuželu s vrcholovým úhlem 120° , tvrdokovové nebo ocelové kuličky do zkušební tělesa. Postup zkoušky je zatížení zkoušeného materiálu silou F_0 , která je přibližně 100 N. Tato předběžná síla vytvoří ve zkoumaném materiálu vtisk. V tomto bodě se vynuluje tvrdoměr. Poté se zvýší síla o tzv. přídavnou sílu F_1 , kterou se působí na materiál 2 až 8 s a poté se opět odlehčí na sílu předběžnou. Síla, která v tu dobu působí se tedy rovná součtu síly předběžné a přídavné ($F = F_0 + F_1$). Po odlehčení se vnikací těleso vrátí do polohy, která se liší od počátečního vtisku. Tato hodnota je poté úměrná tvrdosti materiálu a na stupnici tvrdoměru je přímo převedena na tvrdost HR. Mírou tvrdosti je tedy hloubka vtisku po odlehčení přídavné síly. [8, 9, 10]



Obr. 11: Schéma postupu jedné z metod Rockwellovy vnikací zkoušky [11]

Tato tvrdost se označuje HR a dalším písmenem, které značí použitou metodu z následující tabulky:

Tab. 1: Druhy zkoušky dle Rockwella

Stupeň	Označení	Indentor	Zatížení [kg]			Oblast použití [HR*]
			Předběžné	Přídavné	Celkové	
A	HRA	diamantový kužel	10	50	60	20-88
B	HRB	kulička $\varnothing 1,5875$	10	90	100	20-100
C	HRC	diamantový kužel	10	140	150	20-70
D	HRD	diamantový kužel	10	90	100	40-77
E	HRE	kulička $\varnothing 3,175$	10	90	100	70-100
F	HRF	kulička $\varnothing 1,5875$	10	50	60	60-100
G	HRG	kulička $\varnothing 1,5875$	10	140	150	30-94
H	HRH	kulička $\varnothing 3,175$	10	50	60	60-100
K	HRK	kulička $\varnothing 3,175$	10	140	150	40-100

Odrázová zkouška tvrdosti Shoreovým skleroskopem

Zkouška odrazem na Shoreově skleroskopu spočívá v upnutí diamantového tělesa, které má zabroušený hrot na závaží. To se následně pustí volným pádem na zkoušený materiál. Vzniklá kinetická energie vytvoří vtisk. Část kinetické energie však způsobí odraz tohoto závaží. Výšku odrazu závaží poté měříme na stupnici, která má hodnotu 0 na povrchu materiálu a hodnotu 100 ve výšce, která je maximální možná, tedy pro materiál extrémně tvrdý. [5, 8, 9]

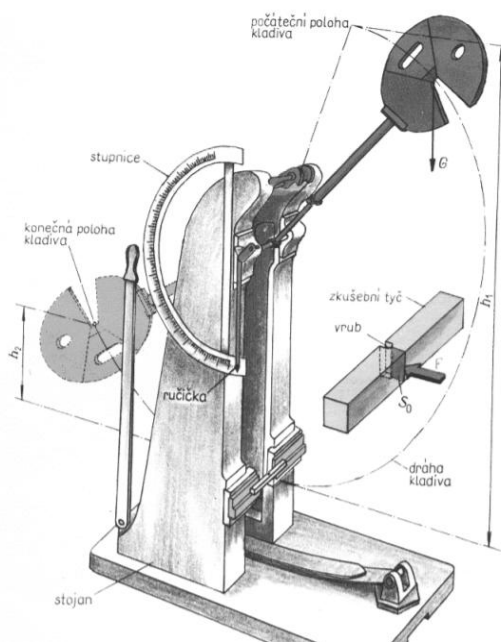
2.4.1.3 Zkouška rázem v ohybu

Rázové zkoušky obecně hodnotí odolnost materiálu proti vzniku křehkého lomu. Jelikož se jedná o zkoušky rázové, řadí se tyto zkoušky do dynamických zkoušek. Při těchto zkouškách vlivem větší rychlosti zatěžování roste mez kluzu, mez pevnosti nebo přetvárný odpor. Při těchto vysokých rychlostech se i materiál, který se při statických zkouškách mohl chovat jako houževnatý, projeví křehkým lomem. Nejčastěji se používá rázová zkouška v ohybu, výjimečně se pak může použít rázová zkouška v krutu nebo v tahu. [6, 8]

Rázová zkouška v ohybu dle Charpyho

Nejčastější metoda zkoumání houževnatosti materiálu je rázová zkouška v ohybu dle Charpyho, která se provádí na Charpyho kladivu. Při této zkoušce zjistíme tzv. vrubovou houževnatost materiálu. [10]

Princip zkoušky spočívá v přeražení malého hranolku (10x10x55 mm), který je zapřený ve dvou podporách. Tento hranolek má uprostřed vytvořený vrub tvaru U nebo V o hloubce 2 mm. Přeražení tohoto vzorku zajišťuje kladivo, které je upnuté na rameni. Kladivo se pustí z definované výšky a volným pádem opisujícím kružnici získá kinetickou energii, díky níž kladivo následně přerazí vzorek. Vrub hranolku musí být vždy umístěn na opačné straně, než udeří kladivo. Mírou vrubové houževnatosti je vzniklá nárazová práce potřebná k přeražení hranolku. Ta se zjistí odečtením horní polohy kladiva, kam vystoupá po přeražení hranolku. [6, 9]



Obr. 12: Schéma Charpyho kladiva [8]

Vrubová houževnatost se poté vypočte:

$$KC = \frac{K}{S_v} = \frac{G*(H-h)}{S_v} = \frac{m*g*(H-h)}{S_v} \quad (11)$$

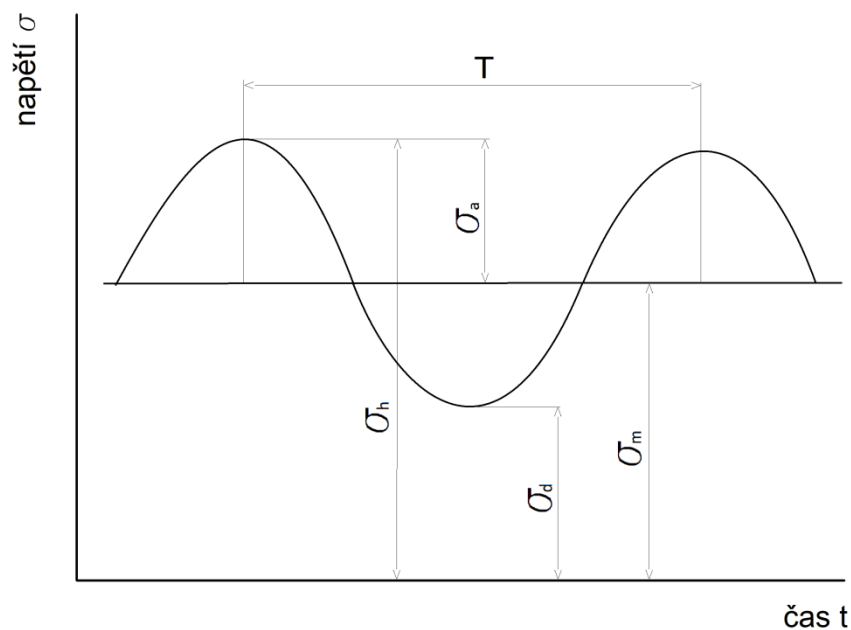
Kde značí: KC – vrubová houževnatost [J/cm²]
K – nárazová práce [J]
S_v – průřez tyče pod vrubem [cm²]
G – tíhové zrychlení kladiva [m/s²]
H – výška, ze které se pouští kladivo [m]
h – výška, do které vystoupá kladivo po přeražení vzorku [m]
m – hmotnost kladiva [kg]
g – gravitační zrychlení [m/s²]

Tato zkouška materiálu se často zkoumá i za jiných teplot než je pokojová teplota. Často jsou to teploty pod bodem mrazu, kdy se zkoumá, jak moc materiál zkřehl vlivem nízkých teplot.

2.4.1.4 Zkoušky únavy

Únavu materiálu chápeme jako mezní stav, kdy dochází k porušení funkční způsobilosti součásti vlivem opakovaných dynamických zatížení. Toto zatížení nesmí být větší než je mez kluzu a může být buď pravidelné, nebo nepravidelné a působí zpravidla až do porušení vzorku. Značení a používané pojmy pro únavu materiálu stanovuje norma ČSN 42 0362. Zkouška únavy jako taková však normalizována není. [5, 9, 13]

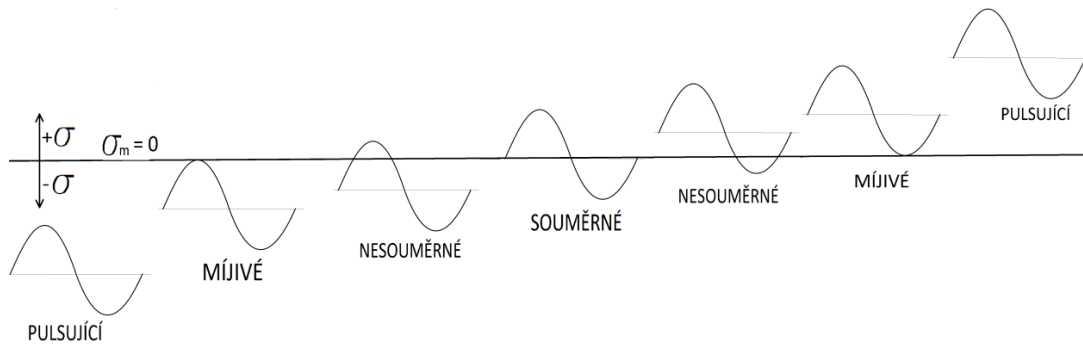
Při zkoušce únavy materiálu na vzorek působí kmitavé zatížení. Kmitavé zatížení lze definovat jeho středním napětím kmitu σ_m a amplitudou napětí σ_a , případně horním a dolním napětím kmitu σ_h a σ_d . [5, 8, 9, 13]



Obr. 13: Základní pojmy kmitavého zatížení

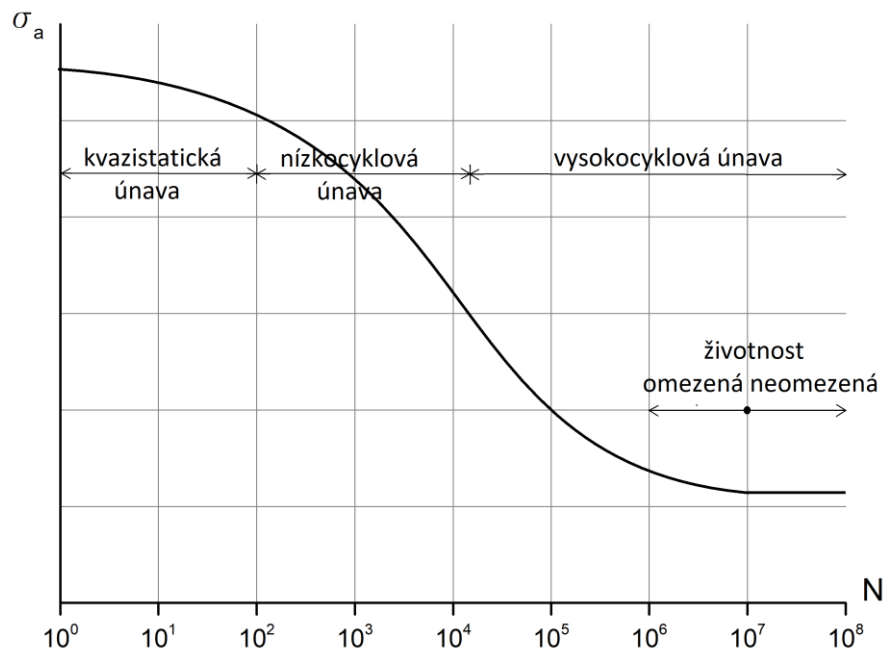
- σ_a – amplituda napětí
- σ_m – střední napětí kmitu
- σ_h – horní napětí kmitu
- σ_d – dolní napětí kmitu
- T – perioda kmitu

Při znalosti střední hodnoty napětí lze kmitavé zatížení dělit dle Obr. 14.



Obr. 14: Druhy kmitavého zatížení

Principem zkoušky únavy je postupné snižování amplitudy napětí od hodnoty meze kluzu až do doby, než vzorek při zvolené amplitudě napětí vydrží 10^7 cyklu. Při nalezení tohoto napětí se napětí označí jako mez únavy σ_c . Závislost zvoleného napětí na počtu cyklu, kterému vzorek při tomto napětí odolal, se zobrazuje v tzv. Wöhlerově křivce, která je znázorněna na Obr. 15. Vzhledem k hyperbolickému průběhu křivky, který je špatně čitelný, se zavádí semilogaritmické souřadnice, tedy do souřadnic kde napětí se zobrazuje na rovnoměrně stupnici a počet cyklů na logaritmické stupnici. Takovýto diagram má poté přímkový charakter. [5, 8, 9, 13]



Obr. 15: Wöhlerova křivka

Nejvyšší bod v diagramu zobrazuje namáhání vzorku napětím, které je rovno mezi pevnosti R_m . Při tomto napětí vydrží vzorek méně než jeden cyklus. Nejnižší bod v semilogaritmické Wöhlerově křivce zobrazuje amplitudu o takové velikosti napětí, které zajistí, že vzorek vydrží právě 10^7 cyklu a více. [5, 8, 9]

V praxi může nastat situace, kdy plánovaná životnost výrobku nepřekročí mezní hodnotu 10^7 cyklů. V tomto případě se nedá tímto způsobem materiál zkoušet. Pro tuto situaci se zavádí časová mez únavy σ_N . Pro použití této metody je nutné znát počet cyklů, kterými bude materiál zatěžován po dobu své životnosti. Kladným výsledkem je pak možnost zvýšení amplitudy napětí zatěžujícího materiál. [5, 8, 9, 13]

Oblasti vyznačené v Obr. 15:

- *Oblast kvazistatického lomu*

K prasknutí vzorku dochází při prvním výkmitu zatížení nebo po několika desítkách cyklů. Lom má znaky tvárného lomu jako při statickém porušení. [13]

- *Oblast nízkocyklové únavy*

Zde působí napětí tak velká, že zapříčiňují cyklické plastické deformace. Oblast se nachází v rozmezí 10^2 a 10^5 cyklu. V tomto rozmezí také může docházet k diskontinuitě Wöhlerovy křivky v oblasti meze kluzu. [13]

- *Oblast vysokocyklové únavy*

V tomto rozmezí již nastává v části vzorku lom s hladkým vzhledem a strukturou bez známek plastické deformace. Zbytek vzorku praská v důsledku kvazistatickým dotržením s přispěním plastických deformací. [13]

2.4.2 Fyzikální vlastnosti materiálu

Fyzikální vlastnosti materiálů se dají přibližně odvodit od postavení jednotlivých prvků, které materiál obsahuje, v periodické tabulce prvků. Tyto vlastnosti jsou tedy především dány chemickým složením materiálu a jeho strukturou. [10]

Fyzikální vlastnosti:

- Hustota
- Elektrická vodivost
- Tepelné vlastnosti
- Magnetické vlastnosti

V praxi jsou tedy tyto vlastnosti důležité pro zvláštní použití. Například pokud máme požadavek na hmotnost, zvolíme materiál s menší hustotou nebo pokud chceme mít materiál vodivý, zvolíme materiál s vysokou elektrickou vodivostí aj. [10]

Hustota

Hustota je určena atomovým rozložením kovů. Její hodnota je v praxi důležitá pro výpočet hmotnosti součásti, která v současné době směřuje vždy k co nejnižším hodnotám při zachování co nejlepších mechanických vlastností. Její teoretickou hodnotu lze vypočítat ze vzorce:

$$\rho = \frac{A_r * n}{N * V} \quad (12)$$

Kde značí:	ρ	–	hustota [kg/m ³]
	A_r	–	poměrná atomová hmotnost [-]
	n	–	počet atomů v základní buňce krystalové mřížky [-]
	N	–	Avogadrova konstanta ($N = 6,022 * 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) [mol ⁻¹]
	V	–	objem základní krystalové mřížky [m ³]

Známější vzorec pro výpočet hustoty, který bere hustotu z makroskopického pohledu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

Kde značí: ρ – hustota [kg/m³]
 m – hmotnost součásti [kg]
 V – objem součásti [m³]

Elektrická vodivost

Elektrické vodivosti ρ je hodnota reprezentující schopnost materiálu vést elektrický proud. Její jednotkou je 1 ohm-metr, který popisuje odpor krychle o hraně 1 m, kterou protéká mezi protilehlými stěnami 1 A při použitím napětí 1 V. Elektrickou vodivost udávají materiálu jeho volné elektrony a jejich chování v materiálu. Mírou elektrické vodivosti je měrný elektrický odpor neboli rezistivita, jenž je obrácenou hodnotou měrné elektrické vodivosti γ' , která je však ve starších jednotkách siemensch. [10]

Z hlediska elektrické vodivosti se materiály dělí na izolanty, polovodiče a vodiče. Většina kovů je však vodivá. [10]

Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti materiálu se dále rozdělují:

- Teplotní objemová roztažnost
- Měrná/molární tepelná kapacita
- Tepelná vodivost
- Teplota tání

Teplotní objemová roztažnost udává změnu objemu materiálu při působení zvýšené teploty za stálého tlaku. Zvýšená teplota materiálu zapříčiňuje větší kmitavost elektronů v krystalické mřížce, což má za následek právě zvětšení objemu tělesa. [10, 14]

Měrná nebo *molární tepelná kapacita* udává teplo, které musíme dodat 1 kg, resp. 1 mol látky k ohřátí o 1°C. Při použití hmotnostní charakteristiky látky se měrná tepelná kapacita značí c_p při konstantním tlaku nebo c_v při konstantním objemu. V případě molární charakteristiky objemu se molární tepelná kapacita značí C_p nebo C_v , kde indexy značí stejné podmínky jako u měrné tepelné kapacity. [10, 14]

Tepelná vodivost se označuje schopnost materiálu vést teplo, konkrétně rychlost šíření tepla z teplejší části do chladnější části. Tato vlastnost je důležitá například u kovových forem pro slévání, kdy můžeme touto vlastností mírně regulovat odvod tepla z odlitku do formy. Mírou tepelné vodivosti je měrná tepelná vodivost označována λ [W/m¹*K⁻¹]. [10, 14]

Teplota tání je teplota kdy materiál přechází z pevného skupenství do skupenství kapalného. Tato teplota se nazývá T_T a je důležitá především pro obor slévárenství. [6, 10]

Magnetické vlastnosti

Magnetičnost materiálu je založena na vzájemném elektrodynamickém působení elektronů, pohybujících se kolem jader mající vlastní spin. Závisí zde na polaritě těchto spinů skupiny sousedních atomů. Při stejné polarizaci těchto spinů vzniká magnetický moment, v opačném případě se sousední spiny ruší. [10]

2.4.3 Chemické vlastnosti materiálu

Chemické vlastnosti materiálu mají vliv především na schopnosti materiálu pracovat v různých prostředích a mají vliv na jeho životnost.

Mezi základní chemické vlastnosti materiálu se řadí:

- Odolnost proti chemikáliím
- Odolnost proti korozi
- Žáruvzdornost
- Žárupevnost
- Odolnost proti solnému nebo vlhkému prostředí

Odolnost proti chemikáliím se zabývá hodnocením účinku chemikálií na materiál v závislosti na zkrácení jeho životnosti. [10]

Odolnost proti korozi je u kovů velmi cenná vlastnost. Jak je již známo tak materiál vlivem oxidace ze vzduchu a jiných vlivů koroduje. Děj korodování materiálu na vzduchu však může velmi ovlivnit i prostředí v jakém se materiál nachází. Jedná se především o problematiku vlhkosti, přítomnost slané vody aj. [10]

Žáruvzdorností označujeme schopnost materiálu dlouhodobě odolávat vysokým teplotám. Zpravidla to bývají materiály s vysokou teplotou tání. [10]

Žárupevnost je schopnost materiálu udržet si své mechanické vlastnosti i za zvýšené teploty. [10]

2.5 Technologické zkoušky materiálu

Technologické zkoušky se zabývají vhodností použití materiálu pro danou technologickou operaci. Vhodnost některých materiálů na danou technologickou operaci by se však mohla určit z mechanických vlastností. Např. při zkoumání vhodnosti materiálu pro technologii tváření je důležitým kritériem tažnost. Avšak v technické praxi bývají v současné době tak specifické podmínky (stavy napjatosti, rychlosti deformace, aj.), že není možné technologické vlastnosti posuzovat podle těchto mechanických vlastností a tuto skutečnost zobecnovat. [5, 8, 12]

Z tohoto důvodu se realizují technologické zkoušky, které se snaží v největší míře napodobit příslušný výrobní proces, pro který je daný materiál testován. [5]

Výsledky takovýchto zkoušek nemusí být nutně definovány základními jednotkami, ale výsledkem takovéto zkoušky mohou být pouze 2 stavy, kdy materiál buď vyhovuje, nebo nevyhovuje. [5, 8]

V praxi může mít každá firma své vlastní technologické zkoušky. Avšak v průběhu času se některé technologické zkoušky ustálily a vytvořily se pro ně metodiky a normy. To umožňuje zkoušet různé materiály při stejných podmínkách, zaručuje opakovatelnost zkoušek a dává nám možnost subjektivního hodnocení. [5, 8]

Technologické procesy u kovových materiálů mohou pro samotnou realizaci technologie vyžadovat následující vlastnosti:

- Tvářitelnost
- Slévatelnost
- Svařitelnost
- Obrobitelnost
- Spékatelnost

Dále můžeme rozlišovat technologické vlastnosti:

- Vhodnost pro tepelné zpracování
- Vhodnost pro povrchovou úpravu

Vzhledem k obsahu práce se budeme zabývat pouze technologickou vlastností tvářitelnost materiálu.

Tvářitelnost daného materiálu závisí především na teplotě. Oprostíme-li se však od zkoumání tvářitelnosti za tepla, zbude nám tvářitelnost za studena, která závisí na:

- chemickém složení
- struktuře
- stavu napjatosti
- způsobu deformace
- rychlosti deformace

Zkoušky tvářitelnosti materiálu:

- zkoušky tvárnosti za studena
- zkoušky tenkých plechů
- zkoušky pro získání mezního přetvoření

2.5.1 Zkoušky tvárnosti za studena

Cílem těchto zkoušek je zjištění deformační schopnosti materiálu při působení statickým ohybovým namáháním. Tyto zkoušky se také mohou nazývat jako zkoušky lámavosti. Zkoušky se provádí za pokojové teploty a realizují se na lisech nebo trhacích strojích s použitím přípravků. [5, 8, 12]

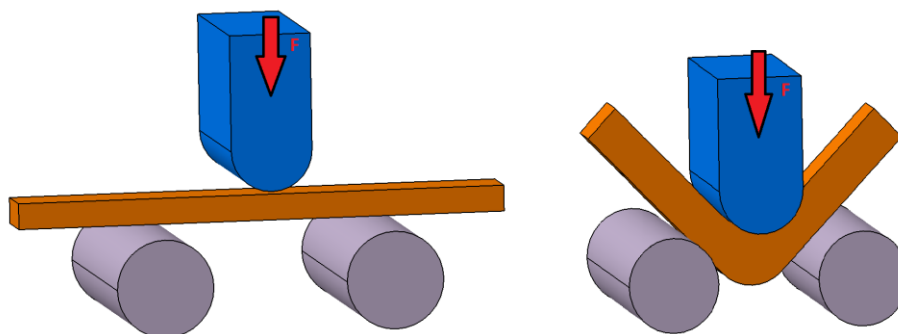
Zkoušky tvárnosti se dají dělit:

- do předepsaného úhlu
- do 180° s nebo bez distanční vložky
- do 180° s dosednutím ramen

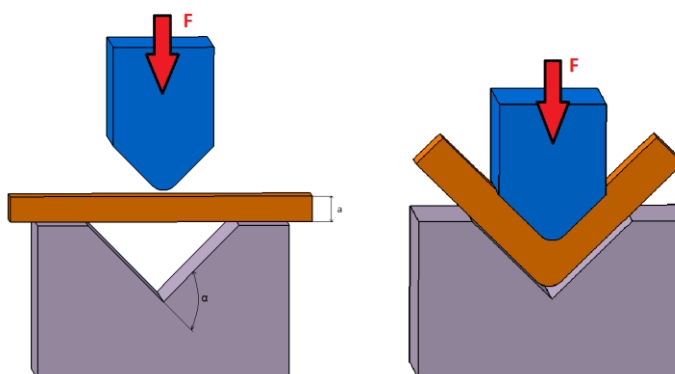
Obecným principem zkoušek je vytvoření ohybového momentu ve zkušební tyči nebo plechu, přičemž se zkoumá, zda vzorek dosáhne požadovaných deformací v podobě dosaženého úhlu. Při destrukci vzorku v podobě povrchové praskliny ještě před dosažením požadovaného úhlu, tedy požadované deformace, se hledá okamžik, kdy vznikne první povrchová prasklina. Prasklina vzniká vždy v místě odlehlém proti trnu, kde je největší tahové napětí, které vychází z principu stavu deformace při prostém ohybu. [5, 6, 8]

Zkoušky tvárnosti za studena do předepsaného úhlu

Principem zkoušky je působení vnější silou F na materiál, který je ustaven a) na dvou podporách, b) do matrice tvaru V o úhlu 90° . Méně častá je poté metoda ohýbání tyče přes trn. Vnější síla působící do středu podpor nebo středu matrice V tvaru v materiálu způsobí ohybový moment. Rychlost deformace je malá, proto se uvádí ohybový moment jako statický. Cílem zkoušky je pak dosažení určitého úhlu bez vzniku trhliny. [8, 9]



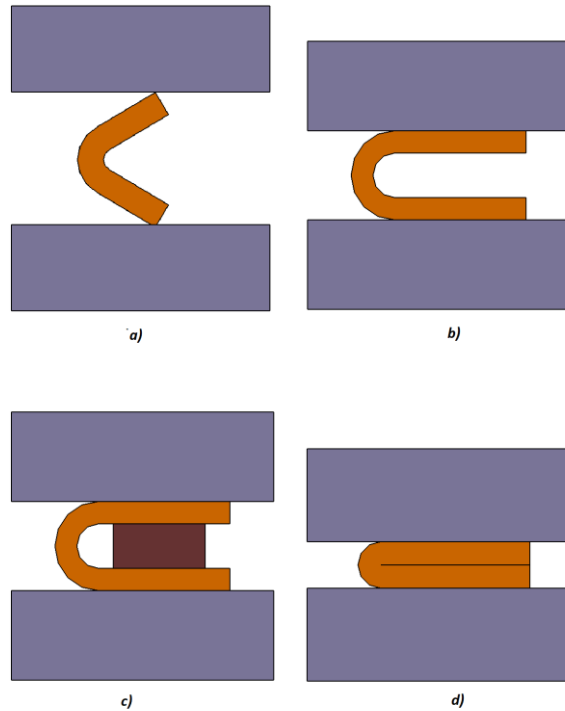
Obr. 16: Princip zkoušky tvárnosti za studena mezi dvěma podporami



Obr. 17: Princip zkoušky tvárnosti do matrice V tvaru

Zkoušky tvárnosti do 180°

Cílem těchto zkoušek je zkušební tyč nebo plech ohnout do 180°. Snaha je opět dosáhnout tohoto stavu, nebo najít okamžik, kdy dojde k vytvoření praskliny. Tyto zkoušky se realizují výhradně na lisech. Opět je používána statická síla vyvolávající ve zkušebním vzorku ohybový moment. [5, 8, 9]



Obr. 18: Schéma zkoušky tvárnosti: a, b) ohyb o 180°, c) ohyb o 180° s distanční vložkou, d) ohyb o 180° s dolehnutím ramen

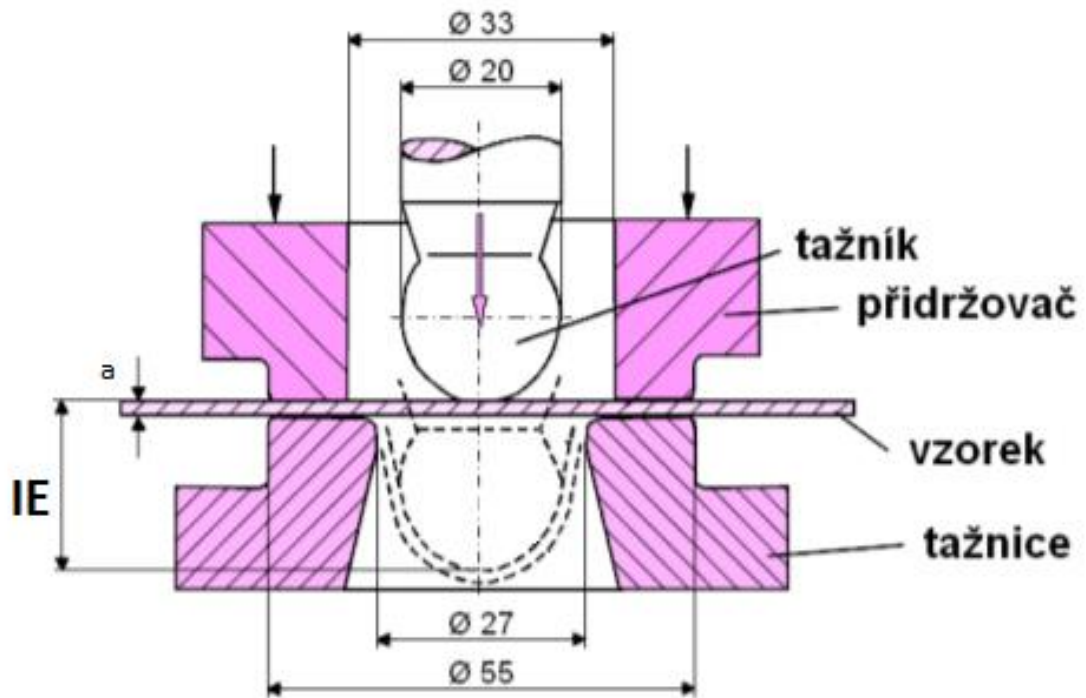
2.5.2 Zkoušky tenkých plechů

Zkoušky tenkých plechů byly navrženy speciálně pro technologie lisování a tažení. Jde v nich o zkoušení tenkých plechů, tedy plechů do tloušťky 2 mm. Tyto zkoušky slouží především pro zkoušení vhodnosti plechu na hluboký tah. Pro ostatní technologie se využívají spíše zkoušky střídavým ohybem plechů a pásů, aj. [8]

2.5.2.1 Zkouška hloubením plechů dle Erichsena

Zkouška se provádí na speciálních strojích pro zkoušení hloubením dle Erichsena nebo na trhacím stroji za pomoci přípravků. Jedná se o zkoušku vycházející z normy ČSN ISO 8490, která nahrazuje původní normu ČSN 42 0406. [5]

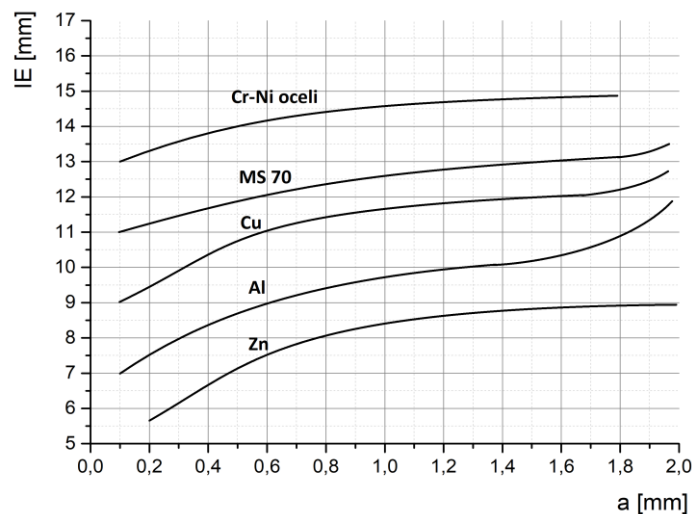
Princip zkoušky hloubením dle Erichsena, který je schematicky zobrazen na Obr. 19, spočívá ve vtlačování leštěného kulového razníku o průměru 20 mm do pevně upnutého plechu (min. 10 kN). Osovým postupem razníku se na plechu vytváří viditelný kulový vrchlík. Při hloubení se snižuje tloušťka plechu a dochází k jeho zpevňování. Razník působí až do vzniku první viditelné trhliny. Okamžik vzniku trhliny se dá odečíst buď vizuálně, tedy nejčastěji optickými metodami, které sledují digitálně celý děj, nebo sledováním působící síly, která při vzniku trhliny začne klesat. [5, 8, 12, 15]



Obr. 19: Princip zkoušky hloubením dle Erichsena [15]

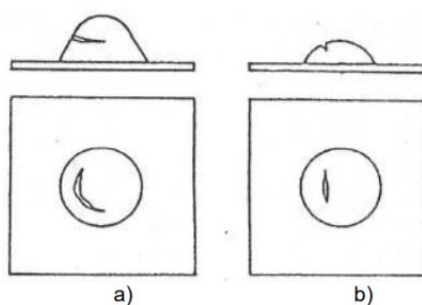
Výsledkem zkoušky je poloha razníku od předem nastavené nulové hodnoty, která je na povrchu plechu před vniknutím razníku. Nulová hodnota se dá však odečíst také pomocí silového snímače na poháněcí jednotce razníku. Výsledkem může být také maximální síla změřená snímačem na poháněcí jednotce razníku. Norma však jako výsledek zkoušky udává polohu razníku, kterou udává označení rozměru IE, neboli slovy index hloubení, nebo také Erichsenovo číslo. [5, 8, 15]

Graf závislosti indexu hloubení na tloušťce je pro některé materiály znázorněn na následujícím obrázku:



Obr. 20: Graf závislosti indexu hloubení na tloušťce [5]

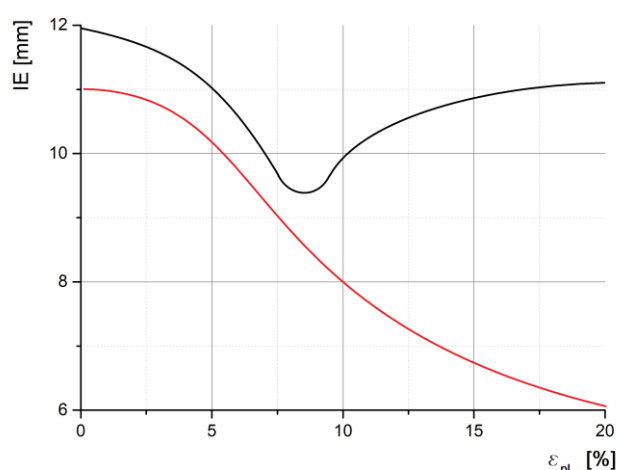
Při této zkoušce je velmi důležitý vzhled výsledného kulového vrchlíku. Ten nám o materiálu může poskytnout mnohé informace. Konkrétně poloha vzniklé trhliny nám může napovědět, zda je materiál dobře či hůře tvářitelný. Při trhlíně vzniklé po vrstevnicích kulového vrchlíku je materiál dobře tvářitelný. Naopak při trhlíně, která vede radiálně přes vrchlík je testován materiál se špatnou tvářitelností. Další informací nám může poskytnout povrch kulového vrchlíku. Pokud je kulový vrchlík hladký, značí to jemnozrnnou strukturu materiálu. Naopak je-li povrch zhrublý, značí to zhrublou strukturu. [5, 8, 12, 15]



Obr. 21: Tvar trhliny pro Erichsenově zkoušce a) plech vhodný pro hluboké tažení, b) plech nevhodný pro hluboké tažení [16]

V současné době se zkoušky hloubením dle Erichsena provádí na hydraulických strojích, tedy lisech nebo trhacích strojích s použitím přípravků. Dříve se však používal stroj mechanický (ruční). U takovéhoho mechanického stroje se přidržovací síla a síla potřebná k průniku razníku vytvářela pomocí vřetene, které je ukončené ručním kolem. Tyto stroje však neumožňují realizovat podmínky podobné současné praxi, kde se vyskytují velice velké rychlosti deformace. Vznik trhliny je zde pozorován v zrcátku, které je namířeno do matrice z druhé strany oproti razníku. [5]

Při hlubokém tažení je občas potřeba více tahů. To vyžaduje mezioperační žíhání pro odstranění deformačního zpevnění a pro obnovení plastických vlastností materiálu. Významnost tohoto mezioperačního žíhání je zobrazena na Obr. 22, který zobrazuje závislost indexu hloubení na poměrné plastické deformaci. Červená křivka značí situaci, kdy nebylo prováděno mezioperační žíhání, černá poté zobrazuje situaci s použitím mezioperačních žíhání. [5]



Obr. 22: Graf závislosti mezioperačního žíhání na index hloubení

2.5.2.2 Kalíšková zkouška

Tato zkouška se opět využívá pro zjištění vhodnosti materiálu pro hluboký tah. Zkouška je však poměrně zdlouhavá z důvodu nutnosti množství opakování pro zjištění potřebných výsledků. Tato zkouška není normalizovaná. [16]

Princip zkoušky je založen na principu prostého tahu, kdy tažníkem působíme silou na tenký plech, který je upnutý mezi tažnicí a přidržovačem. Výsledkem zkoušky je vzniklý válcový kalíšek. Nutnost opakování zkoušky je zde z důvodu hledání maximálního průměru kruhového přístřihu, při kterém nevzniknou na kalíšku trhliny. Tento rozměr je poté třeba dosadit do vztahu (14) pro zjištění výsledného součinitele m . [8, 16]

$$m_k = \frac{d}{D} \quad (14)$$

Kde značí: m_k – míra hlubokotažnosti z kalíškové zkoušky [–]
 d – průměr tažníku [mm]
 D – maximální průměr přístřihu [mm]

Při kalíškové zkoušce se může také pozorovat anizotropie mechanických vlastností testovaného materiálu. Jako míra ke zjištění anizotropie slouží vzniklá cípatost na vytvořeném kalíšku. Anizotropii je možné zjistit i tak, že se na přístřih vyznačí několik kružnic, které se následně zobrazují i na výsledném kalíšku. Jelikož se jedná o rotační součást, měly by být kružnice při postavení kalíšku na dno vodorovné. [17]

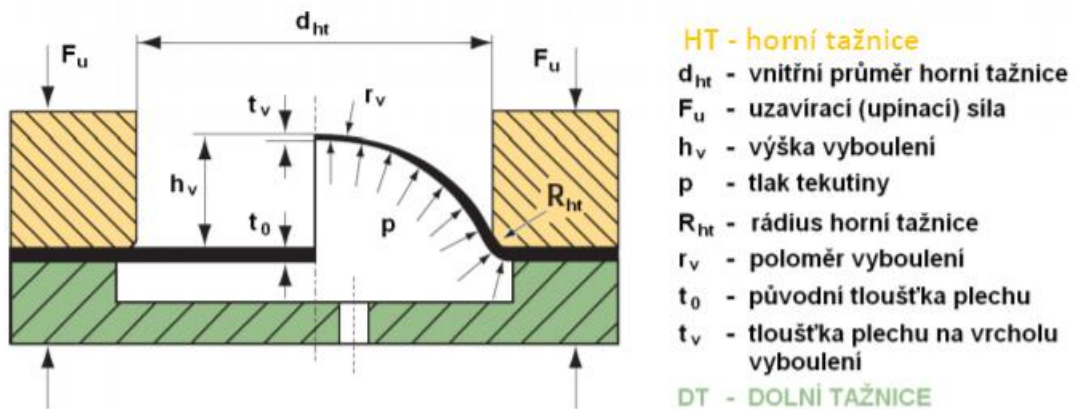
2.5.2.3 Zkouška hloubením plechů dle Engelhardta

Tato zkouška kombinuje zkoušku hloubením tenkých plechů dle Erichsena a kalíškovou zkoušku. Razníkem je zde válcový tažník se zaoblenými hranami, který této zkoušce udává větší vhodnost pro zkoušení materiálů pro technologii tváření zejména rotačních součástí. [8]

2.5.2.4 Hydraulická zkouška vyboulováním (Bulge test)

Hydraulická zkouška vyboulováním plechu zjišťuje chování materiálu při dvouosém namáhání. Provádí se zpravidla při pokojové teplotě, na lisech. [6]

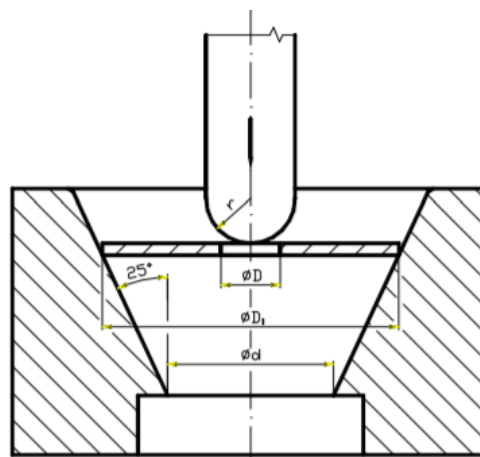
Princípem zkoušky je vyboulování plechu, který je pevně upnut mezi dvěma tažnicemi. Spodní tažnicí je pak do uzavřeného prostoru pod plechem postupně přiváděna kapalina (olej), která stlačením v uzavřeném prostoru vytvoří potřebný rovnoměrný tlak pro postupné vyboulení plechu. Tlak kapaliny se zvyšuje do vzniku první trhliny. [6, 16, 17]



Obr. 22: Princip Bulge testu [16]

2.5.2.5 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)

Princípem zkoušky tažením v kuželové tažnici je tažení kruhového přístřihu, který může a nemusí mít ve svém středu otvor. Tažení pokračuje do okamžiku, kdy vznikne první trhlina, která se objevuje nejčastěji na hraně otvoru nebo na dně výtažku. [17]



Obr. 23: Princip Fukuiho zkoušky [16]

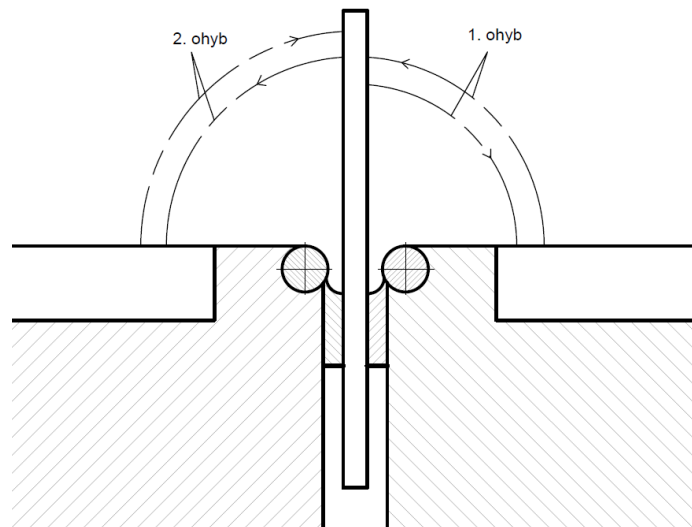
Výsledkem zkoušky je poměr m_F :

$$m_F = \frac{d_1}{D_0} \quad (15)$$

Kde značí: m_F – míra hlubokotažnosti z Fukuiho zkoušky [-]
 d_1 – největší průměr výtažku při vzniku trhliny [mm]
 D_0 – průměr přístřihu [mm]

2.5.3 Zkouška plechů a pásů střídavým ohybem

Principem této zkoušky je střídavé ohýbání pevně upnutého plechu nebo pásu o 90° přes válcové podpory. Plech se tedy střídavě ohýbá na obě strany o 90° do té doby, až nastane jeho porušení v podobě praskliny nebo úplného přetržení. Jako jeden ohyb se počítá ohnutí ze svislé polohy o 90° a návrat do svislé polohy. Druhý ohyb pokračuje stejně, avšak na druhou stranu. Ohyb, při kterém vznikla prasklina, se již do počtu ohybů nezapočítává. Tato zkouška se využívá pro plechy a pásy do 3mm. Poloměr válcové podpory je dán normou nebo v závislosti na tloušťce zkoušeného materiálu. Zkouška probíhá při pokojové teplotě. [5, 8]



Obr. 24: Princip zkoušky plechů a pásů střídavým ohybem

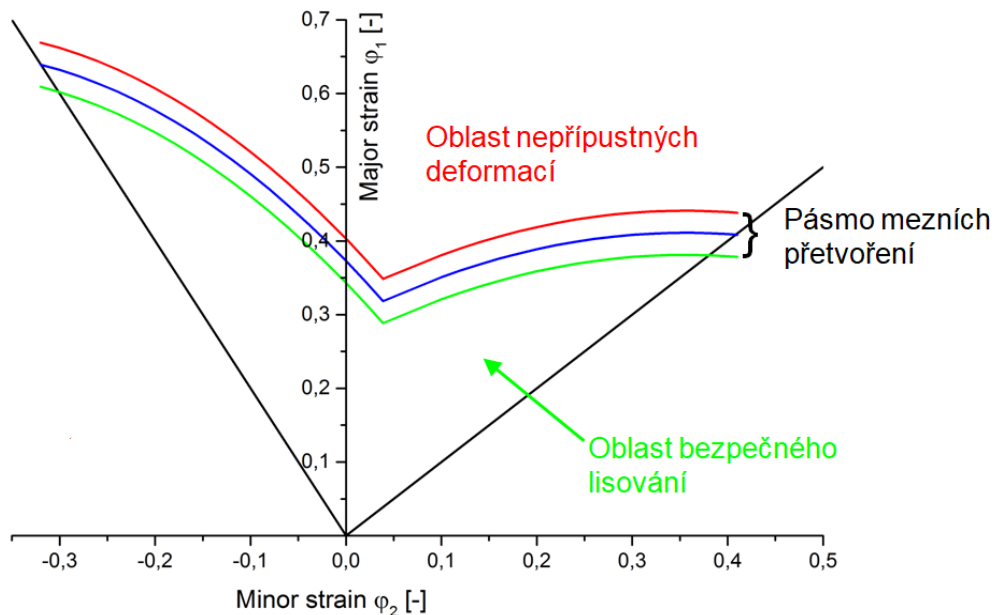
2.5.4 Stanovení diagramu mezního přetvoření (FLD)

Tvářitelnost lze také vyhodnocovat dle diagramu mezních přetvoření, který se označuje jako FLD (Forming limit diagram). Tento diagram je důležitý především pro technologii lisování, kdy diagram zobrazuje kritické hodnoty hlavních a vedlejších deformací, tedy i napětí. Rozlišují se zde hodnoty deformací, které jsou bezpečné, deformace na hranici plastické stability a deformace, které vedou ke vzniku porušení výrobku. Hranice mezi bezpečnými deformacemi a deformacemi vedoucími k porušení se označuje FLC (Forming limit curve). [6]

Diagram se skládá z mnoha zkoušek při různém tvaru zkušebního plechu, kdy se mění poměr hlavní a vedlejší deformace:

$$m_{\varphi} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (16)$$

Kde značí: m_{φ} - poměr hlavní a vedlejší deformace [-]
 φ_2 - vedlejší deformace [-]
 φ_1 - hlavní deformace [-]



Obr. 25: Diagram mezních přetvoření [6]

Pro získání FLD diagramu se používá nejčastěji Nakazima test, který dokáže vytvořit levou i pravou stranu křivky. Test se provádí vypínáním zkušebního přístřihu daného tvaru pevným polokulovým tažníkem. [6]

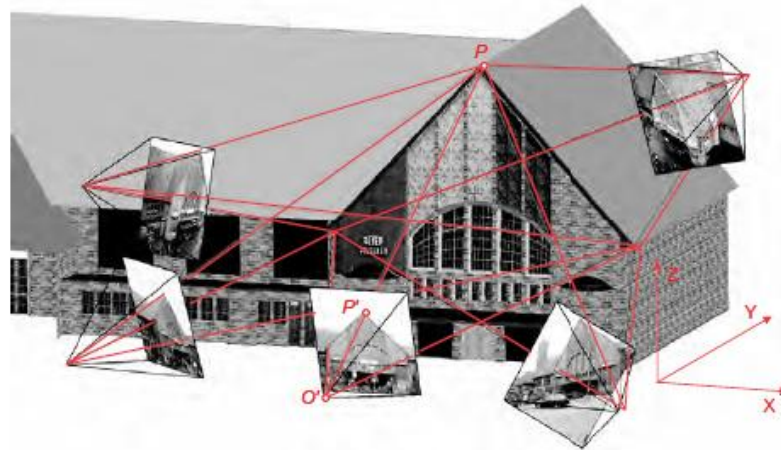
Další možností pro získání diagramu mezního přetvoření je tahová zkouška s různým tvarem vrubu uprostřed zkušební tyčky. Touto zkouškou však získáme data pouze pro levou část FLD vlivem stavu napjatosti vycházejícího ze zkoušky. Zkouška má výhodu ve své jednoduchosti. [6]

Možností získání pravé části zkoušky je hydrostatická zkouška vyboulováním, kde se opět testují různé tvary zkušebního plechu. Konkrétně se jedná o různé otvory od malé elipsy až po kružnici. [6]

2.6 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je věda zabývající se získáváním informací z obrazového nebo fotogrammetrického záznamu. Pomocí fotogrammetrických bodů lze nepřímou metodou určit tvar a polohu objektu zachyceného na snímku. Slovo fotogrammetrie je složeno z řeckého *Fotos* – světlo, *Gramma* – záznam a *Metrie* - měření. [18, 19]

Jelikož fotogrammetrie vychází z pořizování snímků, je třeba říci, že fotografický snímek je považován za ideální, pokud je středovým průmětem zobrazovaného předmětu. Cílem fotogrammetrie je pak vzájemné přeměňování těchto průmětů z více snímků. [18]



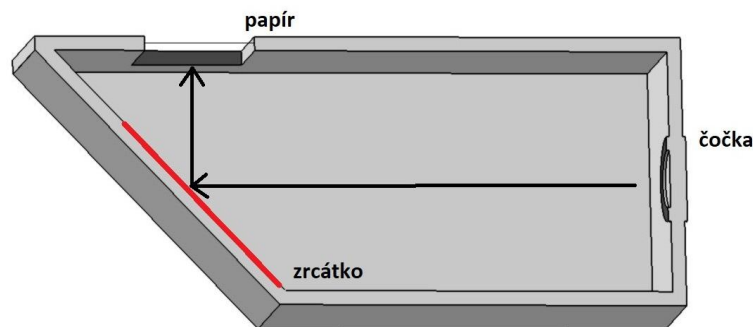
Obr. 26: Princip skládání středových průmětů [19]

Fotogrammetrie se od jiných způsobů měření liší tím, že samotný sběr informací a měření se neprovádí přímo na měřeném tělese ale na zhotovených snímcích. [19]

2.6.1 Historie fotogrammetrie

Vzhledem k tomu, že fotogrammetrie vychází z přeměňování středových průmětů objektů měření lze počátek fotogrammetrie datovat do roku 1032 kdy arabský učenec Alb in Al Haithm popsal „*cameru obscurum*“. Tento významný objev je dokonce zobrazen na irácké bankovce. [18]

Následně Leonardo Da Vinci popsal dírkovou komoru pro konstrukci středových průmětů. Ta však nebyla moc využívána díky malé světelnosti. Tu se podařilo zlepšit Janu Keplerovi. Zde byl tedy položen skutečný základ fotogrammetrie. [18]



Obr. 27: Schéma zařízení „Camera obscurum“

Mezi další postavy vývoje pořizování snímků a tedy i fotogrammetrie se řadí Schott Kasper, který zkonstruoval první přenosnou komoru. J.H.Schulze poté přispěl vynalezením světlocitlivého AgNO_3 . [18, 19]

Prvního praktického využití se fotogrammetrie dočkala v roce 1726 v Alpách, později pak pro pořizování plánu pobřeží ostrova Santa Cruz. Název fotogrammetrie poprvé použil Němec A.Meydenbauer roku 1858. Ten fotogrammetrii použil k pořizování snímků historických objektů, z nichž mnoho se dochovalo dodnes. [18]

S rozvojem počítačů v posledních padesáti letech přišla i zásadní změna ve fotogrammetrii. Analytickou metodu nahradila metoda digitální a velký význam má i vznik laserového skenování. [18]

2.6.2 Základní rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie se obecně dělí na fotogrammetrii pozemní a leteckou. Toto rozdělení však s příchodem digitálních metod ztratilo své opodstatnění. Dříve se totiž fotogrammetrie pozemní a letecká prováděla různými technologiemi a zařízeními. To dnes již neplatí. [18, 19]

Rozdělení dle polohy stanoviška

- pozemní – *nepohyblivé stanoviško, vzdálenost do 500 m*
- letecká – *pohyblivé stanoviško, vzdálenost do 500 m*
- vesmírná – *vzdálenost větší než 200 km*

Rozdělení dle počtu a konfigurace snímků

- jednosnímková – *pro rovinné měření*
- vícesnímková – *pro 3D měření*

Rozdělení dle způsobu zpracování

- analogové – *analogové kamery, mechanicko-optické vyhodnocení*
- analytické – *analogové snímky, vyhodnocení pomocí počítače*
- digitální – *digitální snímky, vyhodnocení pomocí počítače*
- videogrammetrie – *využití videokamer*

Rozdělení dle typu výstupu

- grafické – *vyhodnocení na kreslícím stole, zastaralé*
- číselné (numerické) – *vektorové nebo rastrové výsledky z počítačové techniky*

2.6.3 Matematické základy fotogrammetrie

Obor fotogrammetrie pracuje s mnoha matematickými základy, které je třeba znát pro správné použití fotogrammetrie. Jedná se o základy polohy komory v prostoru, geometrii snímacích paprsků, souřadnicové systémy aj. [18]

Snímková orientace pozemní fotogrammetrie

V pozemní fotogrammetrii rozlišujeme dva druhy orientace, jejichž znalost zaručuje správné vyhodnocení snímku:

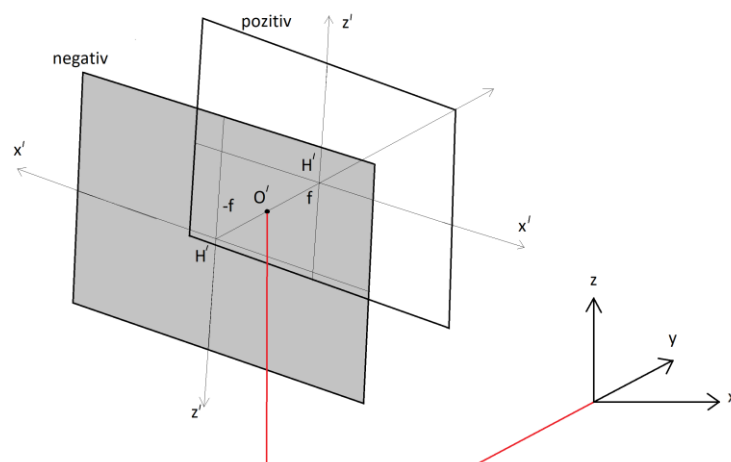
- Vnitřní orientace
- Vnější orientace

Vnitřní neboli interní orientace obsahuje vztahy popisující geometrii paprsku uvnitř komory. Mezi hodnoty vnitřní orientace patří konstanta komory f , poloha hlavního bodu H' a případně průběh radiální distorze. Tyto hodnoty jsou však neměnné. Jsou udány výrobcem komory nebo se dají určit laboratorním měřením. Pokud známe tyto veličiny, poté pořízené snímky jsou označeny jako měřické. [18]

Mezi prvky vnější neboli externí orientace se řadí souřadnice středu vstupní pupily X, Y, Z a sklony ω, ϕ, κ . Tyto prvky jsou pro každý snímek odlišné. Souřadnice středu vstupní pupily se dá zaměřit jakoukoliv geodetickou metodou. Sklony se pak dají nastavit komorou a to s dostatečnou přesností. [18]

Volba souřadného systému pozemní fotogrammetrie

Souřadný systém ve fotogrammetrii je klasické Kartézské souřadný systém, kde osy x' a z' jsou osy polohopisné a osa y' je prostorová složka, tedy vzdálenost k měřenému předmětu.



Obr. 28: Souřadný systém při pozemní fotogrammetrii

Soustava snímkových souřadnic

Snímkové souřadnice definujeme takto tak, že počátek této souřadnicové soustavy je umístěn do středu snímku označeného jako M' . Ten je dán spojnicí ofotografovaných rámových značek na snímku. Důležité je však změřit i vzdálenost od hlavního bodu H' . Pokud M' není totožné s H' což je ideální stav, poté se musí měřit odchylka těchto bodů a v závislosti na tom vytvořit posun. [18]

Další matematické modely

Fotogrammetrie je obor velmi obtížný, proto je matematických modelů velké množství. Zavádí se spousta dalších souřadnicových systémů jako soustava fiktivního snímku, soustava svislého snímku, soustava modelových souřadnic, aj. Dále se ve fotogrammetrii využívá transformačních vztahů mezi jednotlivými systémy. Je tedy nutné zavádět matice rotace či posunu souřadného systému nebo matice změny měřítka. [18]

2.6.4 Fotogrammetrie v technické praxi

Obor fotogrammetrie má velké využití v dnešní technické praxi, kde je třeba využití optických metod měření, které zrychluje veškeré měřicí procesy. Fotogrammetrií se v technické praxi dají zjišťovat rozměrové a kinetické veličiny. Rozměrové veličiny nám pomáhají k digitalizaci předmětu, kdy jeho veškeré nasnímkované rozměry lze vložit do CAD modelu. Kinetické rozměry poté slouží k odvození stavů napjatosti, deformačního chování nebo zjištění pohybových charakteristik. [18]

Pro současnou technickou praxi jsou důležité především hodnoty rychlostí snímkování či přesnosti rozměrů, flexibilita, mobilita či záznamy ve vysokém rozlišení. [17, 20]

Tyto nároky se neustále zvyšují. Především v dynamické fotogrammetrii se dosahuje až 2 000 fps při poměrně kvalitním rozlišení. Tento druh fotogrammetrie se realizuje například při cash testech dopravních prostředků, kdy se celý měřený děj uskuteční během 100-150 ms.

2.7 Oceli pro automobilový průmysl

V dnešní době je mnoho druhů materiálů s odlišnými vlastnostmi a při jejich výběru pro danou technologii a dané odvětví. Pro automobilový průmysl se používají hlubokotažné plechy a plechy s vysokou pevností. Výhodou těchto materiálů je jejich dobrá tvářitelnost a svařitelnost. Bez těchto technologií si výrobu auta nelze ani představit. Nevýhodou pak je vyšší měrná hmotnost nebo nutnost ochrany proti korozi. [21, 22]

2.7.1 Hlubokotažné oceli

Hlubokotažné materiály jsou jedny z nejpoužívanějších kovových materiálů pro výrobu karoserie. Jsou to oceli s nízkým obsahem uhlíku určené pro technologii hlubokého tažení. Uhlík je zde obsažen max. do 0,1% a hlavní legujícím prvkem je mangan. Tyto materiály mají feritickou strukturu s lamelami karbidu železa, které jsou rozloženy podél feritických zrn.

Tažnost u těchto materiálů dosahuje hodnot 25 - 50% a meze kluzu okolo 250 MPa a meze pevnosti okolo 400 MPa. [21, 22]

IF oceli

Označení IF oceli značí, že daný materiál neobsahuje intersticiální uložené atomy. Označení je převzato z anglického Interstitial – Free. Jedná se o oceli s extrémně nízkým obsahem uhlíku, což zajišťuje velmi dobrou tažnost. Ztráta uhlíku však zapříčiní pokles pevnostních vlastností. Tomu však bráníme přidáním mikrolegujících prvků. (např. Ti, Nb a V) [21, 22]

2.7.2 Pevnostní oceli

Pevnostní oceli se vyznačují vyšší mezí kluzu než u hlubokotažných ocelí. Konkrétně lze dosáhnout hodnot meze kluzu až 500 MPa. Tyto oceli mají také velké zastoupení ve výrobě karoserií, kde se velmi často používá IF ocelí s BH efektem. [21, 22]

- **IF oceli s BH efektem**

Označení „s BH efektem“ jsou oceli s kontrolovaným procesem žhání, což má za následek zvýšení pevnostních vlastností. Žhání probíhá za podmínek nízkoteplotního staticko-napěťového stárnutí (při 170°C), při němž vzniká interakce mezi rozpuštěnými atomy uhlíku a dislokacemi, které vznikli při tváření. Vzniká tak zpevňovací proces vlivem vzniku Cottrelovy atmosféry na dislokacích a vlivem precipitace karbidů díky této karbidické atmosféře. [21, 22]

- **Mikrolegované oceli**

Mikrolegované oceli se vyznačují malým obsahem uhlíku. Přidávají se mikrolugující prvky jako jsou Mo, Ti, Al, Nb a další. Důležitá je zde správná kombinace mikrolegujících prvků a vhodným množstvím. [21, 22]

2.7.3 Vysokopevnostní oceli

Tyto oceli dosahují meze pevnosti až 1500 MPa. Používané jsou především tzv. vícefázové oceli či TWIP oceli. Jejich struktura je tvořena alespoň dvěma fázemi. Nějakou měkčí strukturou (feritickou) a tvrdší strukturou jako je struktura bainitická nebo martenzitická. [21, 22]

- **DP oceli (Dual Phase)**

Jedná se o oceli s feritickou maticí, která zajišťuje plasticitu a pevnost zde zaručuje transformací zbytkového stabilizovaného austenitu na martenzit. [21, 22]

- **Trip Oceli**

Trip oceli obsahují dokonce tři fáze. Jsou jimi měkká feritická matrice, tvrdý bainit a zbytkový austenit. Během tváření se pak zbytkový austenit stabilizuje nebo se přemění na martenzit. [21, 22]

- **TWIP oceli**

TWIP oceli jsou materiály s velkým potenciálem do budoucnosti. Jedná se o materiály velmi dobrých pevnostních vlastností (mez pevnosti až 1200 MP při tažnosti až 50%). [21, 22]

- **CP oceli**

CP oceli jsou v podstatě TWIP oceli s jemnozrnnou strukturou které je dosaženo mikrolegurami Nb, Ti nebo V. Zjemnění struktury vede ke zpevnění materiálu. Tyto materiály se také vyznačují schopností absorbovat deformační energii, což je hojně využíváno pro deformační prvky při výrobě automobilů pro pohlcení případné nárazové energie při dopravní nehodě. [21, 22]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části je zjištění vlivu rychlosti deformace na deformační chování plechu při Erichsenově zkoušce hloubením. V odborné literatuře jsou publikovány výsledky měření, z kterých je patrné, že zvyšující se rychlost deformace negativně ovlivňuje tvárnost daného materiálu. Standardní provedení zkoušky hloubením dle Erichsena neodpovídá reálným podmínkám tváření plechu, kde jsou rychlosti deformace několikrát vyšší. Cílem navrženého řešení DP tak bylo přiblížit se reálným podmínkám při zkoušce hloubením dle Erichsena a zjištění skutečných materiálových vlastností očekávatelných při tváření.

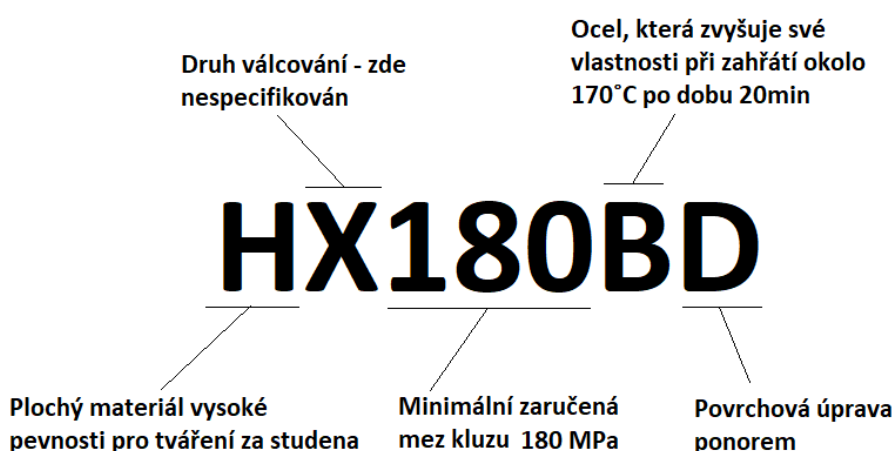
Experiment vycházel z normy ČSN EN ISO 20482, kdy byl do vzorku plechu vtlačován polokulový tažník definovaných rozměrů. Princip zkoušky je patrný z *Obr. 33*. Kritériem pro vyhodnocení vlivu rychlosti deformace na mezní stav je vznik trhliny na vzorku a tomu odpovídající hloubka vniku razníku do plechu. Pro naplnění cílů diplomové práce byly zvoleny různé rychlosti pohybu polokulového razníku 1 mm/min., 10 mm/min., 50 mm/min., 100 mm/min., 200 mm/min., 400 mm/min., 600mm/min. V rámci řešení byl zjišťován případný vliv takto zvolených rychlostí na výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena.

Experiment byl také sledován fotogrammetrickým zařízením pro optické sledování děje deformování vzorku, což je alternativní vyhodnocovací metoda pro zjištění průběhu deformace na vzorku.

3.1. Materiál

Pro měření byl zvolen materiál HX180BD+Z100MCO (označení dle normy EN 10346). S ohledem na princip a nejčastější využití zkoušky v oblasti tváření byl zvolen tento hlubokotažný materiál.

Materiál HX180BD+Z100MCO je přímo určený pro hluboké tažení. Dal by se definovat jako plochý válcovaný materiál určený pro tváření za studena s ochranným povlakem zinku nanášeným ponorem. Minimální zaručená mez kluzu je zde rovna uváděnému číslu v označení, tedy 180MPa. Ekvivalentním označením je také číselné označení 1.0914 (dle normy EN10346).



Obr. 29: Označení oceli HX180BD

Tab. 2: Obsazení jednotlivých prvků v oceli HX180BD

Označení oceli	Číselné označení	Obsazenost chemických prvků [%]							
		C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al max.	Nb max.	Ti max.
HX180BD	1.0914	0,1	0,5	0,7	0,06	0,025	≤ 0,1	0,09	0,12

Tab. 3: Vlastnosti materiálu HX180BD

Název oceli	Číselné označení	Zaručená mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost (80mm) [%]	Koeficient normálové anizotropie [-]
HX180BD	1.0914	180 - 240	290 - 360	34	1,5

Koncové označení +Z100MCO značí, že vybraný materiál je povrchově upraven technologií žárového zinkování provedenou ponořením připraveného pásu plechu do roztavené lázně obsahující minimálně 99% zinku. O této skutečnosti informuje písmeno Z. Hodnota 100 poté značí minimální celkovou hmotnost povlaku pro oba povrchy plechu v g/m². Písmeno M značí, že se jedná o materiál, jenž má povrchovou úpravu s minimálním leskem. Označení CO informuje o tom, že materiál je chemicky pasivován a naolejován pro zlepšení ochrany proti korozi.

3.2 Statická zkouška tahem

Jako součást práce byla provedena statická zkouška tahem pro získání základních vlastností vybraného materiálu HX180BD+Z100MCO.

Vzhledem k tomu, že se jedná o válcovaný materiál, jsou jeho vlastnosti, jak je známo, v různém směru odlišné vůči směru válcování. Proto byly vzorky vyrobeny tak, aby byl směr válcování rovnoběžný, kolmý a pod úhlem 45° k ose zatížení. Tyto směry budou dále označovány pouze jako směr 0° pro vzájemnou rovnoběžnost os, směr 45° pro odchylku os o 45° a směr 90° pro kolmost os.

3.2.1 Stroj pro realizaci tahové zkoušky

Tahová zkouška byla realizována na stroji TIRA Test 2300. Tento stroj využívá mechanického pohonu pro vytvoření vnější síly na vzorek, který je pevně upnut do čelistí. Stroj je konstruovaný pro dosažení maximální síly 100 kN. V průběhu zkoušky jsou zaznamenávány hodnoty síly a prodloužení, které jsou potřeba pro další výpočty. Pro upínání vzorku jsou využívány hydraulické čelisti.

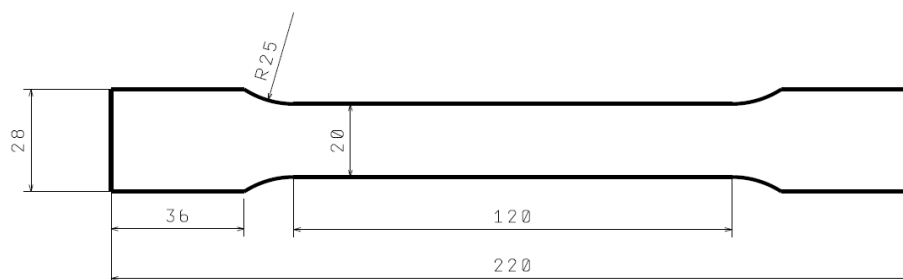


Obr. 30: Stroj pro tahovou zkoušku

3.2.2 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky pro statickou zkoušku tahem mají normalizovaný tvar a rozměry dle normy ČSN EN ISO 6892-1, přílohy B, druh zkušebního tělesa 2. Tato část normy určuje druhy zkušebních těles pro tenké výrobky, jako jsou plechy a pásy o tloušťce 0,1 mm až 3 mm.

Norma v této části říká, že obvykle bývá upínací část větší šířky přibližně o 20 % oproti měřené šířce vzorku. Rozdíl mezi těmito dvěma šířkovými rozměry musí být zaoblený s poloměrem alespoň 20 mm.



Obr. 31: Náčrt použitého vzorku pro statickou zkoušku tahem

Vzorky pro experiment byly vyrobeny technologií stříhání s následným opracováním obráběním.

3.2.3 Vyhodnocení tahové zkoušky

Výstupní data z měření byly vygenerovány z měřicího PC, který je připojen ke stroji pro statickou zkoušku tahem, v podobě csv. souboru. V tomto souboru se nacházely měřené kanály síly, dráhy, času, prodloužení a deformace. Z měření byly vytvořeny také protokoly z měření, které jsou k práci přidány jako *Příloha 1*, *Příloha 2* a *Příloha 3*.

Program LabNET v.4.1247 v připojeném PC slouží k zadávání okrajových podmínek pro měření a dalších údajů. Program je také schopný přímo z vytvořeného grafu závislosti síly na prodloužení získat potřebné základní materiálové vlastnosti jako jsou mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti a tažnost měřeného materiálu bez nutnosti manuálních výpočtů. Tyto data je možné vyhledat v uvedených přílohách.

Pro získání přehlednějších dat bylo třeba na data v tabulkách pro jednotlivé směry aplikovat základní statistické výpočty, jako je průměrná hodnota a směrodatná odchylka. Zmíněné vypočtené statistické hodnoty jsou přehledně uvedeny v *Tab. 4*, *Tab. 5* a *Tab. 6*.

Tab. 4: Naměřená data ze statické zkoušky tahem pro směr 0°

Statistické údaje	R_{eL} [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	E [MPa]
Počet měření	5					
Průměrná hodnota	191,618	204,71	317,45	21,68	38,67	198 079,40
Směrodatná odchylka	0,92	0,36	0,73	0,10	0,27	1 242,52

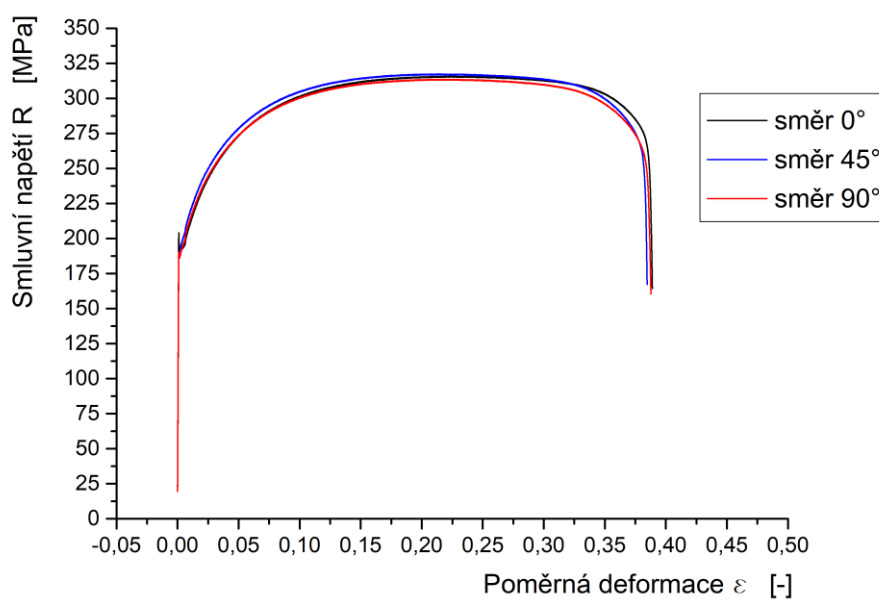
Tab. 5: Naměřená data ze statické zkoušky tahem pro směr 45°

Statistické údaje	R_{eL} [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	E [MPa]
Počet měření	5					
Průměrná hodnota	191,33	203,71	320,18	21,15	37,33	207 527,80
Směrodatná odchylka	1,10	2,56	0,37	0,27	1,51	1 372,06

Tab. 6: Naměřená data ze statické zkoušky tahem pro směr 90°

Statistické údaje	R_{eL} [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	E [MPa]
Počet měření	5					
Průměrná hodnota	186,84	189,54	314,98	21,45	38,63	204 430,35
Směrodatná odchylka	0,94	0,51	1,26	0,31	0,21	785,48

Z kanálů síly a prodloužení vzorku byly za předpokladu znalosti počátečních rozměrů vypočteny hodnoty smluvního napětí a poměrné deformace dle vztahů (3) a (4). Tyto hodnoty poté byly použity pro vytvoření grafu závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci. Tyto grafy je možné vidět na Obr. 32, kde jsou zobrazeny křivky pro různé směry válcování. Grafy byly vytvořeny v programu Origin9.



Obr. 32: Porovnání křivek ze statické zkoušky tahem pro různé směry válcování vzorku

Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší pevnost vykazují vzorky orientované pod úhlem 45° vůči směru válcování. Oproti ostatním testovaným směrům se však nejedná o nějaké zásadní rozdíly. U běžných materiálů je v praxi známo, že nejlepších mechanických vlastností se dosahuje ve směru válcování a nejméně příznivé hodnoty mechanických vlastností, zvláště pak tažnosti, jsou ve směru kolmém na směr válcování. Materiál zvolený pro testy v rámci diplomové práce je tzv. IF ocel s výbornými mechanickými vlastnostmi ve všech směrech daných vysokou čistotou a stabilitou chemického složení. Toto tvrzení dokazují sledované hodnoty pevnosti a tažnosti uvedené v tabulkách *Tab. 4*, *Tab. 5* a *Tab. 6*.

Naměřená tažnost materiálu, která se pohybuje okolo 38%, potvrzuje, že se jedná o materiál s vysokou tažností, tedy vhodností ke tváření.

Z naměřených dat je také možné ověřit základní materiálové vlastnosti získané z normy, které jsou uvedeny v *Tab. 3*. Z tohoto porovnání vychází, že materiál plně splňuje vlastnosti, které pro něj norma předepisuje. Zaručená mez kluzu je o trochu vyšší než uváděná spodní hranice z normy, tedy 180MPa. Mez pevnosti je větší než spodní hranice meze pevnosti z normy, tedy 290MPa. Tažnost také dosahuje vyšších hodnot, než je uváděné v normě.

Další materiálovou vlastností, která byla měřena a nachází se i v normě pro daný materiál, je koeficient normálové anizotropie r . Anizotropie, jak je známo, hodnotí homogenitu vlastností materiálu v různých směrech. Z *Tab. 3* vyplývá, že koeficient normálové anizotropie musí být min. 1,5 ve směru odebrání 90°. Z měření však byly zjištěny hodnoty zobrazené v *Tab. 7*. Tyto hodnoty byly vypočítány programem LabNET v rozsahu 12 – 20% deformace. Naměřené hodnoty splňují požadavek daný normou a jsou vyšší, než je požadavek. Obecně platí, že čím vyšší je koeficient normálové anizotropie, tím jsou vlastnosti materiálu v různých směrech odlišnější.

Tab. 7: Tabulka naměřeného normálového koeficientu anizotropie pro jednotlivé směry válcování

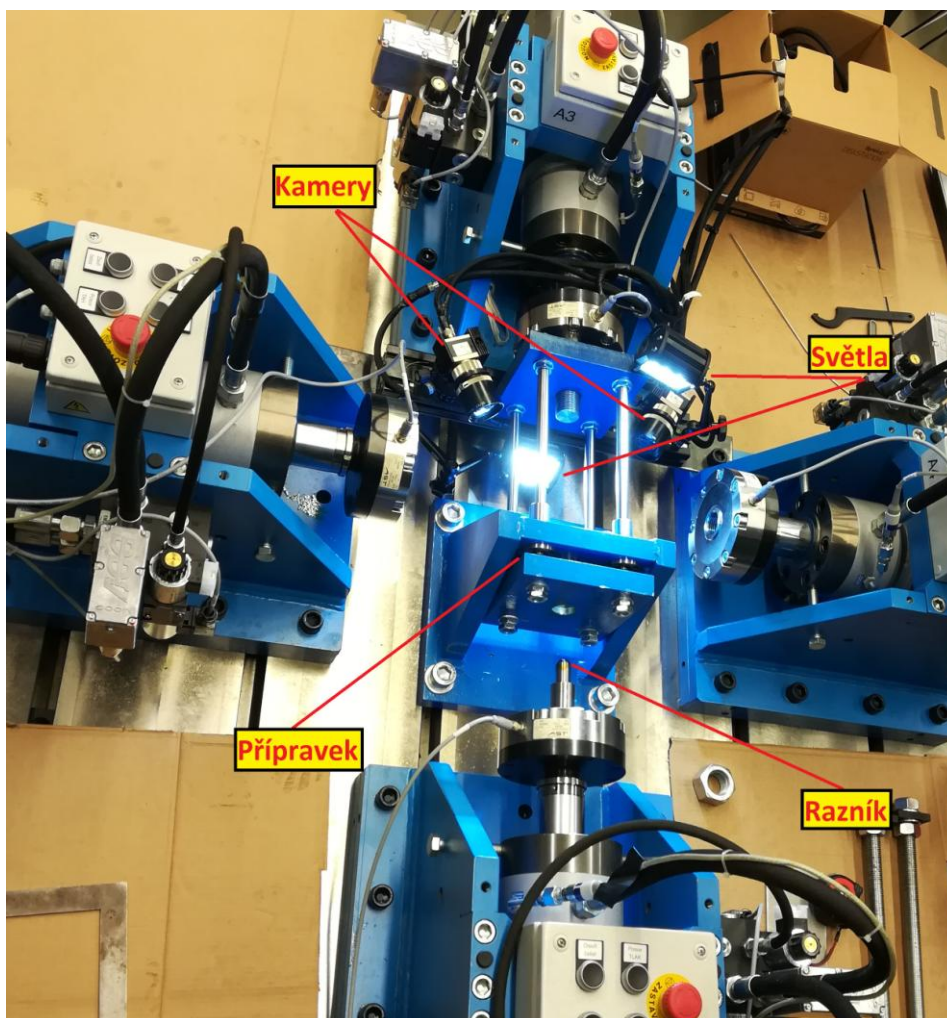
Směr	$r_{/12-20}$ [-]
Směr 0°	1,709±0,014
Směr 45°	1,628±0,008
Směr 90°	2,225±0,017

3.3 Měření Erichsenovy zkoušky

Měření bylo realizováno za pokojové teploty na biaxiálním trhacím stroji s přípravkem, který sloužil jako raznice, která je potřeba pro vytvoření podmínek Erichsenovi zkoušky. Každá rychlost byla testována deseti měřeními. Při měření byly dodrženy veškeré podmínky, které stanovuje norma pro zkoušku hloubením dle Erichsena (ČSN EN ISO 20482).

Pohybem jednoho pístu byla vyvinuta přítlačná síla na vzorek, který tím byl upnut mezi přidržovačem a raznicí, a druhý píst pohyboval razníkem směrem do vzorku. Pohyb razníku probíhal do doby, dokud nevznikla viditelná prasklina na měřeném vzorku.

Měření menších rychlostí pak bylo doprovázeno optickým měřícím systémem pro zjištění průběhu deformace v průběhu měření. K jeho realizaci bylo potřeba instalace dvou kamer a potřebných světel k nasvícení prostoru zájmu.



Obr. 33: Popis jednotlivých částí měřícího stroje a zařízení

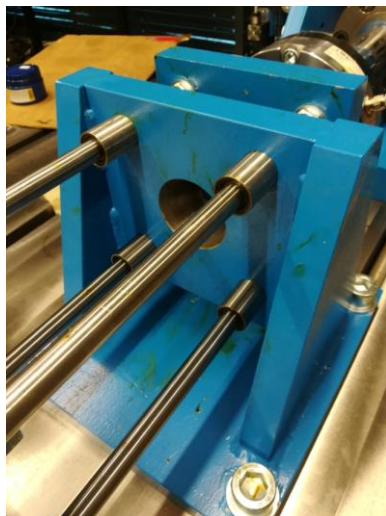
3.3.2 Měřicí stroj

Měření, jak již bylo řečeno, bylo realizováno na stroji primárně určeném pro vytvoření podmínek biaxiálního zatížení. Veškeré pohyby stroje jsou realizovány hydraulickým pohonem se servořízením s PID regulací. Na stůl stroje byl dále instalován přípravek (svařenec), který simuloval raznici tvarově a rozměrově uzpůsobenou podmínkám Erichsenovy zkoušky hloubením.

Měřicí stroj byl připojený ke stolnímu počítači pro zadávání okrajových podmínek experimentu, ovládání pohybů pístů a sledování potřebných výstupních dat i během měření. Pro měření byly sledovány kanály působící síly jednotlivých modulů a pozice nástroje (razníku). Komunikaci mezi strojem a připojeným PC zajišťuje nainstalovaný program WorkBench II (v4.47.8654).

Samotný stroj se skládá z mohutného ocelového stolu, na který jsou pomocí šroubů připevněny čtyři svařence, v nichž jsou usazeny čtyři zatěžovací moduly pro vytvoření až dvouosé napjatosti. Na modulech je dále ovládání jednotlivých pohybů, kterými se ovládá ruční pohyb pístů směrem do středu, tedy vytváření tlaku, nebo směrem k ovládacímu modulu, tedy do tahu. Další dvojice černých tlačítek slouží pro otevření či zavření čelistí jednotlivých pístů. Tato tlačítka však nebyla při měření použita. Posledním tlačítkem na ovládacím panelu každého modulu je tlačítko Central STOP, které slouží k okamžitému zastavení celého stroje.

Dalším důležitým prvkem pro měření je přípravek (*Obr. 34*), který svým tvarem a rozměry simuluje raznici pro vytvoření podmínek Erichsenovy zkoušky hloubením. Přípravek je na stůl připevněn pomocí šroubů s plochým protikusem, které přípravek drží v T-drážce stolu stroje. Jedná se o svařenec ocelových desek s jednou deskou kolmou ke stolu stroje i ke směru pohybu razníku. Tato deska má ve svém středu otvor se zkosením hrany pro vytvoření potřebné tvarové raznice.



Obr. 34: Přípravek simulující raznici

Zmíněnou ocelovou deskou přípravku vede také čtveřice vedení další ocelové desky. Tato deska je napojena na zatěžovací modul A3 a slouží jako potřebný přidržovač vzorku. Jeho pohyb se ovládá pohybem pístu v modulu označeném A3.

V protilehlém modulu, který je označen A1, je upnutý nástroj, jímž je dle normy razník s kulovým zakončením. Razník má dle normy poloměr 10 mm. Čep je upnutý pomocí závitů M36. Vzhledem k působícím silám, které má píst vytvořit, mohou vznikat vůle v závitě. Tomu bylo zamezeno instalací protilehlé matice. Nástroj je zobrazený na *Obr. 35*.



Obr. 35: Obrázek razníku s kulovým zakončením

3.3.1 Příprava vzorků

Vzorky byly vyrobeny v univerzitní laboratoři na tabulových nůžkách MS2004 z pásů plechu. Rozměry vzorku jsou v souladu s výše uvedenou normou pro tuto zkoušku.

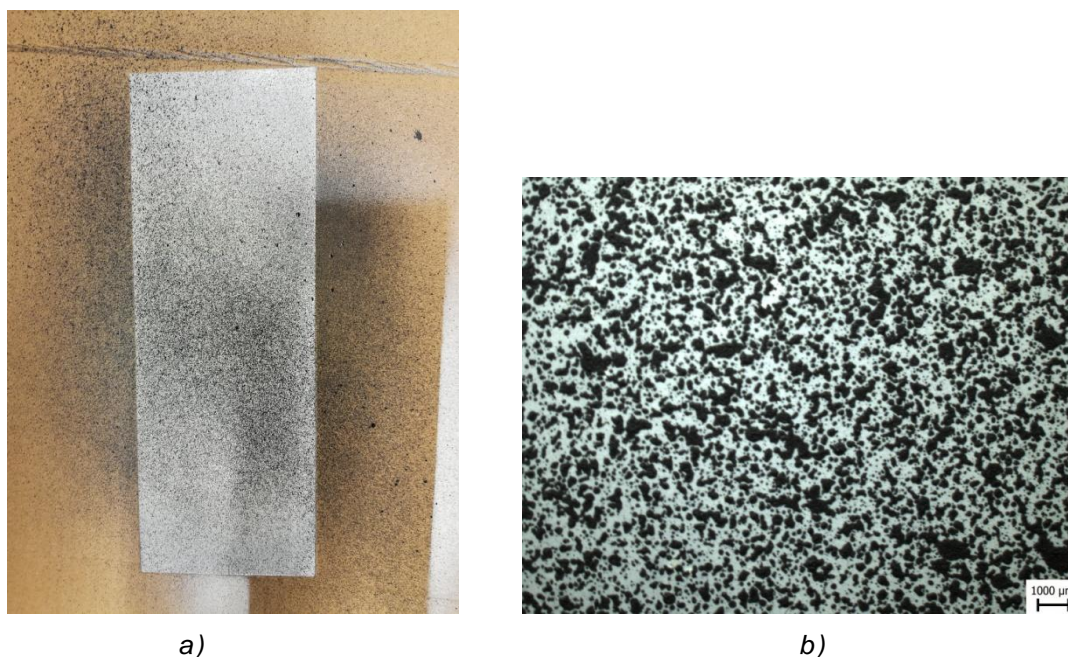
Reálné rozměry vzorku:

- Délka $L = 150\text{mm}$
- Šířka $B = 90\text{ mm}$
- Tloušťka $t = 0,61\text{mm}$



Obr. 36: Vzorky po nastříhání pomocí tabulových nůžek

Z důvodu měření děje fotogrammetrickým měřením bylo nutné vzorky dále upravit do stavu, který je potřeba k optickému vyhodnocení. Vzorky byly tedy na jedné ploše odmaštěny a následně nastříkány bílou barvou matného typu v podobě spreje. Po zaschnutí bílé barvy bylo nutné vzorky lehce stříknout černou barvou pro získání potřebného barevného povrchu, dále označovaného jako pattern. Vytvořený pattern je stochastický. Tento krok byl obtížný, jelikož manipulace se sprejem musela být velmi jemná. Bylo zapotřebí velmi citlivého zmáčknutí tlačítka na spreji pro získání malého tlaku z trysky spreje pro vznik pouze kapek černé barvy. Vzorek připravený na měření, který obsahuje potřebný pattern je zobrazen na *Obr. 37*.



Obr. 37: Připravený vzorek pro měření
 a) celý
 b) detail pod mikroskopem

3.3.3 Optické měřicí zařízení Mercury

Měřicí fotogrammetrické zařízení Mercury od firmy Sobriety slouží ke sledování deformace povrchů. Zařízení se skládá ze dvou kamer s možností snímkování až 32 fps. Pro optimální podmínky sledování děje bylo nutné sledované místo nasvítit světlí.

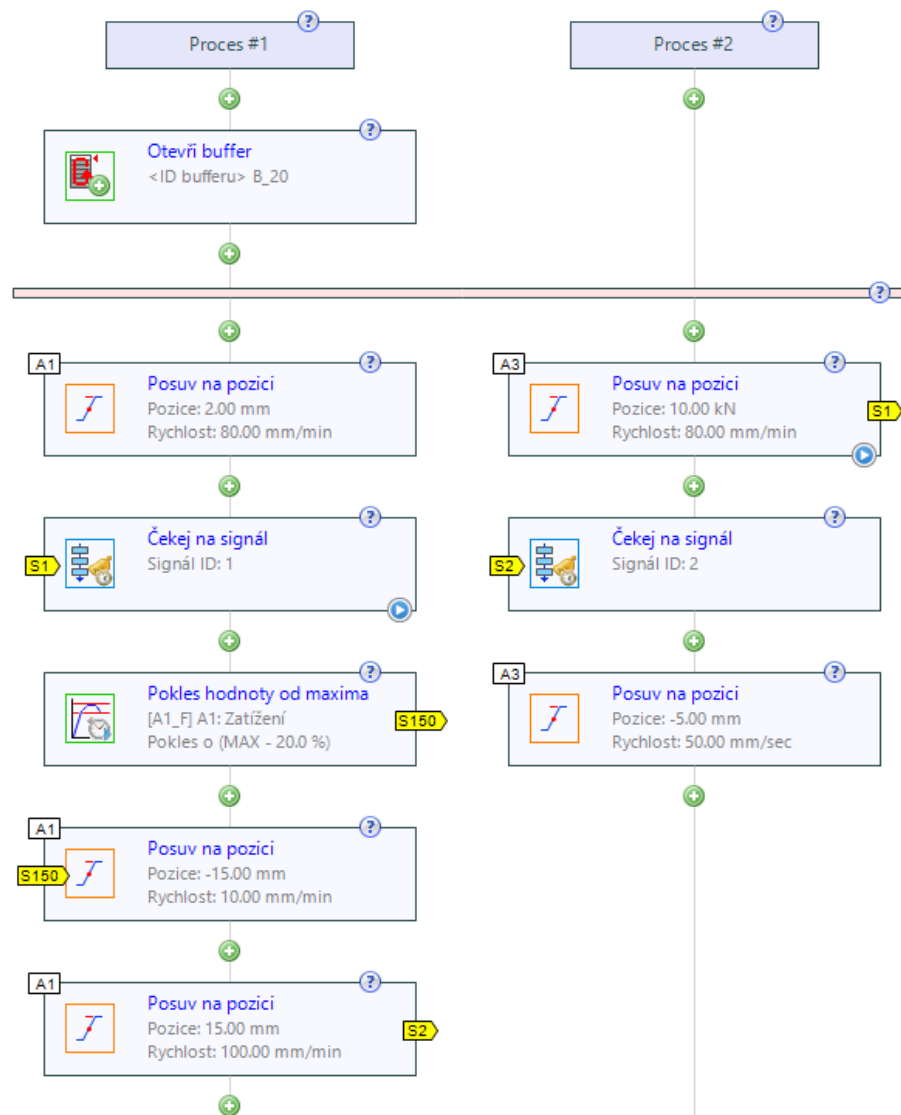
Kamery a světla jsou propojeny s ovládacím počítačem, kde se nastavují parametry jako potřebné rozlišení, rychlost snímkování a jiné parametry k měření. Tuto komunikaci zajišťuje nainstalovaný program MercuryRT-v2.9.

Systém Mercury pracuje s patternem vytvořeným spreji na zkušební vzorku. Systém si obraz z kamery rozdělí na jednotlivé pixely, v nichž vypočítá poměr bílé a černé barvy na tzv. *stupeň šedi*. Důležité také je, že program si musí pamatovat polohu těchto pixelů s přiřazeným stupněm šedi, jelikož stupně šedi obsahují pouze 100 možných hodnot, které odpovídají průhlednosti v procentech. Je tedy zřejmé, že se na vzorku bude objevovat vícekrát tentýž stupeň šedi se stejnou hodnotou. Tento proces vytváří systém při každém pořízeném snímku a zkoumá tak rozdíly, tedy vzniklou deformaci.

3.3.4 Příprava měření na stroji

Jako první bylo na stroji potřeba vytvořit nulovou polohu nástroje. Ta se nastavila dotykem nástroje a již upnutého vzorku. Dotyk nástroje se vzorkem byl identifikován pomocí silového snímače v zatěžovacím modulu A1, který pohybuje s nástrojem. Při zvýšení síly z nulové hodnoty se tato pozice zvolila za nulovou referenční hodnotu.

Pro měření na biaxiálním stroji bylo potřeba vytvořit program, podle kterého budou ovládané pohyby a rychlosti pohybů v jednotlivých časech a pozicích, nebo na základě zadaných podmínek. Program je tvořen pomocí blokového schématu, který je zobrazen na Obr. 38. Program je rozdělený na dva sloupce, tedy dva procesy, které odpovídají dvěma ovládaným modulům.



Obr. 38: Blokové schéma programu příkazů pro zatěžovací moduly

Prvním programovacím oknem, které ještě neovládá žádný pohyb je příkaz „Otevři buffer“, které sloužilo k zadání informací o měření, jako je výběr výstupních dat, název vyexportovaného souboru s daty a jeho umístění.

Dalším krokem programu bylo dojetí nástroje na pozici 2 mm od nulové hodnoty, tedy od povrchu vzorku. Rychlost v tomto kroku může být takto vysoká (80 mm/min.), protože se jedná o bezpečnou vzdálenost s malým rizikem kolize stroje.

Následující krok se nachází v druhém procesu a je jím posuv přídržovací desky směrem k přípravku. Program modulu s nástrojem zadává, aby se pohyboval rychlostí 80 mm/min. tak dlouho, dokud nedosáhne hodnota na siloměru v modulu 10 kN. Jelikož je hodnota síly kladná, pohybuje se píst modulu směrem do tahu, tedy od středu stroje směrem k ovládní modulu. Tento krok po jeho úspěšném dokončení vytvoří signál S1 na který čeká další blok ve schématu.

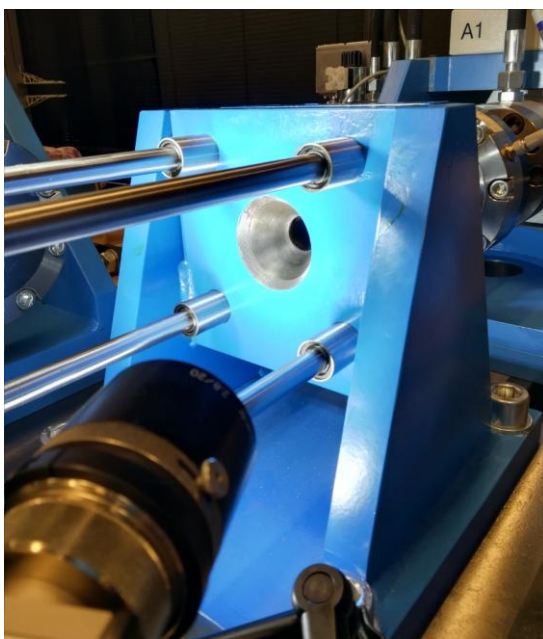
V tuto chvíli je v programu vše připraveno k započítí měření. Proto následuje příkaz pro modul A1, aby se pohyboval zvolenou rychlostí, která je právě měřena na pozici -15 mm. Koncové hodnoty -15 mm by nástroj neměl dosáhnout, protože při první zkoušce bylo zjištěno, že vzorek praská přibližně při 11 mm. Vytvořen byl blok se zastavovací podmínkou. Jedná se o podmínku, kdy nástroj zastaví svůj pohyb, tedy předčasně ukončí blok s pohybem směrem do vzorku, pokud náhle poklesne síla o 20%.

Po tomto kroku následuje zpětný pohyb modulu A1 i A2, aby mohlo dojít k vyjmutí vzorku. Zároveň takto vznikne počáteční poloha pro další měření.

3.3.5 Příprava měření na optickém zařízení Mercury

Pro měření optickým systémem Mercury byla nutná kvalitní instalace kamer, optimální nasvícení oblasti zájmu pomocí světel, kalibrace kamer a vložení dalších měřících parametrů.

Instalace kamer má jeden hlavní požadavek, kterým je stejný úhel obou kamer vzhledem k sledované ploše. Nastavování úhlu bylo realizováno pomocí otočné lunety, na které je kamera usazena a obsahuje měřítko. Kamery pak byly pomocí kabelů propojeny do počítače.

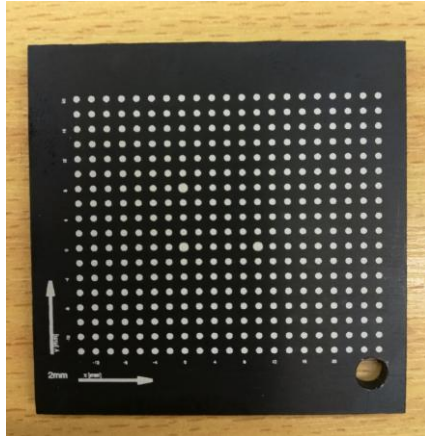


Obr. 39: Obrázek pohledu kamery do otvoru tažnice po nasvícení

Po nastavení kamer a jejich připojení do PC se obraz jevil podle očekávání tmavý a naprosto nečitelný. Proto byla instalována světla z obou stran, hned vedle kamer.

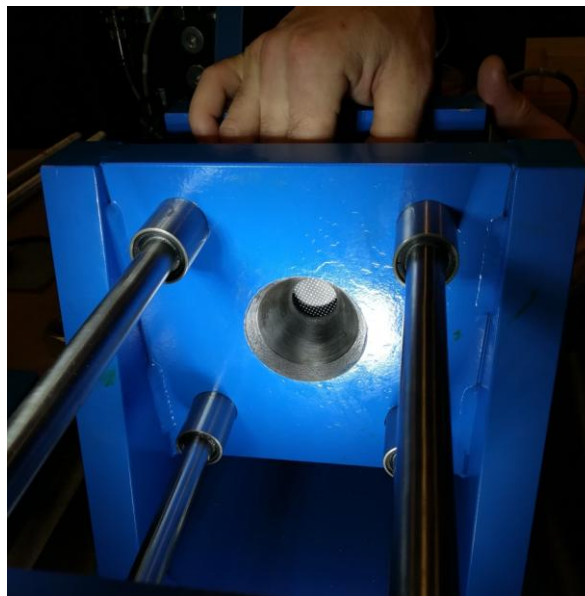
Kalibrace kamer slouží pro odstranění prostorového zkreslení snímku vlivem pohledu kamery přes objektiv. Kalibrace kamer tyto nerovnosti vyhlazuje do plošného obrazu. Nerovnosti vznikají zakulacením čoček v objektivu kamer, tedy nejvíce na okraji snímku.

Kalibrace se realizuje pomocí kalibrační destičky, která je zobrazena na *Obr. 40*. Kalibrační destička obsahuje body rozmístěné po 2 mm. Tato destička se při zapnutých kamerách a světlech, tedy při podmínkách měření, vkládá do oblasti měření. Poté se vytvoří několik snímků s destičkou různě pootočenou a naklopenou.



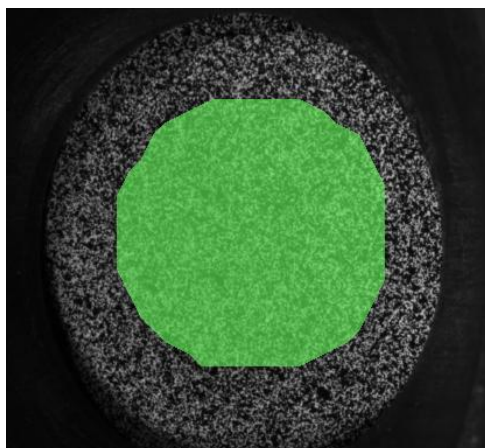
Obr. 40: Obrázek kalibrační destičky

Na kalibrační destičce je možné si všimnout třech větších bodů v okolí středu destičky. Tyto body kamera primárně sleduje. Sleduje jejich polohu při různých natočeních a naklopeních destičky a skládá plošný obraz.



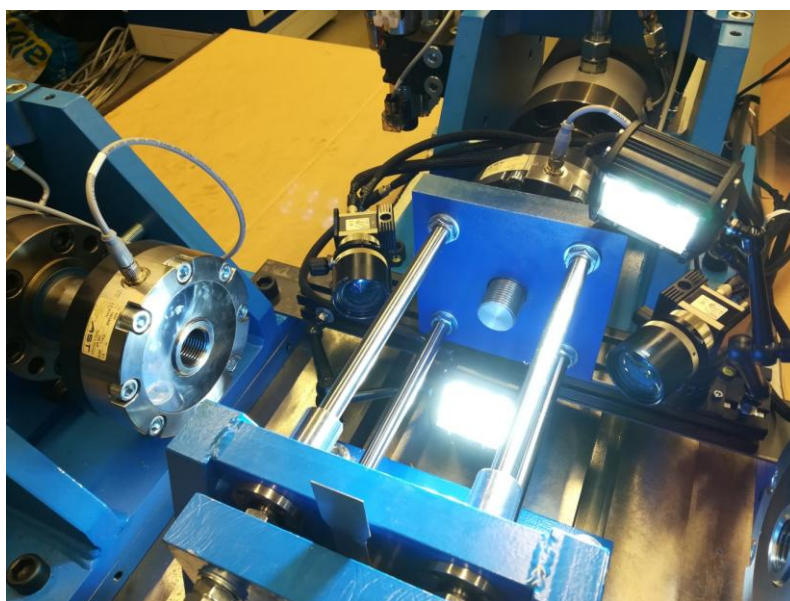
Obr. 41: Obrázek kalibrace kamer

Následujícím krokem je vytvoření potřebné sítě s rozdělením na jednotlivé pixely, na kterých jsou měřeny hodnoty stupně šedi. Síť může mít libovolné rozměry a základní geometrické tvary. Vzhledem k parametrům měření bylo nevhodnější použití kulatého tvaru sítě. Vytvořená síť je zobrazena na *Obr.42*.



Obr. 42: Obrázek sledované plochy s vytvořenou sítí

Bohužel, po prvním měření bylo zjištěno, že kamery a světla nejsou správně nastaveny a síť se při měření začne velmi brzy deformovat, tudíž z těchto míst poté nelze odečítat data. Proto celý proces, nastavení světel, kalibrace a vytvoření sítě, musel být realizován znovu. Z toho vzniklo výsledné nastavení světel dle *Obr. 43*.



Obr. 43: Obrázek rozmístění kamer a světel

Jako poslední krok bylo třeba zvolit parametry měření pro každou zkoušku, konkrétně rychlost snímkování a polohu, při které se rychlost snímkování zvýší. Kamera má možnost vytvořit až 32 snímků za sekundu. Takto vysoká frekvence však u malých rychlostí nebyla potřeba. Proto se změřilo jedno měření bez fotogrammetrie pro zjištění přibližné pozice nástroje před prasknutím vzorku. Poté se zvolila odlišná hodnota snímkování pro děj před tímto okamžikem a hodnota snímkování v době předpokládaného prasknutí, tedy nejrychlejších deformací povrchu vzorku.

3.3.6 Postup měření

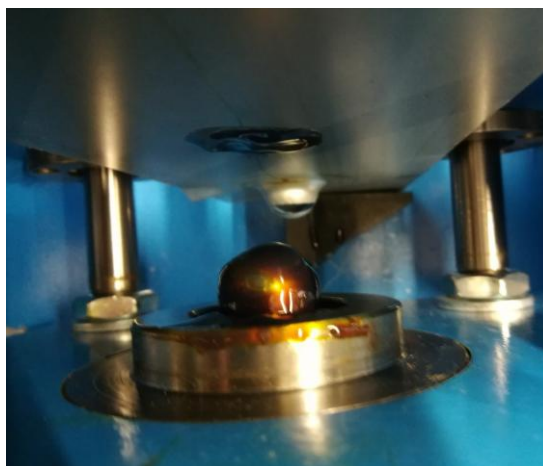
Postup měření byl pro každou rychlost stejný, pouze se v programu pro pohyby stroje měnila rychlost pohybu nástroje. Velký rozdíl v měření jednotlivých rychlostí deformace byl v časové náročnosti měření. Zatímco rychlost 600 mm/m. vytvořila ve vzorku prasklinu v pár vteřinách, měření s rychlostí nástroje 1 mm/min. trvala přibližně 15 minut.

1. Úprava a kontrola programu

Jako první, před každým měřením, musel být v programovacím okénku „Otevři buffer“ změněn název měření. Pokud by tak nebylo učiněno tak by se přepsalo předchozí měření, což by znamenalo ztrátu dat z předešlého měření. Důležitá byla také kontrola parametrů měření, tedy zvolené rychlosti pohybu nástroje, která je přímo úměrná rychlosti deformace.

2. Ustavení vzorku a mazání

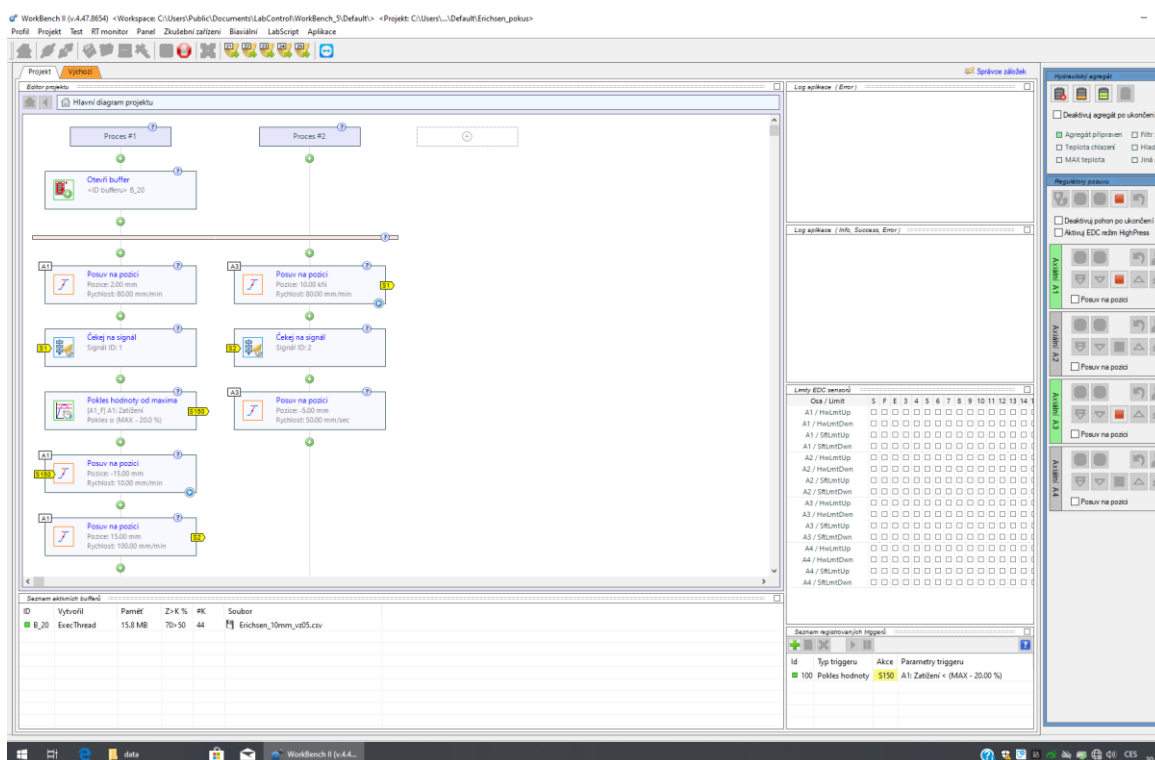
Vzorek se usadil mezi přidržovač a raznici. Na stole stroje se usadil mezi dva ocelové kvádry pro zajištění jeho svislé polohy před upnutím přidržovačem. Erichsenova zkouška je velmi náchylná na třecí děje mezi nástrojem a vzorkem. Proto byl před každým měřením vzorek i nástroj v místě styku namazán vazelínou pro zlepšení třecích vlastností. Jelikož se jedná o porovnávací měření, tak bylo žádoucí, aby třecí děje mezi nástrojem a vzorkem byly co nejpodobnější. Mazání je zobrazeno na *Obr. 44*.



Obr. 44: Obrázek mazání před zkouškou

3. Spuštění programu

Po veškeré manuální přípravě se přistoupilo k započetí měření. Měření se startovalo spuštěním programu v programu WorkBench stisknutím tlačítka Play.



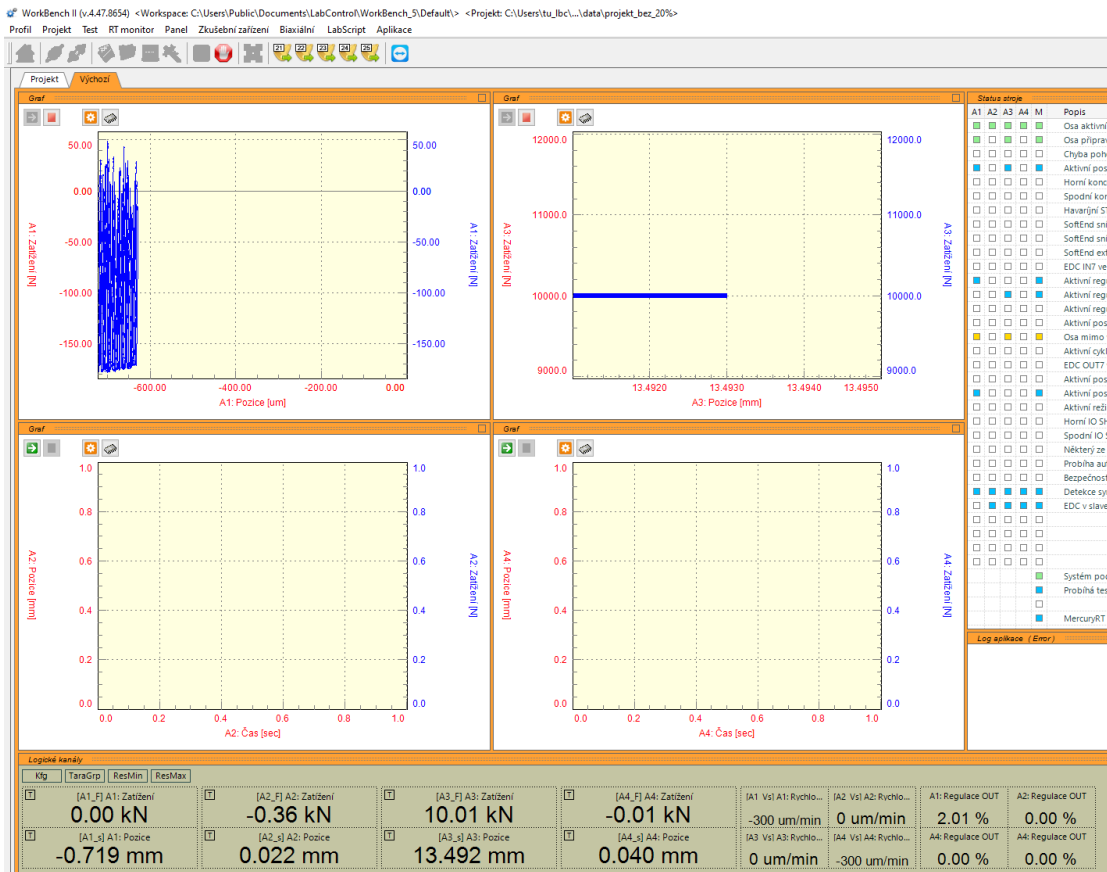
Obr. 45: Prostředí programu WorkBench

4. Spuštění měřicího systému Mercury

Měřicí systém Mercury se zapínal (pokud byl použit) až při dojetí nástroje těsně před nulovou polohu. Není totiž nutné sledovat děj před samotným tvářením vzorku. To by vedlo ke zbytečně velkému objemu dat.

5. Sledování parametrů během měření

Během měření program WorkBench sledoval hodnoty pozice jednotlivých pístů, silové hodnoty na pístech a jejich rychlost. Program také nabízí možnost sledování až čtyř grafů zvolených sledovaných hodnot. Grafy však nejsou vykreslovány absolutně, tedy od začátku děje, ale pouze zobrazují předchozích pár kroků, proto z nich nebylo příliš vidět potřebné informace. Uspořádání těchto zobrazovaných parametrů a grafů lze vidět na Obr. 46.



Obr. 46: Obrázek prostředí programu WorkBench v průběhu měření

6. Konec měření a manipulace se vzorkem

Po ukončení měření, kdy nástroj a přítlačná deska zaujaly výchozí pozici, bylo možné vzorek buď otočit o 180° a měřit tak na druhé straně délky vzorku nebo vzorek odložit a umístit vzorek nový.

Tento proces měření, který je popsán šesti body se opakuje pro každé měření při zvolených rychlostech. V případě, že nebyl děj sledován měřicím zařízením Mercury, bylo měření realizováno bez bodu 4.

3.3.7 Vyhodnocení Erichsenovy zkoušky hloubením

Zkušební vzorek po měření vypadal v závislosti na použití či nepoužití fotogrammetrie dle *Obr. 47* nebo *Obr. 48*, kde je zobrazen vzorek po zkoušce s výrazně viditelnou prasklinou. Dle porovnání pozice vzniklé praskliny s *Obr. 21* bylo potvrzeno, že se jedná o materiál vhodný pro tváření, jak je psáno v kapitole 3.1.



Obr. 47: Obrázek zaměřený na vzorek po měření – bez rastru



Obr. 48: Obrázek zaměřený na vzorek po měření – s rastrem

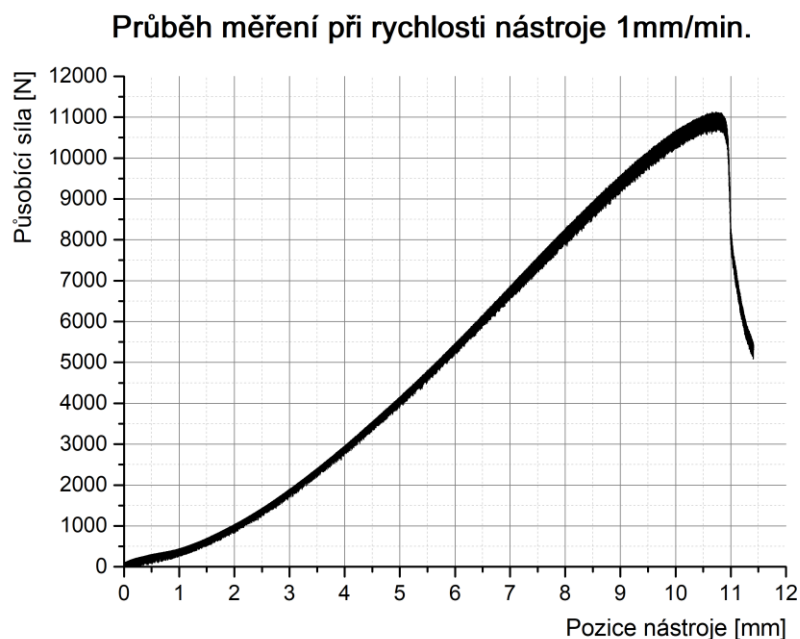
K získání dalších vypovídajících dat bylo třeba zpracovat data výstupních kanálů ze stroje. Tato data byla vložena do programu Origin9, kde byly vytvořeny potřebné grafy závislosti působící síly a pozice tohoto nástroje.

Kanál síly je v těchto datech uveden v kN. Byl tedy nutný jeho převod na základní jednotky N, aby byly hodnoty jemněji zaokrouhlovány. Kanál pozice musel být vynásoben hodnotou -1, protože jeho hodnoty byly od nuly snižující se. To bylo způsobeno směrem pohybu nástroje do tlaku. Avšak vzhledem k podstatě zkoušky bylo třeba mít tyto hodnoty kladné.

Dalším krokem bylo vytvoření grafu. Ten však obsahoval veškerá data před počátkem měření, tedy hodnoty daleko před nulovou hodnotou a hodnoty po měření, kdy se nástroj vracel do počáteční polohy. Tento graf pak sloužil pouze k odečtu zlomu mezi potřebnými a nepotřebnými daty, která byla následně smazána.

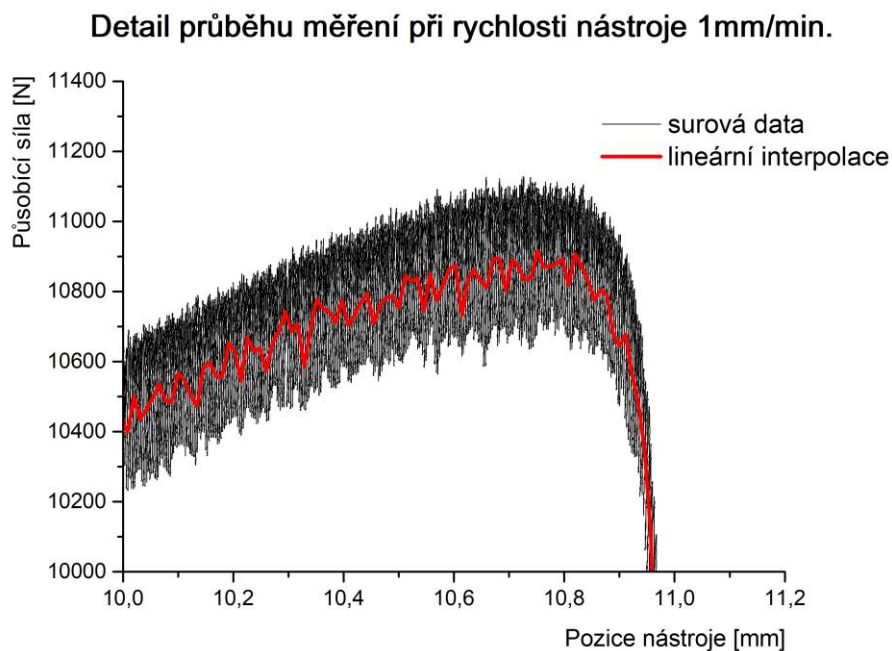
Následně byl vytvořen výsledný graf závislosti zatěžovací síly na pozici nástroje pro každé měření. Charakteristický průběh měření je již zobrazen na Obr. 49, kde je zobrazena rychlost 1 mm/min. Z obrázku je patrné, že graf začíná v nulové pozici, jelikož data před dějem byla odstraněna.

Rychlost nástroje 1 mm/min.



Obr. 49: Graf zobrazující surová data při rychlosti 1 mm/min.

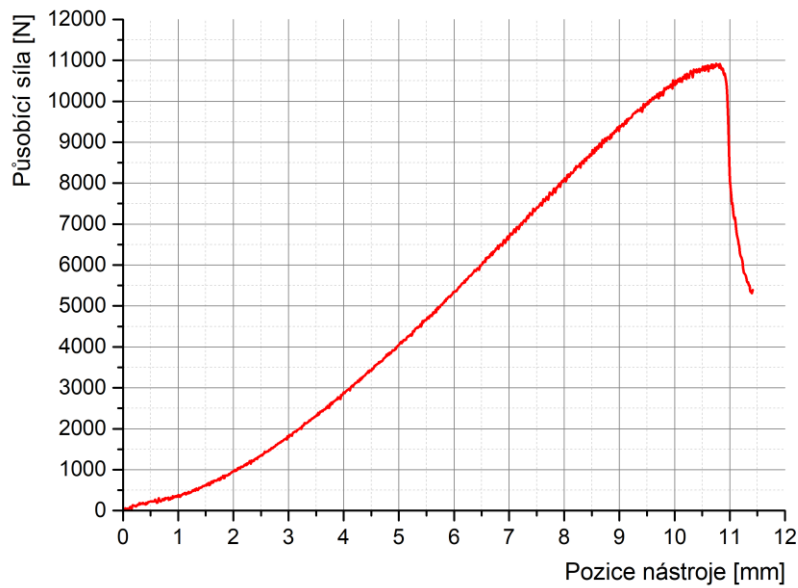
Cílem měření bylo zjištění hodnot v maximu křivky, tedy hodnot působící síly a pozice nástroje. Tento bod lze považovat za vznik praskliny, protože vzniká velký pokles síly, vlivem průniku razníku vzorkem. Avšak vzhledem k velkému rozptylu dat nebylo možné tento bod odečíst. Pro lepší odečtení zlomového bodu byla data programem Origin9 lineárně interpolována. Tento krok je patrný z *Obr. 50*, kde se nachází křivka vytvořená ze surových dat a křivka vytvořená z dat lineárně interpolovaných.



Obr. 50: Graf zobrazující lineární interpolaci surových dat

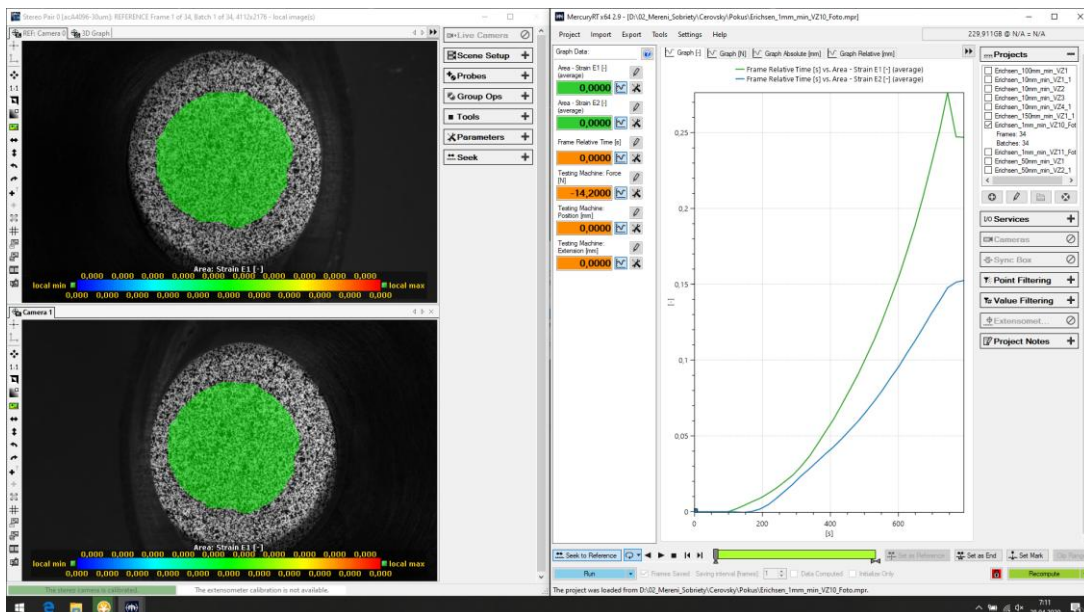
Z *Obr. 50* je patrné, že i lineární interpolace přesně nevystihuje zlomový bod poklesu síly, avšak zmenšuje rozptyl dat. Tento postup musel být použit u rychlostí deformace do 100 mm/min včetně. Poté již surová data nevykazovala tak velký rozptyl hodnot a bylo možné je odečítat bez nutnosti tvorby lineární interpolace surových dat.

Průběh měření při rychlosti nástroje 1mm/min.



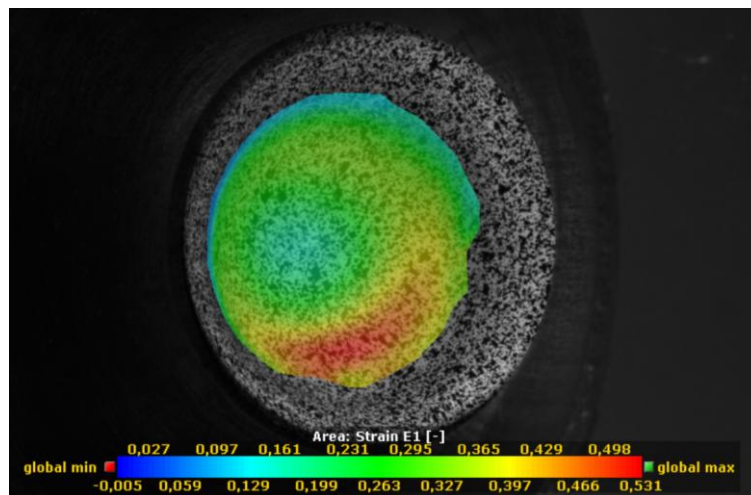
Obr. 51: Graf průběhu měření při rychlosti nástroje 1 mm/min.

Vyhodnocení optickým měřicím systémem Mercury se provádělo zpětně, což je právě jedna z neodmyslitelných výhod fotogrammetrie. Na Obr. 52 je zobrazeno pozadí programu při následném vyhodnocování. V pravé dolní půlce lze vidět jezdec časové osy, kde lze prohlížet celý průběh měření po jednotlivých snímcích, které se zobrazovaly v levé části obrázku. V pravé části pozadí programu je pak automaticky vykreslováný graf hlavní a vedlejší deformace.

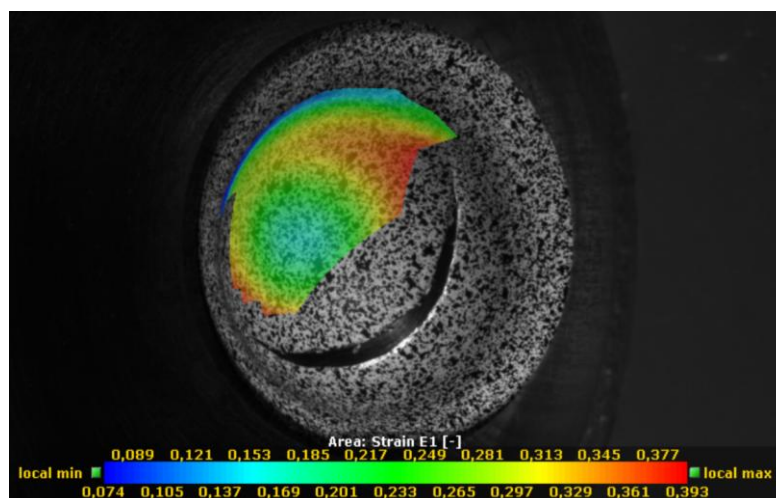


Obr. 52: Pozadí programu MercuryRT při vyhodnocování měření

Na Obr. 53 lze již podle rozložení deformace vidět, že prasklina vznikne nejspíš ve spodní části kulového vrchlíku, což se následně potvrdilo na Obr. 54, který zobrazuje kulový vrchlík již po skončení měření.



Obr. 53: Vzorek těsně před vznikem trhliny při rychlosti nástroje 1mm/min.



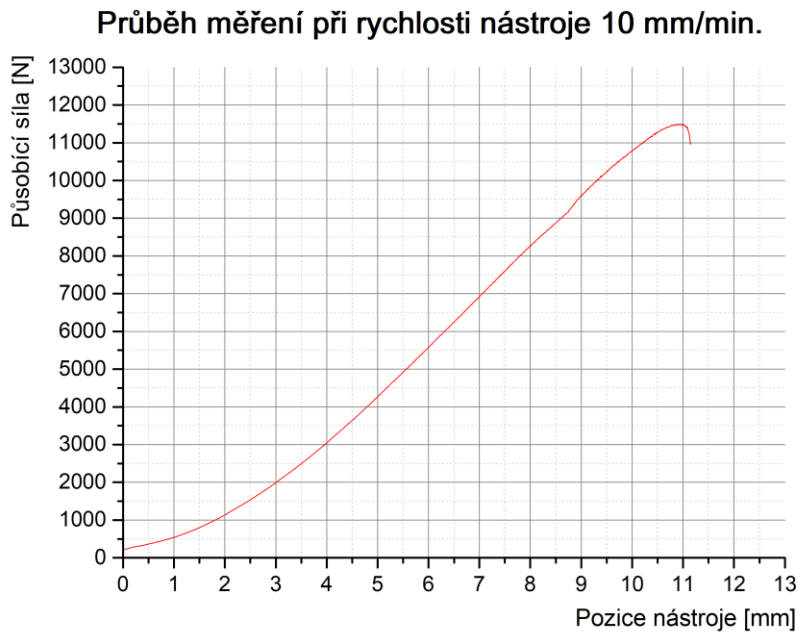
Obr. 54: Vzorek po prasknutí při rychlosti nástroje 1 mm/min.

Na Obr. 54 je také zobrazeno, jak to vypadá, když se rozruší síť potřebná pro výpočet rozložení deformace. V těchto místech pak měřící systém Mercury přestává vyhodnocovat.

Předěšlé dva snímky jsou poněkud odlišné v zobrazování rozložení deformace. Zatímco Obr. 53 se zobrazuje rozložení napětí v globálních hodnotách, tedy od počátku měření, na Obr. 54 pouze v hodnotách přírůstkových oproti předchozímu snímku.

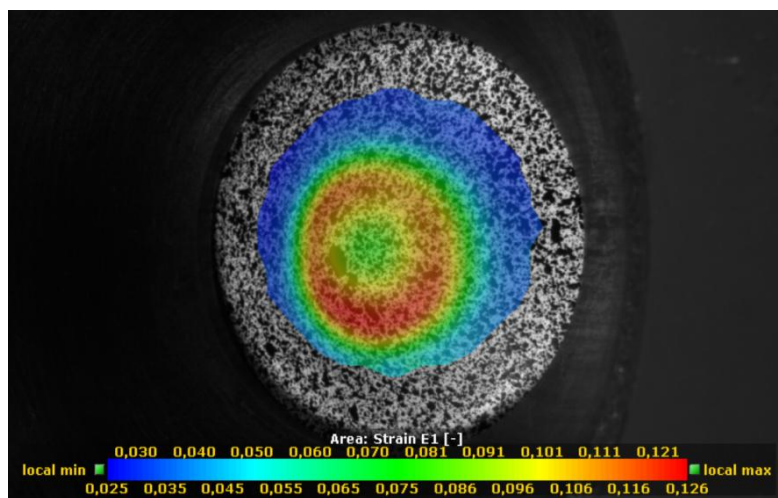
Rychlost nástroje 10 mm/min.

Rychlost 10 mm/min. byla druhou měřenou rychlostí a byla také doprovázena fotogrammetrií pro zjištění průběhu deformace na měřeném vzorku. Frekvence snímkování v průběhu měření byla 1 fps. Těsně před očekávaným vznikem praskliny pak byla frekvence snímkování zvýšena na 5 fps.

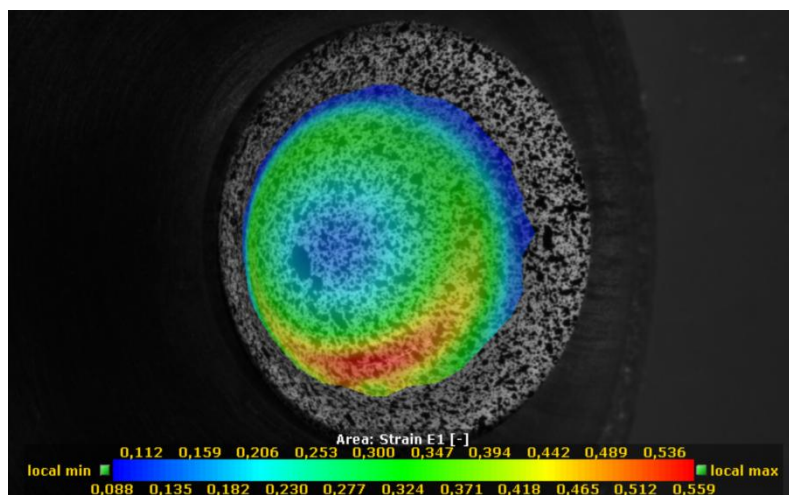


Obr. 55: Průběhu měření při rychlosti nástroje 10 mm/min.

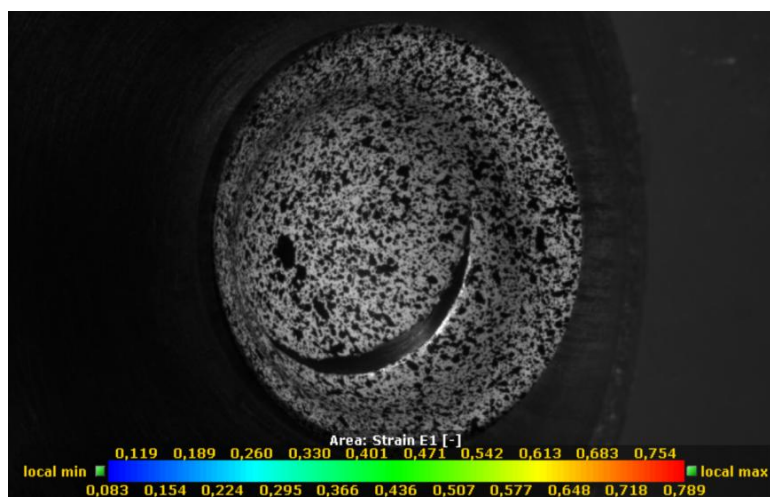
Na Obr. 56 je zobrazeno rozložení deformace přibližně uprostřed měření. Je zde zobrazen přírůstek deformace proti předchozímu snímku. Z obrázku lze vidět, že již v průběhu měření je patrné, že vzorek praskne ve spodní části.



Obr. 56: Vzorek při rychlosti nástroje 10 mm/min. uprostřed děje



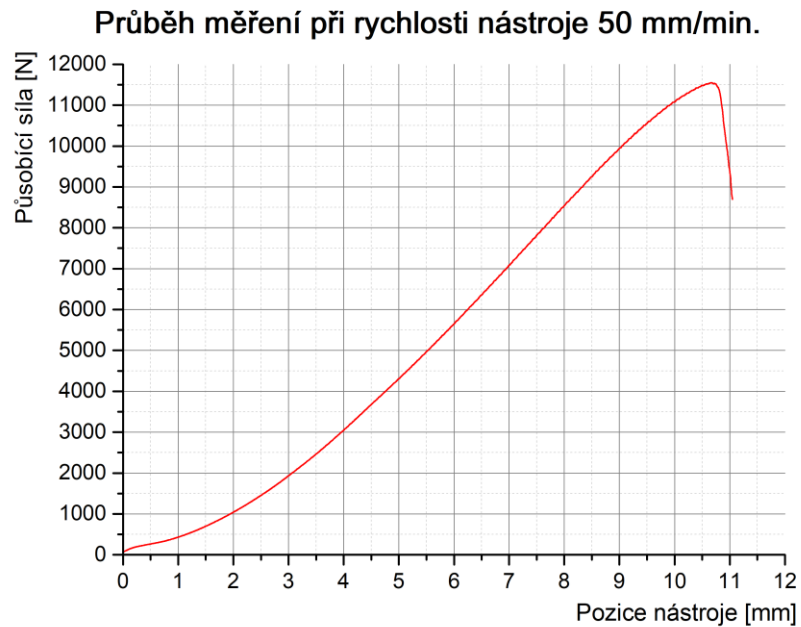
Obr. 57: Vzorek při rychlosti nástroje 10 mm/min. těsně před prasknutím



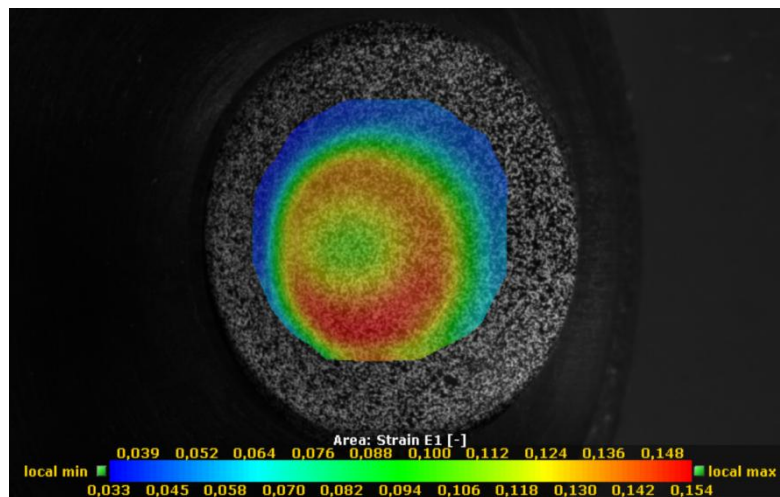
Obr. 58: Vzorek při rychlosti nástroje 10 mm/min. s viditelnou trhlinou

Rychlost nástroje 50 mm/min.

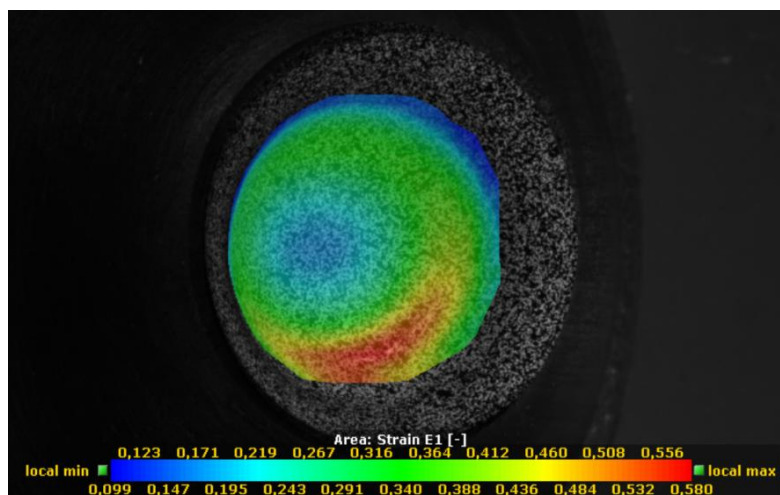
Toto měření bylo poslední, při kterém se využilo fotogrammetrického zařízení Mercury. Fotogrammetrické zařízení zde snímkovalo s frekvencí 5 fps a těsně před prasknutím vzorku pracovalo při 32 fps.



Obr. 59: Graf průběhu měření při rychlosti nástroje 50 mm/min.

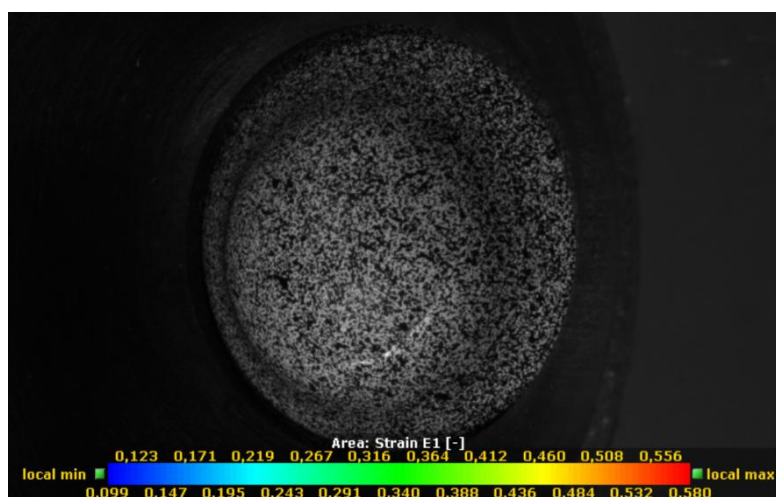


Obr. 60: Rozložení deformace uprostřed děje při rychlosti nástroje 50 mm/min.

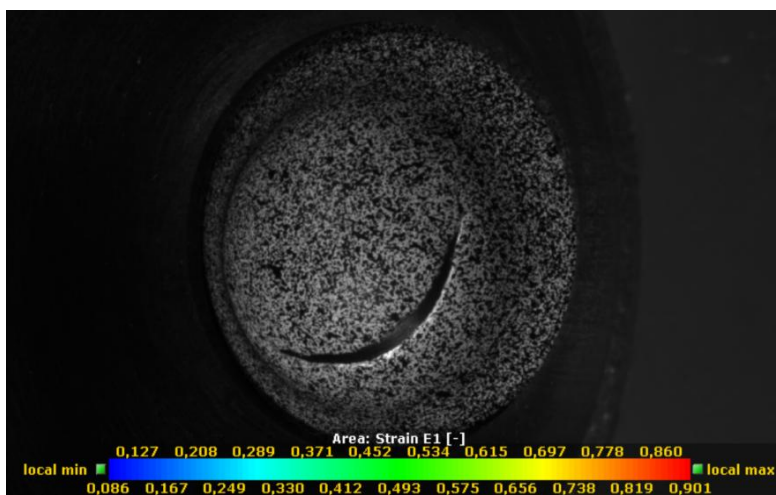


Obr. 61: Rozložení deformace před vznikem praskliny při rychlosti 50 mm/min.

Na Obr. 62 je při pozorném sledování možno vidět ve spodní části snižování tloušťky materiálu těsně před vznikem trhliny. Jedná se o poslední snímek před vznikem viditelné trhliny.



Obr. 62: Vzorek těsně před prasknutím při rychlosti nástroje 50 mm/min.

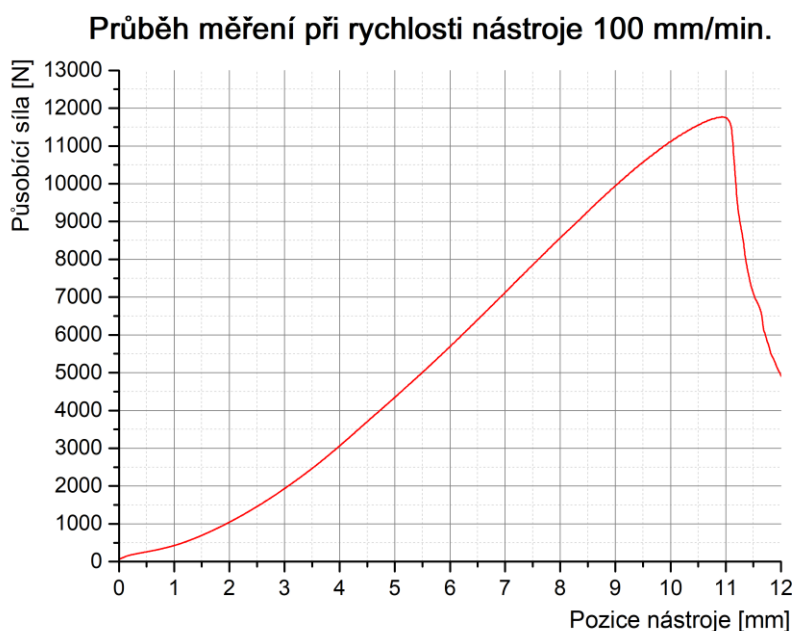


Obr. 63: Vzorek po prasknutí při rychlosti nástroje 50 mm/min.

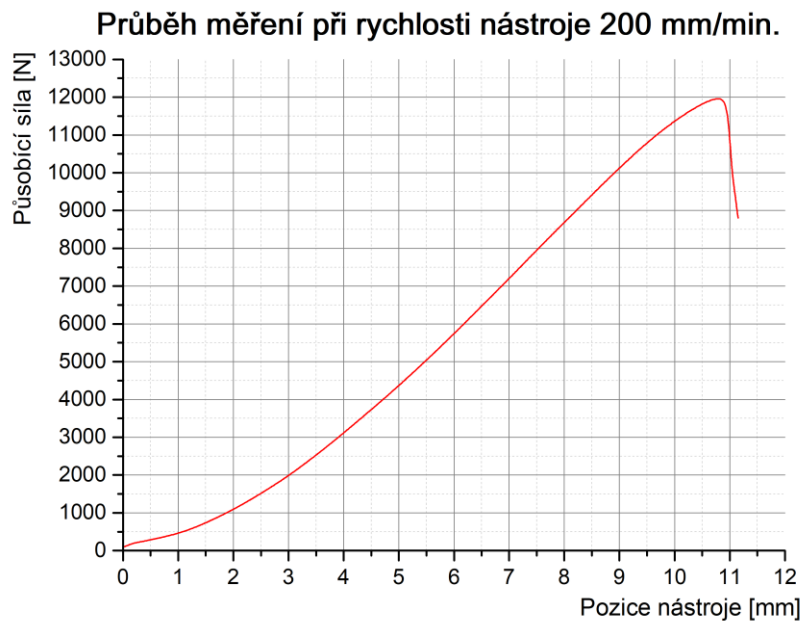
Rychlosti nástroje 100 mm/min., 200 mm/min., 400 mm/min., 600 mm/min.

Tyto rychlosti již nebyly doprovázeny fotogrammetrickým měřením. K tomu by bylo zapotřebí lepších vysokofrekvenčních kamer s možností rychlejšího snímkování děje.

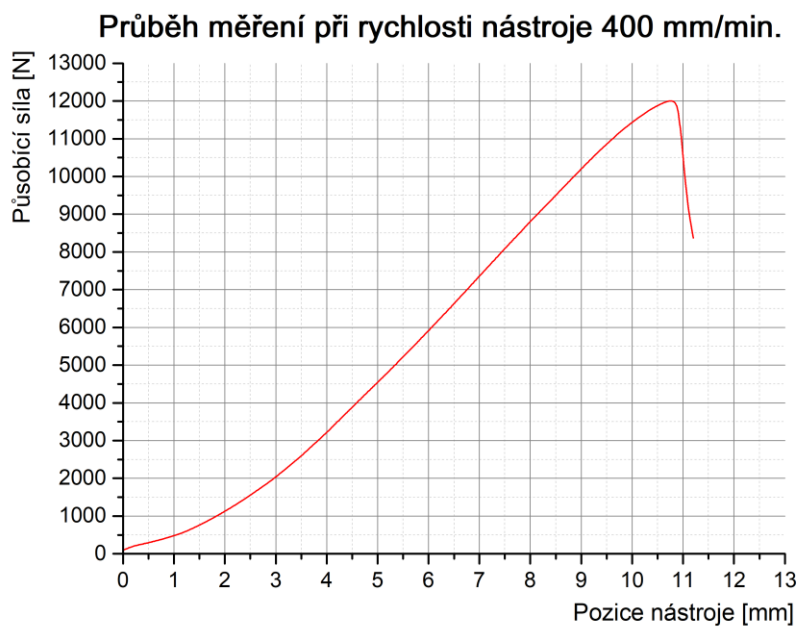
Při těchto rychlostech už nebylo třeba lineární regrese. Křivky byly hladší a odečet zlomového bodu byl snadný.



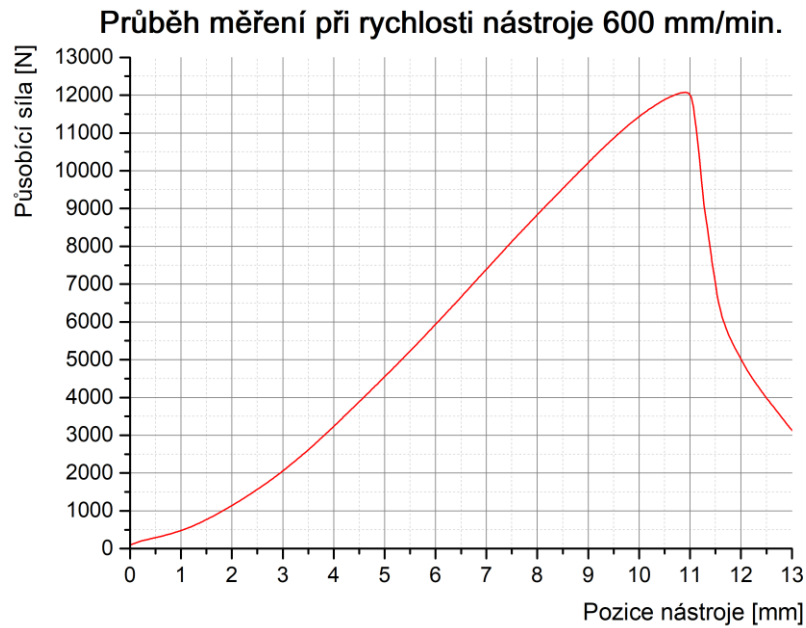
Obr. 64: Graf průběhu měření při rychlosti 100 mm/min.



Obr. 65: Graf průběhu měření při rychlosti nástroje 200 mm/min.



Obr. 66: Graf průběhu měření při rychlosti nástroje 400 mm/min.



Obr. 67: Graf průběhu měření při rychlosti nástroje 600 mm/min.

Pro přehlednost všech naměřených dat byly vytvořeny souhrnné tabulky s vypočtenými statistickými hodnotami všech měření. Tyto hodnoty se nacházejí v Tab. 8 pro zobrazení pozic nástroje při vzniku trhliny a Tab. 9 pro zobrazení působící síly při vzniku trhliny.

Tab. 8: Tabulka pozic nástroje při vzniku trhliny pro různé rychlosti

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
1 mm/min.	10,579	0,208
10 mm/min.	10,592	0,234
50 mm/min.	10,813	0,126
100 mm/min.	10,805	0,145
200 mm/min.	10,776	0,061
400 mm/min.	10,785	0,110
600 mm/min.	10,843	0,100

Tab. 9: Tabulka působících sil při vzniku trhliny pro různé rychlosti

	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
1 mm/min.	10 723,94	152,87
10 mm/min.	11 025,02	124,25
50 mm/min.	11 515,60	123,86
100 mm/min.	11 690,90	72,39
200 mm/min.	11 877,82	86,48
400 mm/min.	11 926,83	73,11
600 mm/min.	12 019,70	90,02

3.3.8 Analýza rozptylu (ANOVA)

Tato statistická metoda na základě naměřených dat z experimentu, kde byly měřeny různé faktory (rychlost razníku), určuje, zda daný faktor ovlivňuje výsledné hodnoty statisticky významně, nebo má na naměřená data pouze náhodný vliv. Analýza rozptylu dokáže posuzovat až dva faktory. V případě této práce však byla použita analýza rozptylu jednofaktorová. [23]

Zkoumaný soubor bylo nutné rozdělit dle testovaných faktorů, tedy do skupin podle rychlosti razníku. Pro každou skupinu pak bylo třeba určit střední hodnotu a rozptyl prvků.

Dalším krokem byla stanovená nulová (testovaná) hypotéza H_0 a k ní alternativní hypotéza H_1 :

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

Pro přijetí nebo zamítnutí hypotézy H_0 bylo nutné pomocí F-testu, který testuje shodnost rozptylů, vypočítat testovací kritérium F . Pro výpočet byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Této hodnotě pak odpovídá kritická hodnota F_{krit} . Následné porovnání hodnot F a F_{krit} udávalo, zda byla hypotéza H_0 přijata, nebo zamítnuta. Rozhodnutí bylo provedeno na základě podmínky $F > F_{krit}$ pro zamítnutí hypotézy H_0 a přijetí hypotézy H_1 . [23]

Tab. 10: ANOVA analýza pro pozici nástroje

ANOVA	F	P	F_{krit}
Vliv rychlosti razníku	5,178726	0,00022022	2,24640798

Tab. 11: ANOVA analýza pro působící sílu

ANOVA	F	P	F_{krit}
Vliv rychlosti razníku	210,3847	1,05E-39	2,24640798

V obou případech, jak pro pozici nástroje, tak pro působící sílu, je patrné, že hodnota $F > F_{krit}$. To znamená, že v obou případech se zamítá hypotéza H_0 a přijímá se hypotéza H_1 , tedy že faktor rychlosti razníku je pro měření statisticky významný.

Tab. 10 a Tab. 11 také obsahuje hodnotu P, která určuje, s jakou pravděpodobností se analýza rozptylu mýlí. Hodnota P se porovnává s hladinou významnosti α (0,05), kdy při podmínce $P \geq \alpha$ se výsledek analýzy obrátí. Potom by tedy platila hypotéza H_0 , která říká, že vliv faktorů je statisticky nevýznamný. To se však v tomto případě nestalo, a hypotézu H_1 můžeme opravdu prohlásit za správnou.

Jako zajímavá se jevila možnost srovnání maximální a minimální rychlosti razníku, tedy 1 mm/min. a 600 mm/min. metodou analýzy rozptylu. Avšak dle Tab. 12 a Tab. 13 je patrné, že výsledek analýzy rozptylu vyšel shodně s porovnáním celého rozsahu rychlostí, tedy že vliv faktoru rychlosti je statisticky významný.

Tab. 12: ANOVA analýza pro pozici nástroje při 1 mm/min. a 600 mm/min.

ANOVA	F	Hodnota P	F krit
Vliv rychlosti razníku	13,08545	0,00197	4,413873

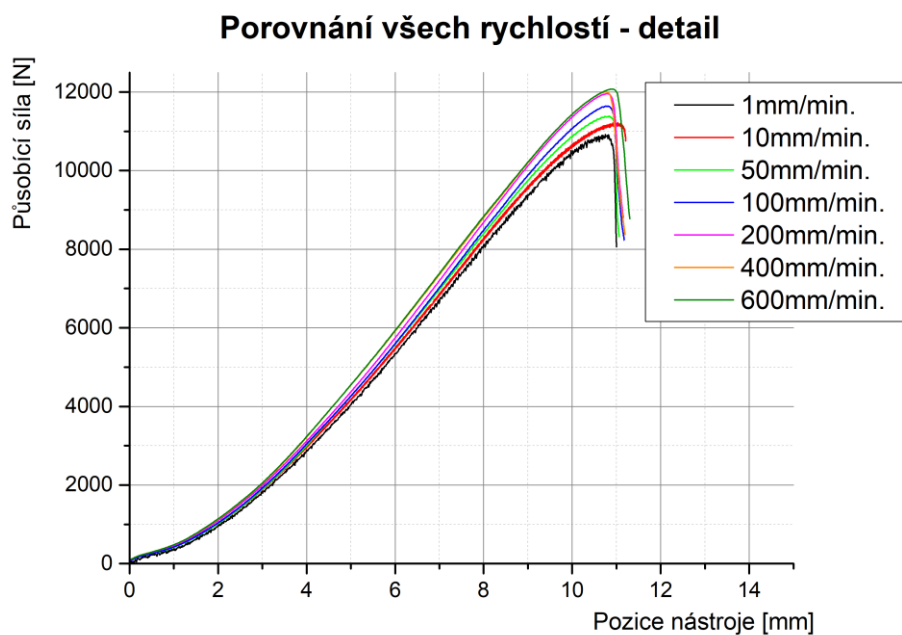
Tab. 13: ANOVA analýza pro působící sílu při 1 mm/min. a 600 mm/min.

ANOVA	F	Hodnota P	F krit
Vliv rychlosti razníku	533,4584	7,92E-15	4,413873

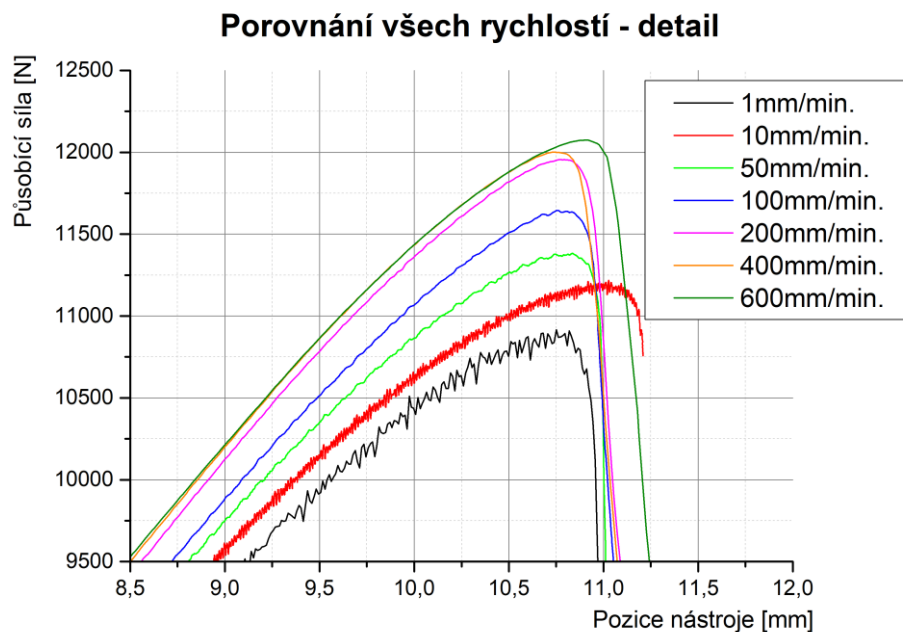
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Měření statické zkoušky tahem potvrdilo předpokládané hodnoty základních mechanických vlastností zvoleného testovaného materiálu HX180BD+Z100MCO. Při testech byl zjištěn vyšší koeficient normálové anizotropie, než je uvedená minimální hodnota v normě pro tento materiál. Vzhledem k tomu, že materiály s vyšší hodnotou koeficientu normálové anizotropie vykazují menší míru ztenčení plechu při tváření, je toto zjištění pozitivní.

Stěžejním cílem řešení diplomové práce bylo prokázat či neprokázat vliv rychlosti deformace na výsledek zkoušky hloubením dle Erichsen. Jako hodnotící kritérium pro vyhodnocení zkoušky byla zvolena velikost zatěžující síly a hloubka vniknutí razníku do materiálu v okamžiku vzniku trhliny. Z naměřených výsledků průběhu síly je patrné, že velikost síly potřebná pro vznik trhliny roste s rostoucí rychlostí deformace. Průběh síly a nárůst těchto sil s rostoucí rychlostí deformace je graficky zachycen na obrázku *Obr. 68* a *Obr. 69*.

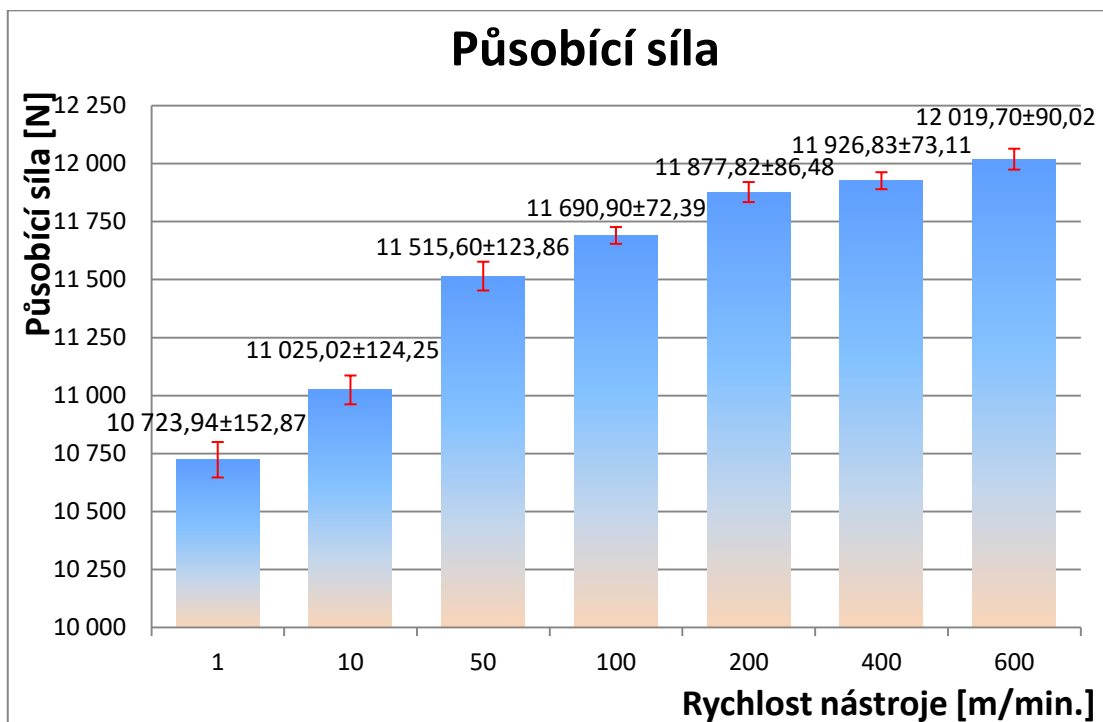


Obr. 68: Graf porovnání všech rychlostí



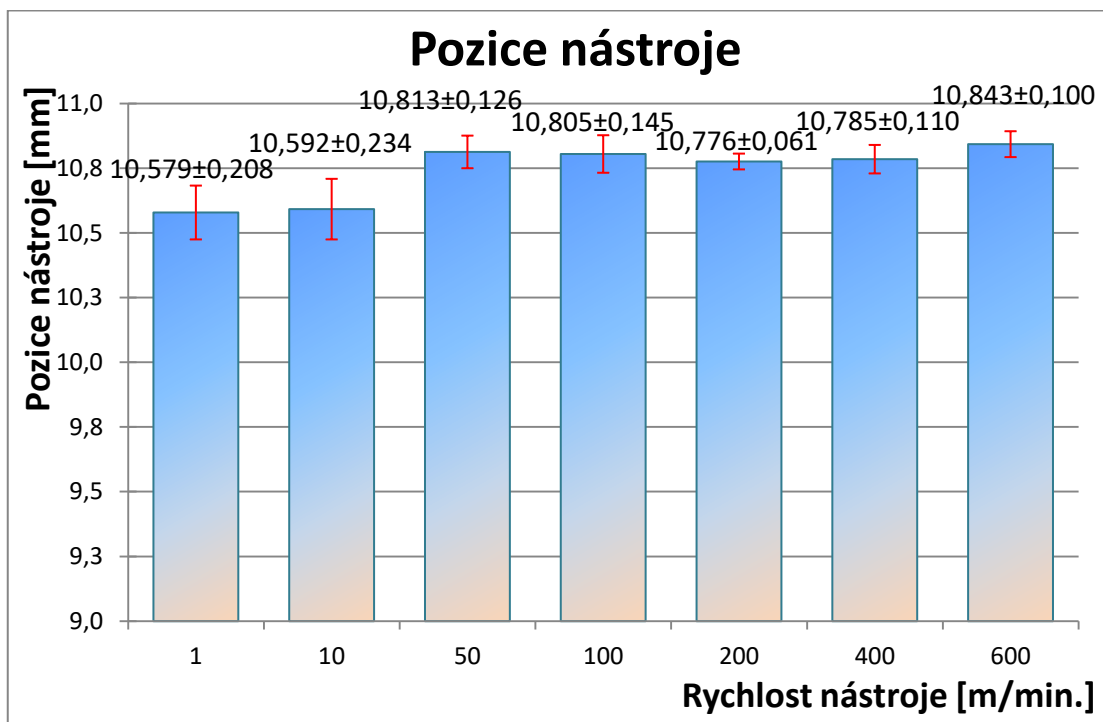
Obr. 69: Graf porovnání všech rychlostí s detailem na zlomový bod

Průměrné hodnoty naměřených sil z 10 měření spolu s vyjádřenými směrodatnými odchylkami jsou vidět na obrázku Obr. 70. Porovnáním velikosti naměřené síly při rychlosti tažníku 1 mm/min. a 600 mm/min. zjišťujeme, že síla při maximální rychlosti razníku 600 mm/min. je vyšší o 1296 N než při rychlosti 1 mm/min. což je nárůst o více jak 12 %. S ohledem na počet měření a velikost směrodatné odchylky byla pro prokázání případného vlivu rychlosti deformace na zatěžující sílu volena statistická metoda analýzy rozptylu tzv. ANOVA. Tento test jednoznačně potvrdil vliv rychlosti deformace na velikost zatěžující síly v okamžiku vzniku trhliny, viz tabulka Tab. 11.



Obr. 70: Výsledný graf působící síly při vzniku praskliny pro zvolené rychlosti

Průměrné odečtené hodnoty pozice razníku při maximální dosažené síle spolu se směrodatnými odchylkami jsou zachyceny formou sloupcového grafu na Obr. 71. Z pohledu rozdílů výsledků nejsou u tohoto vyhodnocení pozorovány velké změny při jednotlivých testovaných rychlostech. Pozice nástroje při minimální testované rychlosti (1 mm/min.) se liší jen o 2,5 % oproti testování při maximální rychlosti (600 mm/min.). Stejně jako v případě analýzy rozptylu (ANOVA) pro silovou odezvu, bylo i v tomto případě testováno pomocí statistické metody ANOVA, zda rychlost pohybu razníku má vliv na pozici razníku v okamžiku vzniku trhliny. Z pohledu statistického výsledku uvedeného v tabulce Tab. 10 je patrné, že rychlost razníku má vliv na okamžik vzniku trhliny. Z technického hlediska je však rozdíl mezi hodnotami pozice tažníku v případě minimální a maximální rychlostí razníku cca 0,3 mm., což je pouze 2 %.



Obr. 71: Výsledný graf pozice nástroje při vzniku praskliny pro zvolené rychlosti

Vyhodnocení fotogrammetrie

Fotogrammetrické měření mohlo být kvůli technickým omezením kamer použito pouze u třech nejnižších rychlostí. Důvodem byla malá maximální rychlost snímkování dostupných kamer. Avšak i tak přineslo zajímavé výsledky. Například bylo již v průběhu měření vidět, v kterých místech na vzorku vznikne prasklina. Nejzajímavější hodnota deformace je však samozřejmě těsně před prasknutím vzorku. Maximální deformaci v tomto okamžiku zobrazuje Tab. 14.

Tab. 14 Maximální hodnoty hlavní deformace těsně před vznikem praskliny

Rychlost [mm/min.]	Hlavní deformace [-]
1	0,531
10	0,559
50	0,58

Z Tab. 14 je patrný rostoucí trend maximální deformace před vznikem trhliny s rostoucí rychlostí nástroje. To znamená, že fotogrammetrické měření se shoduje s výstupními daty ze stroje, které ukázaly rostoucí trend působící síly při růstu rychlosti nástroje.

Je škoda, že fotogrammetrie nešla použít na celý rozsah rychlostí pro kompletní porovnání.

5 ZÁVĚR

V rámci řešení diplomové práce byl prokázán statisticky významný vliv rychlosti deformace na výsledek zkoušky hloubením dle Erichsena. Míra významu vlivu rychlosti byla hodnocena na základě kritérií velikosti dosažené síly, hloubky tažení do okamžiku vzniku trhliny a částečně i metodou fotogrammetrie.

Na rozdíl od původního předpokladu a v rozporu s již publikovanými výsledky byl tento vliv pro zvyšující se rychlost hodnocen jako pozitivní, tzn. s rostoucí rychlostí pohybu razníku se zvyšovala i deformace vzorku. Zajímavým faktem tedy je, že zkoumaný hlubokotažný materiál se v oblasti testovaných rychlostí chová opačně, než jak je známo při použití řádově vyšších rychlostí, které se využívají v technické praxi při tažení plechů.

Tento fakt lze přisuzovat vlivu mazání a celkovým tribologickým procesům vznikajících mezi razníkem a testovaným plechem. Dominantním efektem ovlivňující výsledek zkoušky hloubení dle Erichsena v tomto rozmezí testovaných rychlostí (1 mm/min. až 600 mm/min.) jsou tedy tribologické procesy spojené s mazáním plechu. Předpokladem je, že s případným dalším zvyšováním rychlosti pohybu razníku bude tento vliv klesat, až nastane situace, kdy vyšší rychlost pohybu nástroje bude mít za následek nižší tvářitelnost materiálu, poté bude tento vliv dále růst.

Tyto reálné rychlosti deformace uplatňované při tváření však nebylo při experimentu možné realizovat s ohledem na technické parametry použitého zařízení. Zkouška hloubením dle Erichsena nejspíše nikdy nebude schopna těchto rychlostí dosáhnout. Je však nutné podotknout, že k těmto účelům ani není navržena. V současné době, kdy jsou u speciálních typů hlubokotažných materiálů rozdíly v mechanických a deformačních hodnotách poměrně malé, je použití Erichsenovy zkoušky hloubením již diskutabilní a výsledky nejsou prokazatelné.

S rostoucím využitím bezkontaktních metod deformačních analýz budou s největší pravděpodobností využívány jiné typy technologických zkoušek pro hodnocení kvality hlubokotažných plechů, než je zkouška hloubením dle Erichsena.

Použitá literatura

- [1] LENFELD, Petr. *Technologie II. 1. část, (Tváření kovů)*. 3. vyd. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016, 110 s. ISBN 978-80-7494-304-1
- [2] JAREŠ, Vojtěch. *Základní zkoušky kovů a jejich teorie*. Praha: Academia, 1966, 209, [1] s.
- [3] Biomechanika – studijní materiály – Katedra mechaniky. Katedra mechaniky – Fakulta aplikovaných věd (CTPVV) – Západočeská univerzita [online]. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/bio/mechnapeti.php>
- [4] HAŠEK, Vladimír. *Kování*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 730 s. ISBN 04-233-65.
- [5] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 401 s.
- [6] Studijní podklady (prezentace) získané během studia na TU v Liberci v rámci předmětů Technologie II. a Tváření a lepení, Vyučující: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/my/>
- [7] LENFELD, Petr. Katedra tváření kovů a plastů - Skripta. *Technologie II.: Část I - Tváření kovů* [online]. TU v Liberci [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm
- [8] MACHEK, Václav. *Zpracování a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04683-8.
- [9] Psané studijní podklady získané během studia na Střední průmyslové škole v Mladé Boleslavi, Vyučující: Ing. Eva Gregorová
- [10] PLUHARĚ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
- [11] Testování tvrdosti kovů Rockwell, Brinell, Vickers, Leeb. [online]. Copyright © 2017 [cit. 23.5.2020]. Dostupné z: https://www.proinex.cz/cs/blog/7_testovani-tvrlosti-kovu-rockwell-brinell-vickers
- [12] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání - dotisk. Západočeská univerzita v Plzni: NAVA TISK, spol. s.r.o. Plzeň, 2010, 175 s. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [13] RŮŽIČKA, Milan, Milan ROST a Miroslav HANKE. *Dynamická pevnost a životnost*. 2. vyd., přeprac. Praha: České vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-01-00886-X.
- [14] Psané studijní podklady získané během studia na TU v Liberci, Vyučující: Ing. Magda Vestfálová Ph.D.

- [15]** ČSN EN ISO 20482. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 12 s.
- [16]** PAGÁČ, Aleš. Použití technologických zkoušek tvařitelnosti při tváření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michaela Císařová.
- [17]** ŽDÁRSKÝ, Jiří. *Vliv výpočtového modelu na přesnost numerické simulace*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [18]** PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 200 s. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [19]** LUHMANN, T. et al. *Close Range Photogrammetry (principles, techniques and applications)*. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. s. 510. ISBN 978-1870325-50-9.
- [20]** VOLEK, A. *Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný.
- [21]** VYTLAČIL, Jan. *Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace výlisku z pevnostního plechu*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [22]** MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [23]** ŠTÍPKOVÁ, Michaela. *Vliv doby stárnutí na mech vlastnosti slitiny AW 2024*. Technická univerzita v Liberci, 2018. Bakalářská práce. TU v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Solfronk Ph.D.

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol ze statické zkoušky tahem pro směr válcování 0°

Příloha 2: Protokol ze statické zkoušky tahem pro směr válcování 45°

Příloha 3: Protokol ze statické zkoušky tahem pro směr válcování 90°

Příloha 1: Protokol ze statické zkoušky tahem pro směr válcování 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

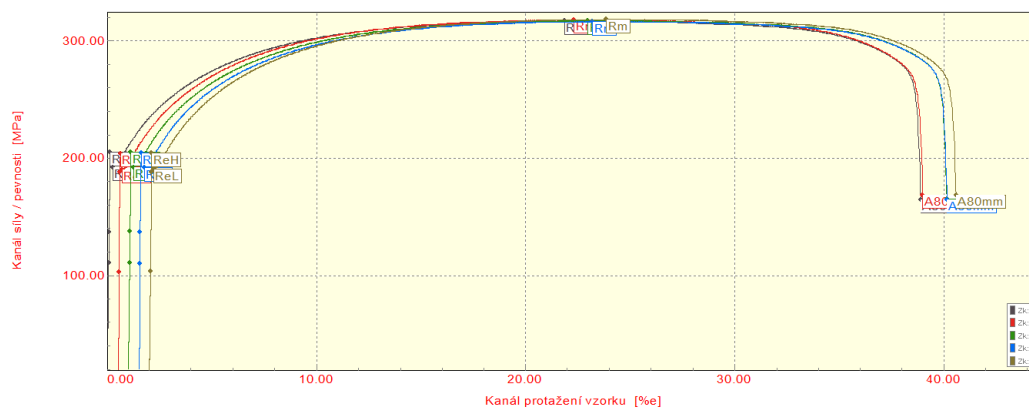
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180BD+Z100MCO
Rozměry vzorku : [0,6 x20] mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Radek Čeřovský
Datum provedení testu : 3.10. 2019
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	0.610	20.180	192.28	204.93	316.96	21.69	38.82	198809
2	0.610	20.180	190.48	204.21	317.95	21.65	38.41	197049
3	0.610	20.160	192.47	205.14	317.27	21.82	39.06	197762
4	0.610	20.200	192.09	204.73	316.65	21.55	38.58	199853
5	0.610	20.150	190.77	204.52	318.42	21.69	38.49	196924

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	0.610	20.174	191.62	204.71	317.45	21.68	38.67	198079
Směrodatná odchylka	0.000	0.019	0.92	0.36	0.73	0.10	0.27	1243
Minimální hodnota	0.610	20.150	190.48	204.21	316.65	21.55	38.41	196924
Maximální hodnota	0.610	20.200	192.47	205.14	318.42	21.82	39.06	199853



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

Příloha 2: Protokol ze statické zkoušky tahem pro směr válcování 45°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

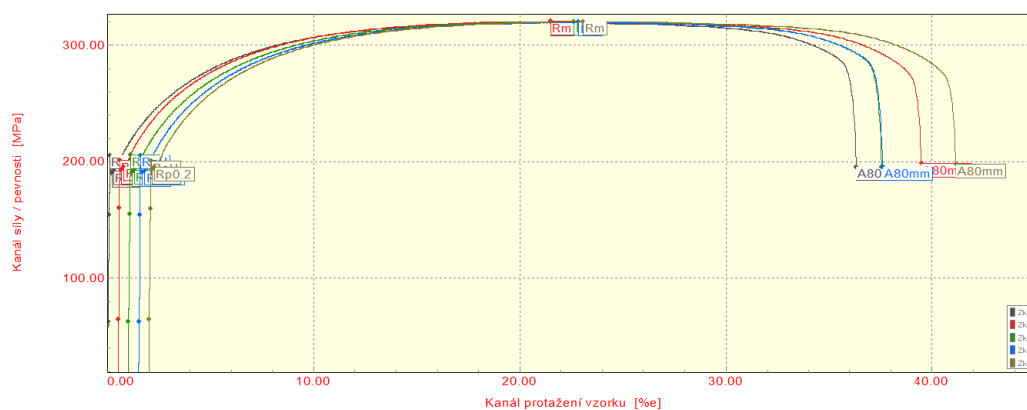
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180BD+Z100MCO
Rozměry vzorku : [0,6 x20] mm
Směr odebrání vzorku : 45°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Radek Čeřovský
Datum provedení testu : 3.10. 2019
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	0.610	20.180	190.38	205.41	319.73	21.33	36.24	206604
2	0.610	20.180	192.62	201.01	320.63	20.83	38.89	209220
3	0.610	20.140	190.75	205.82	320.36	21.47	36.47	205720
4	0.610	20.170	190.47	205.52	319.89	21.20	36.01	207998
5	0.610	20.200	192.43	200.81	320.31	20.93	39.06	208097

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	0.610	20.174	191.33	203.71	320.18	21.15	37.33	207528
Směrodatná odchylka	0.000	0.022	1.10	2.56	0.37	0.27	1.51	1372
Minimální hodnota	0.610	20.140	190.38	200.81	319.73	20.83	36.01	205720
Maximální hodnota	0.610	20.200	192.62	205.82	320.63	21.47	39.06	209220



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

Příloha 3: Protokol ze statické zkoušky tahem pro směr válcování 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

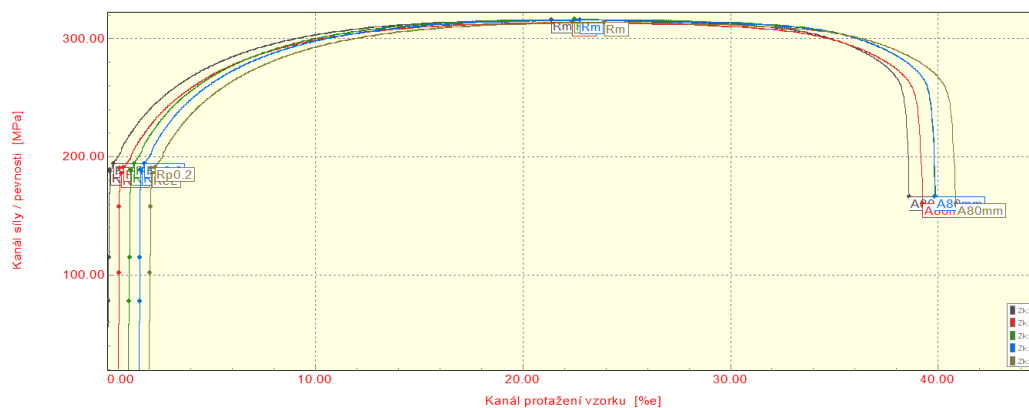
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX180BD+Z100MCO
Rozměry vzorku : [0,6 x20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : proměnná 1[15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Radek Čeřovský
Datum provedení testu : 3.10. 2019
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	ReL MPa	ReH MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa
1	0.610	20.180	187.46	189.12	315.78	21.23	38.54	204271
2	0.610	20.180	185.80	190.06	313.58	21.75	38.70	204772
3	0.610	20.150	187.74	189.40	316.25	21.36	38.78	203297
4	0.610	20.190	187.37	189.02	315.62	21.10	38.30	205446
5	0.610	20.175	185.84	190.11	313.66	21.80	38.79	204361

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	0.610	20.175	186.84	189.54	314.98	21.45	38.63	204430
Směrodatná odchylka	0.000	0.015	0.94	0.51	1.26	0.31	0.21	785
Minimální hodnota	0.610	20.150	185.80	189.02	313.58	21.10	38.30	203297
Maximální hodnota	0.610	20.190	187.74	190.11	316.25	21.80	38.79	205446



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