

Analýza deformačního chování materiálu při biaxiálním zatížení

Bakalářská práce

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Štěpán Ryppl

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

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





Zadání bakalářské práce

Analýza deformačního chování materiálu při biaxiálním zatížení

Jméno a příjmení: Štěpán Rypl
Osobní číslo: S21000294
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Přehled mechanických zkoušek kovových materiálů.
2. Stanovení křivek přetvárného odporu.
3. Pro zvolený materiál provést experimentální zjištění křivky přetvárného odporu při biaxiálním zatížení. Pro testy použít hydrostatickou zkoušku vyboulování a biaxiální zatížení rovinného vzorku pomocí hydraulických válců.
4. Rozbor výsledků měření. Stanovení případného vlivu použité metodiky na výsledek zkoušky.
5. Závěr.

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

tabulky, obrázky, grafy
cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [2] BUNGE, H. – J., D. BANABIC a K. PÖHLANDT. *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Berlin; London: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-08750-9.
- [3] PÖHLANDT, Klaus. *Materials testing for the metal forming industry*. Berlin u.a: Springer, 1989. ISBN 978-3-540-50651-5.
- [4] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.
- [5] ČSN EN ISO 6892-1 (420310) *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [6] ČSN EN ISO 14556 (420380) *Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem – Instrumentovaná zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 30. listopadu 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

22. května 2022

Štěpán Rypl

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou deformačního chování kovových materiálů při biaxiálním zatěžování. V teoretické části jsou popsány základní mechanické zkoušky materiálů a technologické zkoušky tváritelnosti plechů včetně popisu jevů a vlastností ovlivňující tváritelnost. Je zde část vyhrazena pro popis principu fotogrammetrie a bezkontaktních optických systémů. V experimentální části je detailní popis postupu provedených zkoušek v podobě statické zkoušky tahem, bulge testu a biaxiálního namáhání rovinného kříže. Následuje zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení jednotlivých zkoušek za pomoci porovnání deformačních hodnot, tj. koeficientu monotónního zpevnění a exponentu deformačního zpevnění.

Klíčová slova:

Biaxiální napětí, tváritelnost kovů, křivka zpevnění, bulge test, biaxiální namáhání rovinného kříže, statická zkouška tahem

Annotation:

This bachelor thesis is concerned with analysis of deformation behavior of metallic material under biaxial loading. In Theoretical part there are described basic mechanical test of materials and technological tests of metal sheets formability including description of attributes affecting formability processes. There is also a part dedicated to principles of fotogrammetry and contactless optical systems. Experimental part describes detailed procedure of undertaken tests specifically static tensile test, bulge test and biaxial loading of planar sheet metal cross. This is followed by processing of measured values and evaluation of individual tests by comparing deformation values, ie strengthening coefficient and the strain hardening exponent.

Keywords:

Biaxial stress, metals formability, hardening curve, bulge test, biaxial loading of planar sheet metal cross, static tensile test

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a pomoci při měření experimentální části, za poskytnutí faktických poznámek, podkladů a rad určené pro vypracování této práce. Dále děkuji i panu Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jeho asistenci při měření a poskytnutí základních znalostí ve využitých softwarových programech. Nakonec bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu během studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
1. Úvod.....	12
2. Teoretická část	13
2.1. Mechanické zkoušky kovových materiálů.....	13
2.1.1. Statická zkouška tahem.....	13
2.1.2. Statické zkoušky tlakem, ohybem, stříhem a krutem	17
2.1.3. Dynamické zkoušky.....	19
2.1.4. Zkoušky tvrdosti	21
2.1.5. Biaxiální zkoušky napětí.....	21
2.2. Technologické zkoušky plechů.....	22
2.2.1. Hydroulická zkouška podle Tomlena (bulge test)	23
2.2.2. Zkouška hloubení podle Erichsena	24
2.2.3. Kalíškovací zkouška	25
2.3. Tvářitelnost a přetvárné odpory	26
2.3.1. Deformační odpor	26
2.3.2. Činitelé ovlivňující tvářitelnost	27
2.3.3. Křivka zpevnění.....	31
2.4. Fotogrammetrie.....	32
2.4.1. Princip fotogrammetrie	32
2.4.2. Fotogrammetrie ve strojírenství.....	33
3. Experimentální část.....	34
3.1 Zkušební materiál	34
3.2 Statická zkouška tahem.....	35
3.2.1 Příprava zkušebních vzorků.....	35
3.2.2 Průběh měření	36
3.2.3 Výsledky měření tahové zkoušky	36

3.3 Bulge test	39
3.3.1 Přípravka zkušební vzorku.....	39
3.3.2 Příprava optického systému	40
3.3.4 Průběh měření	41
3.3.5 Výsledky bulge testu.....	42
3.4 Biaxiální namáhání rovinného kříže	46
3.4.1 Příprava měření.....	46
3.4.2 Průběh měření	48
3.4.3 Výsledky měření	49
4. Diskuze výsledků	53
5. Závěr	55
6. Použitá literatura	57
7. Seznam příloh	59

Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Název	Rozměr
A	Tažnost	[%]
A_g	Homogenní tažnost	[%]
$A_{Rp0,2}$	Plošná anizotropie smluvní meze kluzu	[1]
C	Koeficient monotónního zpevnění	[MPa]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
F	Působící síla	[N]
F_e	Síla na mezi kluzu	[N]
F_m	Síla na mezi pevnosti	[N]
$F_{p0,2}$	Síla na smluvní mezi kluzu	[N]
h	Výška vrchlíku	[mm]
K	Stupeň tažení	[1]
L	Okamžitá délka vzorku	[mm]
L_u	Konečná délka vzorku	[mm]
L_0	Počáteční délka vzorku	[mm]
m	Součinitel tažení	[1]
M_{kmax}	Maximální krouticí moment	[N·mm]
M_{omax}	Maximální ohybový moment	[N·mm]
n	Exponent deformačního zpevnění	[1]

p	Hydrostatický tlak	[MPa]
R	Smluvní napětí	[MPa]
r_α	Normálová anizotropie ve směru α ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)	[1]
\bar{r}	Střední hodnota normálové anizotropie	[1]
R_d	Poloměr zaoblení kopule	[mm]
R_e	Mez kluzu v tahu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_{md}	Mez pevnosti v tlaku	[MPa]
R_{mk}	Mez pevnosti v krutu	[MPa]
R_{mo}	Mez pevnosti v ohybu	[MPa]
R_{ms}	Mez pevnosti v stříhu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	Okamžitá plocha průřezu vzorku	[mm ²]
S_u	Konečná plocha průřezu vzorku	[mm ²]
S_0	Původní plocha průřezu vzorku	[mm ²]
t	Okamžitá tloušťka plechu	[mm]
t_0	Počáteční tloušťka plechu	[mm]
W_k	Modul průřezu v krutu	[mm ³]
W_0	Modul průřezu v ohybu	[mm ³]
Z	Kontrakce	[%]

ΔL	Změna délky zkušební tyče	[mm]
ε	Poměrné prodloužení	[1]
σ	Skutečné napětí	[MPa]
σ_i	Intenzita napětí	[MPa]
σ_1	Hlavní napětí	[MPa]
σ_2	Vedlejší napětí	[MPa]
σ_3	Tangenciální napětí	[MPa]
σ_c	Mez únavy	[MPa]
σ_d	Deformační odpor	[MPa]
σ_p	Přirozený deformační odpor	[MPa]
φ	Skutečná deformace	[1]
φ_i	Intenzita deformace	[1]
φ_0	Ofsetová deformace	[1]
φ_1	Hlavní deformace	[1]
φ_2	Vedlejší deformace	[1]
φ_3	Tangenciální deformace	[1]
FEM	Finite element method (přelož.: metoda konečných prvků)	
HB	Značení tvrdosti podle Brinella	[1]
HR	Značení tvrdosti podle Rockwella	[1]
HV	Značení tvrdosti podle Vickerse	[1]

1. Úvod

Je známo, že při různém způsobu zatěžování vykazuje materiál různé mechanické a pevnostní charakteristiky. Z hlediska napjatosti bude výrobek vykazovat jiné vlastnosti při jednoosém zatěžování než při dvouosém – biaxiálním zatěžováním. Za účelem popisu chování deformace materiálu vlivem působení biaxiálního napětí se realizuje řada mechanických a technologických zkoušek, díky čemuž lze získat hodnoty a aplikovat je například při tvorbě deformačního modelu při numerické simulaci. Mezi nejnámější a nejpoužívanější biaxiální napěťově zkoušky plechu patří hydrostatická zkouška vyboulováním (ang. bulge), tzv. bulge test.

Cílem této bakalářské práce je analyzovat deformační chování zkušebního materiálu při biaxiálním zatěžování. Vyhodnocovat a porovnávat se budou konkrétně naměřená data a výsledky z biaxiálního zatěžování v podobě bulge testu a biaxiálního namáhání rovinného kříže, včetně samotných průběhů zkoušek, v určité snaze najít efektivnější způsob určení deformačních charakteristik nežli za použití bulge testu, který je náročný z hlediska přípravy, vyhodnocení i samotného provádění testu.

Bakalářská práce je dělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část se zabývá materiálovými zkoušky jak mechanickými, tak technologickými, kdy zkoušky použité v experimentální části jsou popsány detailněji, pro úplnost jsou stručně popsány i další zkoušky. V teoretické části jsou dále zmíněny principy a vlastnosti ovlivňující tváritelnost plechů a popis fotogrammetrie, která je aplikována v experimentu. V experimentální části jsou uvedeny postupy a výsledky jednotlivých zkoušek. Na závěru této práce jsou výsledky shrnuty. Na konci je uveden seznam příloh a odborná literatura, ze které bylo v průběhu práce čerpáno a odkazováno.

2. Teoretická část

2.1. Mechanické zkoušky kovových materiálů

S každým dnem rostou požadavky v průmyslu na zefektivnění a optimalizaci výroby. Jedním významným řešením této problematiky je správný výběr materiálu a s ním i spojený technologický výrobní proces. Pro vybrání vhodného materiálu a jeho tvaru je potřeba vzít v úvahu několik klíčových vlastností daného materiálu, aby byly splněny požadavky výrobku v praxi. Z tohoto důvodu je prováděno několik experimentálních a normalizovaných zkoušek, jejichž výsledkem jsou například fyzikální vlastnosti, mezní hodnoty napětí a další parametry. [1], [2], [3]

2.1.1. Statická zkouška tahem

Patří mezi nejstarší, nejzákladnější a nejrozšířenější mechanické zkoušky a to především z důvodu její jednoduchosti. Podle normy ČSN EN ISO 6892-1 se jedná o jednoosé statické namáhání tahem. Zkušební tyč je umístěna do čelistí zkušebního stroje (trhacího stroje) a je následně zatěžována narůstajícím tahovým napětím. Zkouška končí v momentě přetržení zkušebního vzorku. [2], [4], [5]

Základním výstupem této zkoušky je závislost zatěžovací síly F [N] na absolutním prodloužení zkušební tyče ΔL [mm], tedy v matematickém zápisu $F = f(\Delta L)$. Tyto veličiny zaznamenává zkušební stroj a lze je graficky znázornit pomocí pracovního diagramu. Naměřené hodnoty z průběhu zkoušky se dále zpracovávají pro určení napěťových a deformačních charakteristik materiálu. [2], [4]

Smluvní diagram napětí

Pro praktické využití ve strojírenství a obzvláště možnosti porovnání výsledků různých materiálů se pracovní diagram převádí na smluvní diagram napětí. Zatěžovací síla je vztažena na původní neměnný průřez zkušební tyče S_0 [mm²], to odpovídá smluvnímu (přibližnému) zatěžovacímu tahovému napětí R [MPa], které je vztaženo k poměrnému přírůstku délky zkušební tyče ε [1]. Na obr. 2.1 je možné vidět základní tvary smluvních diagramů pro různé materiály. [1], [2]

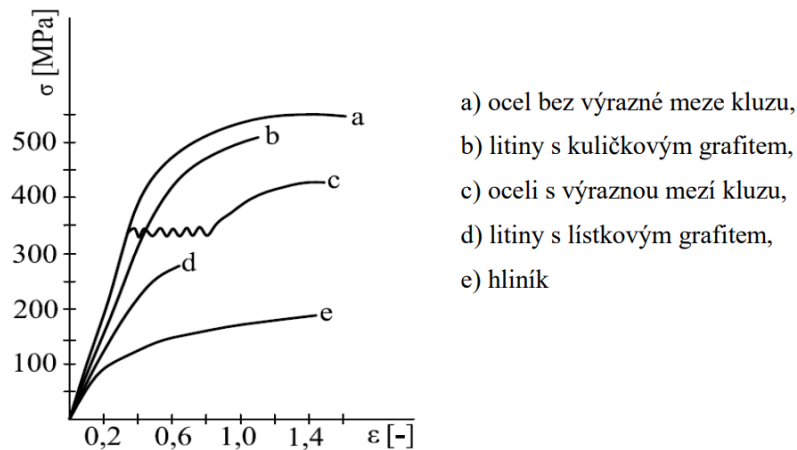
$$R = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} [1] \quad (2.2)$$

L [mm] – okamžitá měřená délka zkušební vzorku v průběhu zkoušky

L_0 [mm] – počáteční měřená délka zkušební vzorku

V důsledku prodlužování dochází ke změně tvaru a zmenšování plochy průřezu zkušební tyče a tím i ke změně tahového napětí. Pro zjištění skutečného napětí je potřeba znát i okamžitou plochu průřezu zkušební tyče v průběhu zkoušky. Pro jednoduchost se celosvětově používá výhradně smluvní napětí a smluvní diagram. [1], [2]



Obr. 2.1 Základní tvary diagramů z tahové zkoušky pro různé materiály [2]

Mez kluzu R_e

Na začátku zkoušky tahem je prodloužení přímo úměrné zatěžující síle, tedy platí Hookeův zákon. V diagramu je ta část zkoušky znázorněna přímkou a jedná se o elastickou oblast. Mez kluzu je právě takové napětí, kdy se materiál přesouvá z elastické oblasti do oblasti elasticko-plastické, kdy přestává platit Hookeův zákon. Z hlediska mechanických vlastností materiálu patří mez kluzu k nejdůležitějším, jelikož při překročení hodnoty napětí na mezi kluzu dochází k trvalým deformacím. [1], [2]

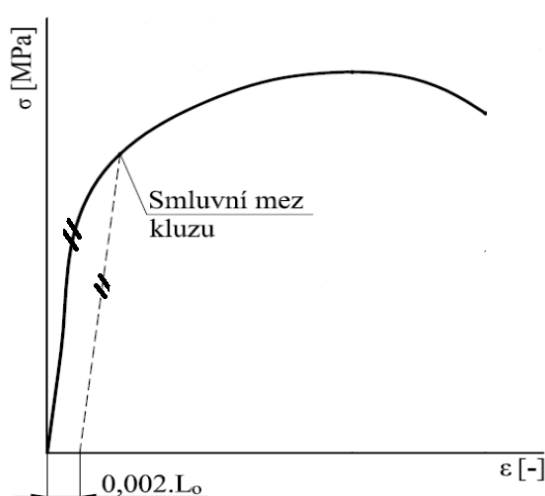
$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (2.3)$$

F_e [N] – síla na mezi kluzu

S_0 [mm²] – počáteční plocha průřezu

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

Z obr. 2.1 a z diagramů je patrné, že u některých materiálů je mez kluzu lehce rozpoznatelná (křivka c). V případě nevýrazné meze kluzu (křivka a) se určuje smluvní mez kluzu. Ta se určuje v diagramu zavedením rovnoběžné přímky z vodorovné osy (odpovídající nejčastěji 0,2% poměrného prodloužení) s přímkou znázorňující elastickou oblast (platný Hookeův zákon), ve společném bodě křivky z tahové zkoušky a nově zavedené rovnoběžky se nachází smluvní mez kluzu. Vybraná hodnota poměrného prodloužení se vyskytuje přímo v označení smluvní meze kluzu, v tomto případě $R_{p0,2}$, ale může se pohybovat v rozmezí 0,1% - 0,5%. [1], [2]



Obr. 2.2 Určování smluvní meze kluzu v diagramu []

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.4)$$

$F_{p0,2}$ [N] – síla na smluvní mezi kluzu

Mez pevnosti v tahu R_m

Představuje maximální napětí, kdy při překročení dochází k trvalému porušení celistvosti materiálu zkušební vzorku. U houževnatých materiálů dochází při zkoušce k tvorbě lokálního zúžení (krčku) a následnému přetržení, v případě křehkých materiálů dojde k náhlému přetržení. Mez pevnosti souvisí s určováním tvrdosti materiálu, meze únavy a slouží ke kontrole kvality materiálu. [1], [2]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.5)$$

F_m [N] – maximální zatěžovací síla v tahové zkoušce

Tažnost A

Je definována jako trvalé prodloužení měřené délky zkušební tyče do přetržení vyjádřené v procentech. Podle tažnosti se určuje u litin jejich křehkost, u oceli její tváritelnost. V případě absence průtahoměru se musí konečná měřená délka po lomu L_u [mm] změřit přiložením lomových ploch k sobě do jedné osy v přímce a přeměřením vzdálenosti nanesených rysek vytvořených ještě před tahovou zkouškou. [1], [2]

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.6)$$

Vyhodnocuje se i tzv. homogenní tažnost A_g [%], která zohledňuje pouze homogenní (rovnoměrnou) plastickou deformaci materiálu (do meze pevnosti). Označením A_{80} se rozumí, že je počáteční měřená délka rovna 80 mm. [1], [2]

Kontrakce Z

Charakterizuje poměrné zúžení zkušební tyče v procentech a stejně jako tažnost slouží jako ukazatel plastičnosti materiálu a schopnost se deformovat. Kontrakce je definována následujícím vztahem (2.7). [1], [2]

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.7)$$

Skutečné napětí – skutečná deformace

Pro přesnou realistickou analýzu je zapotřebí opustit smluvní veličiny a zavádí se skutečné veličiny. Pro grafické znázornění se vytváří diagram se skutečným napětím σ [MPa] a skutečné deformaci, nejčastěji označován jako logaritmická deformace φ [1]. V tomto diagramu platí závislost $\sigma = f(\varphi)$, kde skutečné napětí je definováno rovnicí (2.8). [1], [2]

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa] \quad (2.8)$$

S [mm²] – okamžitá plocha průřezu zkušební tyče

F [N] – zatěžující síla

Pro výpočet skutečné deformace platí vzorec:

$$\varphi = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) [-] \quad (2.9)$$

V oblasti lineárních elastických deformací, to znamená oblast platnosti Hookeova zákona, je smluvní diagram s diagramem skutečných hodnot totožný. Rozdíl nastává v okolí meze kluzu, kdy se začne smluvní napětí oproti skutečnému zmenšovat vlivem vztažení působící síly na původní neměnný průřez S_0 (v případě smluvního napětí) a pomalého vytváření krčku. V oblasti mezi mezí kluzu a mezí pevnosti (elasticko-plastická oblast) lze aplikovat zákon o zachování objemu v následujícím tvaru (2.10). [1], [2]

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L \quad (2.10)$$

Pro přepočtení smluvního napětí na skutečné platí tato rovnice:

$$\sigma = R \frac{S_0}{S} [MPa] \quad (2.11)$$

Úpravou rovnic (2.10) a (2.11) a použitím rovnice (2.2) lze získat následující vztah:

$$\sigma = R \frac{S_0}{S} = \frac{R \cdot L}{L_0} = R \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = R \cdot (1 + \varepsilon) [MPa] \quad (2.12)$$

Podobnou úpravou se vzorec (2.9) upraví na tvar:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) [-] \quad (2.13)$$

2.1.2. Statické zkoušky tlakem, ohybem, stříhem a krutem

Zkouška pevnosti v tlaku

Zkušební vzorek v podobě válečku (v případě nekovových materiálů výjimečně ve tvaru krychle) je zatěžován v podélné ose dvěma stejně velikými silami způsobující tlakové napětí. Zjišťuje se především pevnost v tlaku R_{md} [MPa], to je maximální napětí, při kterém dojde k poruše celistvosti vzorku. Mezi další charakteristiky patří poměrné zkrácení ε_t [%] a příčné rozšíření ψ_t [%]. Zpravidla se testují křehké materiály. [1], [2], [6]

$$R_{md} = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad (2.14)$$

Zkouška ohybem

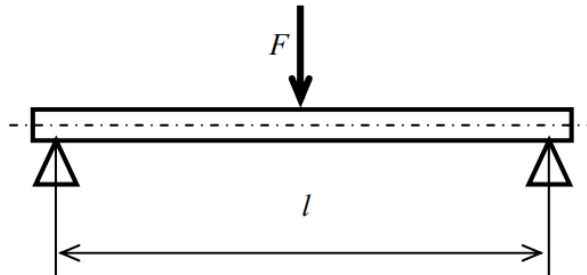
Tyč válcového tvaru (kruhový průřez) je položena na dvou podpěrách a uprostřed je zatěžována silou. Cílem zkoušky je nejčastěji zjistit pevnosti v ohybu R_{mo} [MPa]. [1], [2], [6]

$$R_{mo} = \frac{M_{omax}}{W_0} [MPa] \quad (2.15)$$

M_{omax} – maximální ohybový moment [$N \cdot mm$]

W_0 - modul průřezu v ohybu pro konkrétní průřez [mm^3]

$$M_{omax} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} [MPa] \quad (2.16)$$

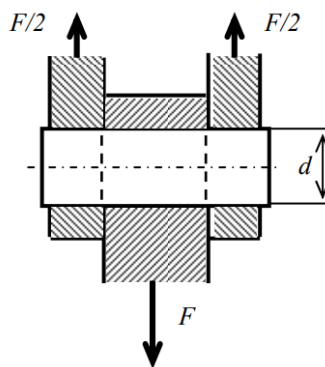


Obr. 2.3 Znárodnění zkoušky ohybem [6]

Zkouška stříhem

Zkouší se materiály určené pro výrobu strojních součástí (šrouby, nýty, plechy apod.), které jsou namáhány stříhovým napětím, které vzniká působením paralelních, vzájemně opačných sil ležících v rovině stříhu a nevytváří ani ohybový či krouticí moment. Výstupem zkoušky je mez pevnosti v stříhu R_{ms} [MPa]. [1], [2], [6]

$$R_{ms} = \frac{F_{max}}{2S_0} [MPa] \quad (2.17)$$



Obr. 2.4 Znárodnění zkoušky stříhem [6]

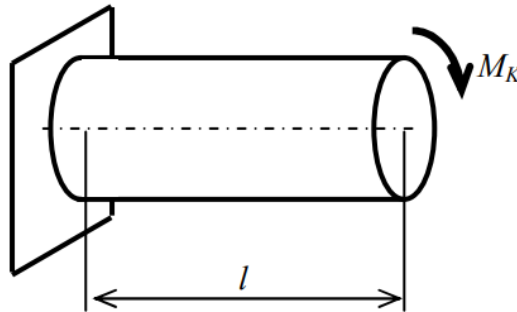
Zkouška krutem

Zkušebním vzorkem je válcová tyč vetknutá na jednom konci a namáhána postupně rostoucím krouticím momentem na druhém konci. Používá se především pro zkoušky materiálu určené pro hřídele. Zjišťuje se nejčastěji mez pevnosti v krutu R_{mk} [MPa]. [1], [2], [6]

$$R_{mk} = \frac{M_{kmax}}{W_k} \text{ [MPa]} \quad (2.18)$$

M_{kmax} - maximální krouticí moment [N·mm]

W_k - modul průřezu v krutu pro konkrétní průřez [mm³]



Obr. 2.5 Znárodnění zkoušky krutem [6]

2.1.3. Dynamické zkoušky

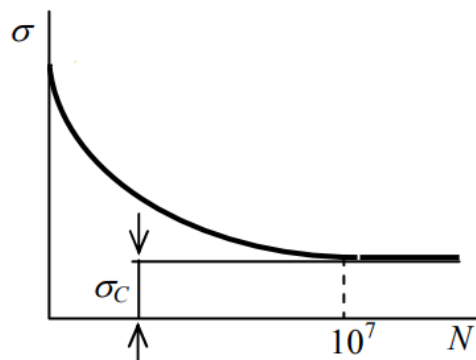
V praxi jsou strojní součásti při provozu často zatěžovány náhlou silou (rázem) nebo časově proměnlivými silami (cykly). Napětí způsobena dynamickými silami mohou představovat značné riziko, jelikož může dojít k poškození součásti, aniž by byly dosaženy hodnoty napětí mezi pevnosti daného materiálu zjištěné při statických zkouškách. Aby se předešlo poruchám vlivem působení dynamických sil, provádí se následující experimentální zkoušky, jejichž výstupem je hodnota, charakteristika či křivka zohledňující dynamické namáhání. Zkoušky se dělí na rázové a únavové (s opakovaným namáháním – cykly). [1], [2], [6]

Rázové zkoušky

Za pomoci těchto zkoušek je zjišťována houževnatost materiálu při náhlém zatížení (rázem). Princip těchto zkoušek spočívá ve vytvoření rázu za pomoci kyvadla s břitem, které je spuštěno z výšky a vlastní tíhou přerazí v nejnižší dolní úvratí upevněný zkušební vzorek tyčového tvaru. Existují dvě normalizované zkoušky, lišící se primárně ve způsobu uchycení zkušebního vzorku: rázová zkouška podle Charpyho (zkušební vzorek položen na dvou podporách) a rázová zkouška podle Izoda (vzorek uchycen letmo). Z těchto zkoušek se počítá deformační práce, která je ekvivalentní ztracené polohové energii kyvadla, to je změna výšky v rámci jednoho kyvu mezi počátečním bodem a konečným bodem. [1], [2], [6]

Únavové zkoušky

Zkouší se materiálová odolnost vůči únavě a vzniku únavového lomu. Zkušební vzorek je opakovaně (cyklicky) střídavě namáhán, nejčastěji ohybem. Pro zkoušku je zapotřebí mnoha vzorků, kdy každý vzorek je zatížen různou silou a zaznamenává se, při jaké zatěžovací síle a kolika počtu cyklů byl daný vzorek vystaven do jeho prasknutí. Hodnoty se zanášejí do tzv. Wöhlerova diagramu, kde vzniká závislost na počtu dokončených cyklů N na zatěžovacím napětí σ . Z diagramu lze odečíst mez únavy σ_c [MPa], která představuje maximální napětí, které vzorek vydrží nekonečně mnoho cyklů – smluvní počet cyklů v případě oceli je přibližně 10^7 cyklů. [1], [2], [6]



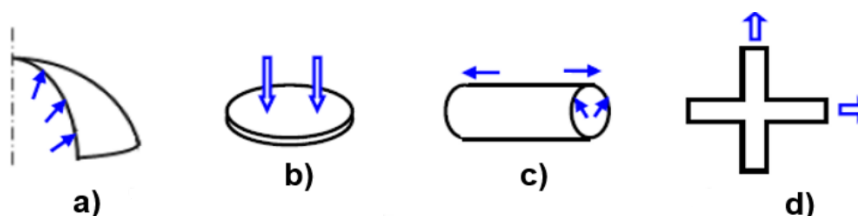
Obr. 2.6 Wöhlerův diagram s mezí únavy σ_c [6]

2.1.4. Zkoušky tvrdosti

Tvrdotost lze definovat jako odpor, který materiál klade proti vniknutí cizího tělesa. V této definici spočívá i princip zkoušky. Do povrchu zkušebnímu materiálu je vtačováno zkušební tělísko – indentor vhodného tvaru (kužel, kulička, jehlan) a o vysoké tvrdosti (kalená ocel, slinuté karbidy, diamant). Hodnotí se velikost vtisku v povrchu zkušebnímu materiálu zanechaného zkušebním tělískem, podle čehož se vyhodnocuje a počítá hodnota tvrdosti materiálu. Existuje řada normalizovaných zkoušek, lišících se ve tvaru a materiálu indentoru, síle zatlačování indentoru a způsobu výpočtu a vyhodnocení tvrdosti. Mezi nejpoužívanější zkoušky tvrdosti patří: zkouška podle Brinella (tvrdotost uváděna v jednotkách HB [1]), zkouška podle Rockwella (HR [1]) a zkouška podle Vickerse (HV [1]). [1], [2], [6]

2.1.5. Biaxiální zkoušky napětí

Plošné tváření plechů představuje značnou část průmyslové výroby ve stále rostoucím automobilovém, leteckém či jiném výrobním odvětví. Spolu s tím jdou v ruku ruce vyšší požadavky na kvalitu a efektivitu výroby. Tváření plechů je charakteristické působením velké tvářecí síly na plochu o poměrně malé tloušťce, ve snaze vyrobit lehký a přesto odolný výrobek se správnými rozměry a tvarem. Ne pokaždé se takový výrobní proces obejde bez vzniku vad na kvalitě, kdy dojde vlivem vnějších sil ke zvrásnění, prasklině, povrchové odchylky od tvaru apod. Pro správný návrh výrobku a výrobního procesu bez zbytečného a neefektivního předimenzování je zapotřebí znát průběh napětí a deformací nikoliv jen z jednoosé napjatosti, ale praxi odpovídajícímu biaxiálnímu zatížení. Hodnoty lze získat z technologických zkoušek, díky kterým lze analyticky či s využitím numerické simulace předejít chybám ve výrobě a optimalizovat výrobní proces. Na obr. 2.7 jsou zjednodušeně znázorněny čtyři základní principy biaxiálních zkoušek. [3], [7], [8]



Obr. 2.7 Biaxiální napěťové zkoušky a) hydraulická zkouška vyboulováním (bulge test) b) kompresní test disku c) tahová zkouška trubky s vnějším tlakem d) biaxiální namáhání rovinného křížového vzorku [9]

Mezi nejvíce používané výše uvedené zkoušky patří bulge test, který je detailněji popsán v následující kapitole 2.2.1. V případě využití kompresního testu na disk je nevýhoda ta, že zkoušku ovlivňuje vliv tření nástroje na výrobek, proto není tolik využívána. Třetí výše uvedená zkouška na obr. 2.7 je určena pro biaxiální zkoušení trubek, kdy je vzorek zatěžován tahovou silou za pomoci protilehlých hydraulických válců a zároveň je na trubku vyvíjen vnitřní tlak hydraulickým zesilovačem. Hodnoty deformace a napětí jsou zaznamenávány tenzometry na povrchu vzorku. [3], [7]

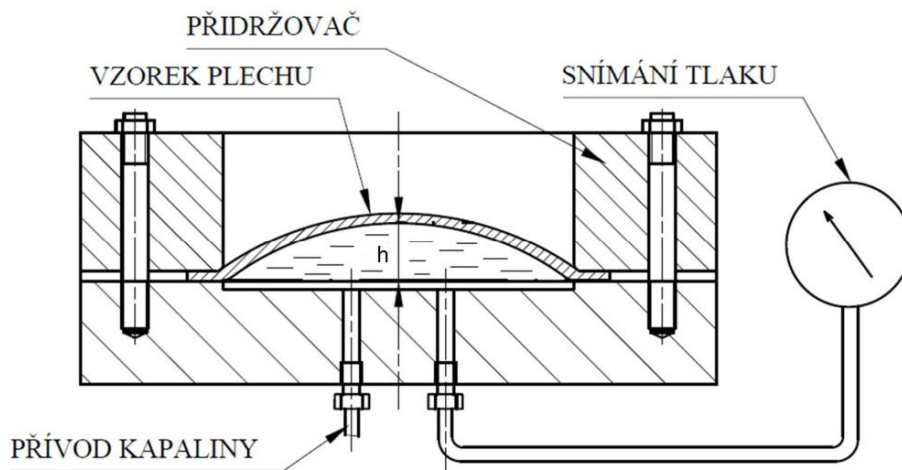
Další možnou zkouškou pro zjištění materiálových vlastností z biaxiálního namáhání je biaxiální zkouška rovinného křížového vzorku. Z názvu vypovídající vzorek v podobě plechového kříže je upnutý za jednotlivá ramena do čtyř navzájem kolmých čelistí umístěných na konci hydraulických pístů, které jsou nezávisle připojeny k pohonným agregátům a vytváří tahové napětí působící na vzorek ve dvou osách. Důležitou podmínkou pro tuto zkoušku je, aby střed vzorku při namáhání setrval v klidu, a zároveň aby docházelo k deformacím pouze v centrální oblasti vzorku (nikoliv v ramenech). Zatěžovací síla je zaznamenávána pohonnými jednotkami a deformaci lze měřit za pomoci využití optických snímačů, pracujících na principu fotogrammetrie. [3], [7], [10]

2.2. Technologické zkoušky plechů

Na rozdíl od standardních statických mechanických zkoušek, technologické zkoušky zohledňují do jisté míry výrobní proces, což výrazně usnadňuje volbu vhodného výrobního procesu pro daný materiál a využití technologie. U plechů se stanovuje tváritelnost a jejich chování při tváření. Mezi nejčastěji používané technologické zkoušky pro hlubokotažné plechy určené pro tváření patří zkouška hloubení podle Erichsena, kalíškovací (Schmiedtova) zkouška a Tomlenova hydrostaulická zkouška vyboulováním (bulge test). Mezi další technologické zkoušky plechů patří zkouška lámavosti, zkouška dvojitým ohybem, zkouška střídavým ohybem, zkouška zvlnění, vybočením a zkouška odpružení. [8]

2.2.1. Hydroulická zkouška podle Tomlena (bulge test)

Technologická zkouška je založena na biaxiálním zatěžování plechu působením hydrostatického tlaku na stranu plechu. Zkušební vzorek v podobě tenkého kruhového plechu je pevně zajištěn za pomoci šroubů a přírub nad otvor s přívodem hydraulické kapaliny (nejčastěji olej). Po těsném upnutí je do prostoru pod plechem přivedena hydraulická kapalina a za pomoci hydraulického agregátu je navyšován hydrostatický tlak, který je rovnoměrně rozložený a působí na spodní stranu plechu, čímž dochází k deformacím, k vyboulení a ztenčování plechu. Zkouška probíhá až do projevení prvních prasklin a úbytku sledovaného hydrostatického tlaku p [MPa] měřeného manometrem. Dále se zaznamenává výsledná výška vrchlíku (vyboulení) h [mm] a konečná tloušťka plechu t [mm]. V dnešní době lze využít soustav kamer pro snímání průběhu deformací v závislosti na tlaku. Naměřené hodnoty jsou dále využity pro numerické výpočty. [8], [11], [12]



Obr. 2.8 Znázornění principu bulge testu [12]

Tato zkouška je relativně jednoduchá, co se týče vyhodnocování výsledků, a oproti jiným technologickým zkouškám (např. Erichsen) přesnější. Díky využití kapaliny jako média se eliminuje vliv tření nástroje na zkušební vzorek, navíc dochází k rovnoměrnému rozložení zatěžovacího tlaku a tím i k rovnoměrnému ztenčování zkušebního vzorku. Výsledky testu umožňují sestavení křivky zpevnění. Nevýhodou může být relativně složité zařízení a v případě porušení zkušebního vzorku dochází k úniku hydraulické kapaliny a k znečištění zkušebního prostředí. Hydraulická kapalina se musí postupně doplňovat do zkušebního zařízení. Metoda bude použita v experimentální části, a proto zde následují základní výpočetní vzorce. [8], [11], [12]

Vnitřní napětí ve stěně testovaného vzorku je dáno vztahem:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p \cdot R_d}{2 \cdot t} \text{ [MPa]} \quad (2.19)$$

p [MPa] – hydrostatický tlak média (kapaliny)

R_d [mm] – poloměr zaoblení kopule (vrchlíku)

t [mm] – okamžitá tloušťka plechu

Okamžitá tloušťka plechu se vypočítá z rovnice

$$t = t_0 \cdot e^{\varphi_3} \text{ [mm]} \quad (2.20)$$

t_0 [mm] – počáteční tloušťka vzorku

φ_3 [-] – logaritmická deformace ve směru tloušťky

Vzhledem k ekvivalentnímu napětí hlavního σ_1 a vedlejšího napětí σ_2 se zavádí intenzita napětí σ_i a obdobně i intenzita deformací φ_i .

$$\sigma_i = \sigma_1 - \frac{p}{2} \text{ [mm]} \quad (2.21)$$

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{12}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2} = \varphi_3 [1] \quad (2.22)$$

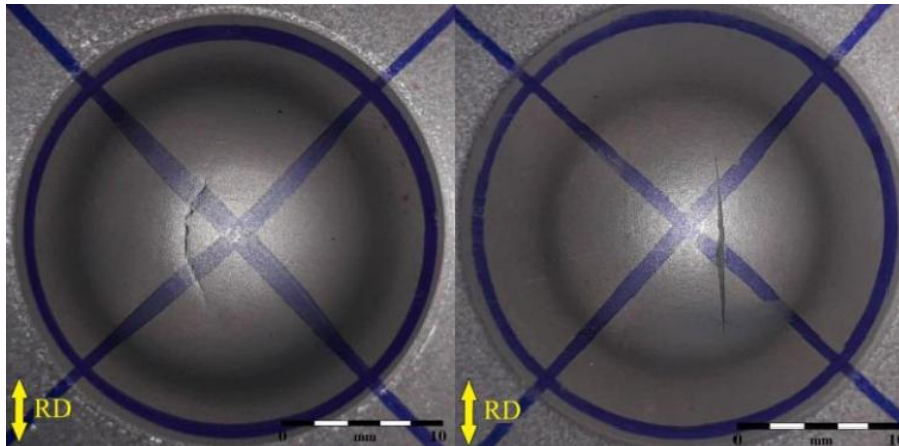
φ_1 [-] – hlavní deformace v ploše vzorku

φ_2 [-] – vedlejší deformace v ploše vzorku

φ_3 [-] – deformace ve směru tloušťky

2.2.2. Zkouška hloubení podle Erichsena

Patří k nejzákladnějším technologickým zkouškám pro vyhodnocování tvářitelnosti plechů a popisuje ji norma ISO 20 482. Princip zkoušky spočívá v upnutí zkušební vzorku (plechový čtverec o rozměrech 90 x 90 mm) mezi tažnici a přidržovač, následně tažník (konec má tvar koule o průměru 20 mm) se začne plynule pohybovat směrem do zkušební vzorku, kdy tažník je posouván za pomoci hydraulického pístu či mechanickým šroubem. Zkouška končí v momentě vytvoření trhliny na (vrchlíku) zkušebním vzorku v celé jeho tloušťce. Podle typu a tvaru trhliny se vyhodnocuje, zdali je materiál vhodný pro hluboké tváření (viz obr. 2.9). Je-li trhlina ve směru radiálním, jedná se o nevhodný materiál, pokud je trhlina v podobě kulovitého tvaru, materiál je vhodný pro hluboké tažení. [2], [12]

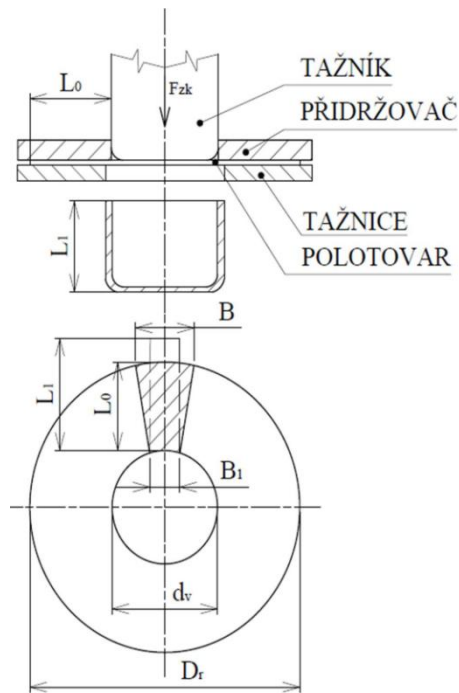


Obr. 2.9 Typy trhlin po Erichsenově zkoušce, vlevo vhodný materiál, vpravo nevhodný materiál pro hluboké tažení [13]

Kromě typu trhlin se vyhodnocuje a měří hodnota hloubka vrchlíku h , která odpovídá délce dráhy tažníku od prvního dotyku se zkušebním materiálem do vzniku trhliny. Hloubka h se uvádí s využitím tzv. Erichsenova čísla IE. Výhodou této zkoušky je její jednoduchost, rychlost průběhu i rychlost přípravy vzorku. Mezi nevýhody patří fakt, že zkouška neumožňuje vyhodnotit mechanické vlastnosti či anizotropii. S využitím dalších měřících nástrojů (optické kamery) lze z této zkoušky vyhodnotit i mechanické vlastnosti, avšak nedosahuje se přesnosti jako v případě bulge testu.[8], [12]

2.2.3. Kalíškovací zkouška

Těž často označována jako Schmiedtova zkouška nebo známá pod zkratkou AEG. Cílem této zkoušky je zjistit maximální hodnotu stupně tažení K [1], což odpovídá převrácené hodnotě součinitele tažení m [1]. Při zkoušce se hledá maximální průměr přístříhu, ze které lze možné získat válcový kalíšek bez porušení (trhliny). Výhodou této technologické zkoušky je podobnost výroby výtažků v praxi. Navíc ze zkoušky lze určit snadno anizotropie mechanických vlastností, jelikož na výtažku vzniká tzv. „cípavost“, kdy se podle výšky cípů určuje anizotropie pro hliníkové plechy. Nevýhodou je časová náročnost, neboť zkouška probíhá do té doby a opakuje se, než z experimentu získáme určitou maximální hodnotu průměru přístříhu, kdy nedojde k porušení. [2], [12]



Obr. 2.10 Schéma kalíškovací zkoušky [12]

2.3. Tvářitelnost a přetvárné odpory

Mezi jednu z nejdůležitějších vlastností pro tváření kovů patří tvářitelnost materiálu, která popisuje schopnost materiálu se plasticky deformovat za určitých podmínek v mezích plastičnosti až do krajních hodnot (do porušení soudržnosti, vzniku lomu). Tvářitelnost závisí mimo plastičnosti i na geometrii tvářeného tělesa a na podmínkách tváření, jako je samotná výrobní technologie, teplota výrobku, deformační rychlost apod. [14], [15]

2.3.1. Deformační odpor

Je vnitřní napětí, které vzniká v materiálu jako reakce na působící vnější tvářecí síly. Pro stálé tvoření plastických deformací je zapotřebí, aby skutečné napětí v tělese vyvolané působením vnějších sil bylo vždy větší, než výsledný deformační odpor. Deformační odpor, značený σ_d [MPa], je odvozen od přirozeného deformačního odporu σ_p [MPa], je však vyšší o vliv přidavných odporů (deformační tření, stav napjatosti, atd.), které jsou dány konkrétní technologií výroby. [14], [15]

Přirozený deformační odpor je vlastnost materiálu, která představuje nejmenší napětí nutné k vyvolání plastické deformace za určitých smluvních podmínek. Stanovuje se v lineárním stavu napjatosti (jednoosý stav) nejčastěji tahovou zkouškou za pomoci následujícího vztahu (2.23). [14], [15]

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \text{ [MPa]} \quad (2.23)$$

V případě tahové zkoušky jsou napětí následující: $\sigma_1 = R_e$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = 0$, z čehož plyne že $\sigma_p = R_e$

2.3.2. Činitelé ovlivňující tvářitelnost

Chemické složení definuje zastoupení jednotlivých chemických prvků v materiálu, které se podílejí na stavbě a tvoření krystalografické struktury, čímž nepřímo ovlivňují průběh deformací (tváření). Doprovodné prvky (legury) v oceli lze rozdělit na škodlivé (nečistoty) a prospěšné. Mezi škodlivé prvky patří například dusík – N, který může za určitých podmínek vytvářet nitridy na hranicích zrn v kluzných rovinách a tím zablokovat dislokace potřebné pro deformaci. Dochází ke změně a přiblížení hodnoty meze kluzu ke stálé mezi pevnosti, to vede k zmenšení oblasti plastických deformací (zásoba plasticity). Tento jev se nazývá stárnutí ocelí. Další škodlivé prvky jsou síra – S, která se slučuje s železem a ve formě sulfidu zhoršuje houževnatost a svařitelnost ocelí, poté například kyslík – O, vodík – H, fosfor – P. [16]

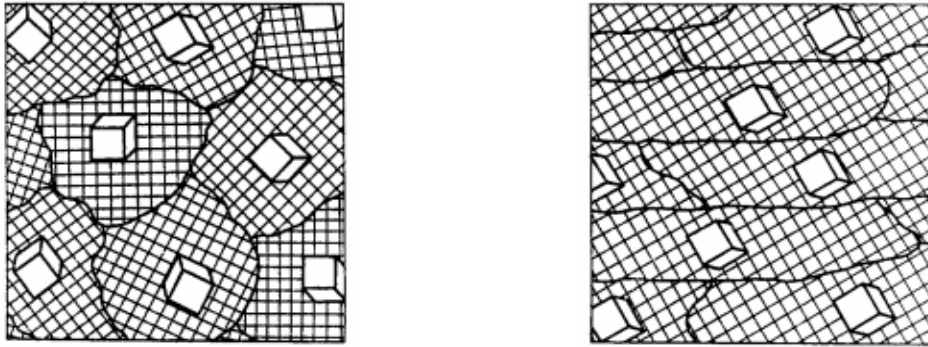
Do prospěšných prvků patří například mangan – Mn, hliník – Al, křemík – Si. Tyto prvky mají vysokou afinitu s dusíkem a vytvářejí s dusíkem nitridy, čímž zabráňují reakci a tvorbě nitridu se železem. Dalšími prospěšnými prvky jsou titan – Ti, zirkon – Zr, vanad – V, niob – Nb. Vzhledem k nespočetnosti kombinací chemického složení a zastoupení jednotlivých prvků, kdy dochází k vzájemným reakcím, se používají zpravidla osvědčené oceli pro tváření, které byly experimentálně otestovány mechanickými či technologickými zkouškami. [16]

2.3.2.1. Anizotropie

Anizotropie u kovů vyjadřuje závislost mechanických a fyzikálních vlastností na určitém směru. Je zapotřebí brát anizotropii na zřetel, jelikož v praxi i zdánlivě správně navržený výrobek může selhat vlivem změny směru zatěžování, ve kterém výrobek dosahuje horších mechanických a pevnostních hodnot. Obecně anizotropie je způsobena vlivem nehomogenního materiálu, kdy i nejčistější slitiny z hlediska mikrostruktury obsahují nerovnoměrně rozmístěné vměstky, mají různé velikosti zrn, dochází k segregaci různých chemických prvků. Anizotropie je ovlivněna i například technologií procesu výroby apod. Anizotropie se dělí na plošnou a normálovou anizotropii. [12], [15], [17]

Plošná anizotropie

Popisuje změnu mechanických a fyzikálních vlastností v rovině plechu, která vzniká při výrobě plechů technologií válcováním nebo tažením. Vlivem tváření dochází k redistribuci vměstků, kdy se tvárné vměstky zploští a protahují a spolu s netvárnými vměstky se orientují ve směru válcování nebo tažení. Vytváří se tzv. řádkovitá (pásková, vláknitá) struktura. Při mechanickém zkoušení dosahuje nejlepších hodnot vzorek namáhaný ve stejném (vodorovném) směru jako byl směr válcování, a naopak má nejhorší výsledky vzorek ve směru kolmém na směr válcování. Pro tahovou zkoušku se zpravidla odebírají tři zkušební ploché tyče ze středu tabule plechu pod úhly 0° , 45° a 90° vzhledem ke směru válcování. Hodnota plošné anizotropie se spočítá ze vztahu (2.24). [12], [15], [17]



Obr. 2.11 Schéma textury před (vlevo) deformací a po (vpravo) deformaci [15]

$$A_{Rp0,2} = \frac{R_{p0,2}(\alpha) - R_{p0,2}(0^0)}{R_{p0,2}(0^0)} [-] \quad (2.24)$$

$A_{Rp0,2}$ – anizotropie smluvní meze kluzu

$R_{p0,2}(\alpha)$ – smluvní mez kluzu vzorku, zatěžovaného ve směru α

$R_{p0,2}(0^0)$ – smluvní mez kluzu vzorku, zatěžovaného ve směru 0°

Normálová (plastická) anizotropie

Popisuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu oproti mechanickým vlastnostem ve směru tloušťky, tedy vyjadřuje náchylnost ke změně tloušťky plechu. Čím větší hodnota součinitele plastické anizotropie, tím vhodnější je materiál pro hluboké tažení a celkově má i vyšší tvářitelnost. Obdobně jako u plošné anizotropie se odebírají z tabule plechu tři vzorky pod úhly 0°, 45° a 90° vzhledem ke směru tažení (válcování) Součinitel plastické anizotropie se vypočítá z následujícího vztahu (2.25). [12], [15], [17]

$$r_{\alpha} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{B_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}} = \frac{\ln \frac{B_0}{b}}{\ln \frac{b \cdot l}{B_0 \cdot L_0}} [-] \quad (2.25)$$

φ_b [-] – skutečná deformace ve směru šířky zkušební tyče

φ_s [-] – skutečná deformace ve směru tloušťky zkušební tyče

B_0 [mm] – šířka zkušební tyče před zkouškou

b [mm] – šířka zkušební tyče po zkoušce

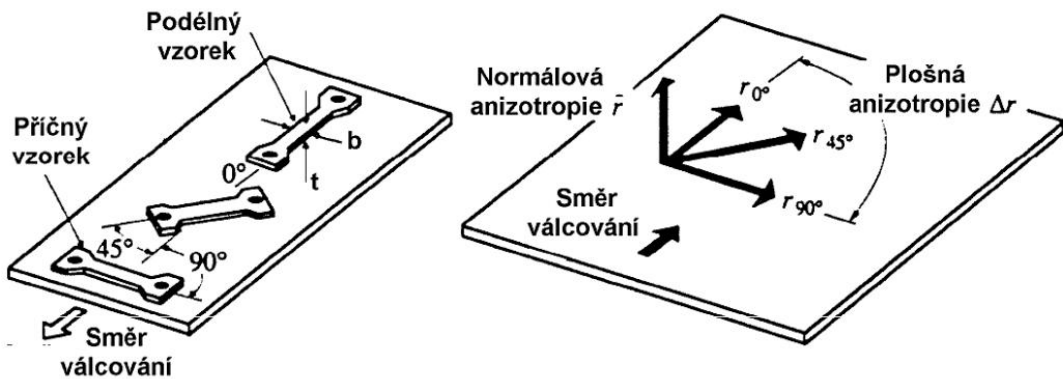
s_0 [mm²] – plocha průřezu zkušební tyče před zkouškou

s [mm²] – plocha průřezu zkušební tyče po zkoušce

l [mm] – délka zkušební tyče po zkoušce

Podle střední hodnoty (vážený průměr) součinitele plastické anizotropie \bar{r} se určuje, zdali je materiál vhodný z hlediska tvářitelnosti.

$$\bar{r} = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) [-] \quad (2.26)$$



Obr. 2.12 Znáznornění odběru vzorků pro zkoumání anizotropie [17]

2.3.2.2. Exponent deformačního zpevnění

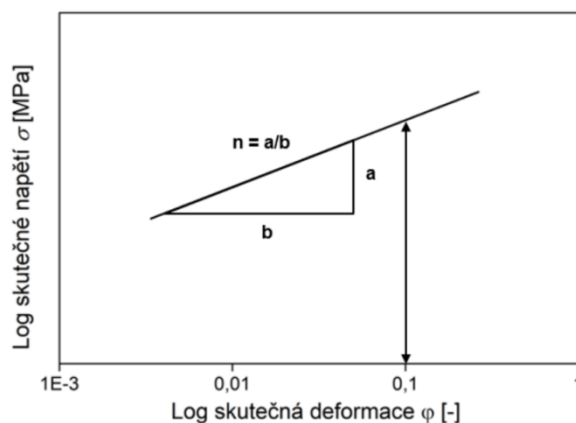
Je materiálová konstanta značená n popisující intenzitu zpevňování materiálu v průběhu plastických deformací. Čím vyšší exponent, tím dochází k většímu zpevnění při tváření. Hodnota exponentu je vždy menší než jedna a lze ho stanovit například z tahové zkoušky. Matematicky lze exponent vyjádřit ze závislosti intenzity skutečných napětí σ_i [MPa] na intenzitě skutečných deformací φ_i [-]. Následuje jedna z mnohých funkcí, ze které lze stanovit hodnot exponentu. Jedná se o mocninovou aproximaci a funkci nazývanou Ludwig-Hollomonův exponenciální vztah (2.27). [12], [17]

$$\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n \text{ [MPa]} \quad (2.27)$$

Kde C je koeficient monotónního zpevnění [MPa] a představuje napětí odpovídající přetvoření $\varphi = 1$. Po úpravě zlogaritmování vztahu (2.27) lze získat tuto lineární závislost (2.28).

$$\log \sigma_i = \log C + n \cdot \log \varphi_i \text{ [MPa]} \quad (2.28)$$

V těchto logaritmických souřadnicích je exponent deformačního zpevnění definován jako směrnice přímky, viz obr. 2.13.



Obr. 2.13 Znázornění exponentu deformačního zpevnění [9]

2.3.3. Křivka zpevnění

Patří mezi nejčastější podklady pro stanovení plastických vlastností materiálů. Znalost zpevňovacích křivek umožňuje praktické určení přirozených odporů při tváření, což je potřebné pro výpočet tvářecích sil a tím obecně řeší energetickou bilanci výroby. Zároveň graficky popisuje schopnost řídit změnu mechanických vlastností materiálu za pomoci deformace (tváření). Nutno dodat, že křivka zpevnění je materiálovou charakteristikou konkrétního materiálu a je ovlivněna předchozími operacemi (stupeň tváření, tepelné zpracování, stáří ocele, apod.). [14]

Křivka je popsána v diagramu skutečné napětí – skutečné (logaritmické) přetvoření. Lze jí relativně snadno získat z naměřených dat z tahové zkoušky pro jednoosou napjatost, ovšem je platná pouze do meze pevnosti (změna z jednoosé napjatosti na nerovnoměrnou trojosou napjatost). Stanovení křivky zpevnění pro více osou napjatost není zcela jednoduché a existuje značné množství publikací na toto téma, obzvláště co se týče analytických postupů, které v některých případech nemusí být dostačující pro výpočet. V dnešní moderní době s rostoucím důrazem na výpočetní techniku se více a více využívají numerické simulace, konkrétně metoda konečných prvků MKP (anglicky FEM), která patří k nejpoužívanějším a nachází uplatnění v různých oblastech strojírenství a ostatních technických odvětví. [14], [18]

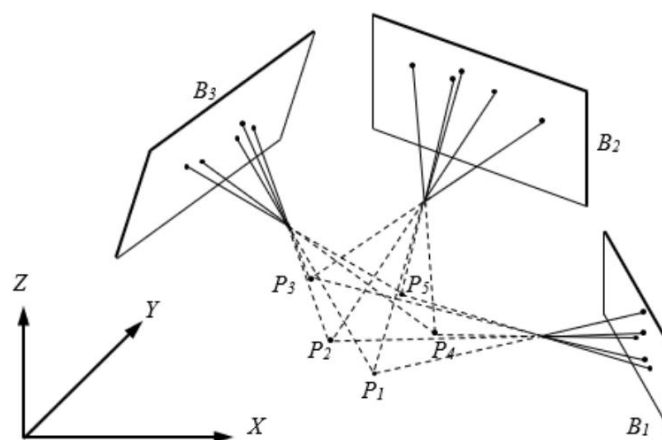
Iterační metoda (MKP) spočívá ve vytvoření deformační sítě, složené z trojúhelníkových nebo čtvercových prvků tvořeny uzlovými body, jejichž deformace a napětí jsou přepočítávány s každou další iterací až do finální polohy prvku. Tato metoda vyžaduje řadu materiálových dat (hodnoty, vlastnosti), které se získají z mechanických nebo technologických zkoušek. [18]

2.4. Fotogrammetrie

Je vědní obor, který se zabývá měřením a určování polohy předmětů z fotografických snímků. Metoda spočívá v odvození tvaru předmětu a jeho vzdálenosti od objektivu za pomoci využití minimálně dvou nebo více fotografií měřeného objektu. Jedná se o velmi rozsáhlý obor, na jehož uplatnění lze narazit v různých oblastech každodenního života. Největší zastoupení má v geografii, především v tvorbě map, nebo v geodetických zaměřeních, kde jsou z hlediska fotogrammetrie posuzovány satelitní, letecké nebo i pozemní snímky. Uplatnění nachází dále i například ve strojírenství, stavebnictví, kriminalistice (forenzní vyšetřování), archeologii, medicíně (rentgenové snímky, zubní chirurgie) atd. Velmi důležitá je kvalita snímků, kdy vlivem například špatného kontrastu, rozostření, ale i například prostředím před objektivem (vzduch - sklo), může dojít ke ztrátě informací v podobě zkreslení, a tím i k nepřesnosti měření. Proto je důležité zohlednit prvky ovlivňující kvalitu fotografie, jako je zdroj světla, vlastnosti povrchu, látkové prostředí, kamera, uložení a komprese snímku v hardwaru, apod. [19]

2.4.1. Princip fotogrammetrie

Jedná se v podstatě o rekonstrukci trojrozměrného objektu v digitální nebo grafické podobě. Polohu bodu v trojrozměrném prostoru lze určit pomocí triangulace svazků z pozorovaných paprsků odrazů světla. Triangulace spočívá v trigonometrickém výpočtu souřadnic a vzdáleností. Z pohledu více rovin obrazů (kamer) a při známé prostorové orientaci každého svazku paprsků v souřadném systému objektu lze z průniku paprsků zjistit souřadnice trojrozměrného objektu. [19]



Obr. 2.14 Zjišťování souřadnic bodů P_i s využitím triangulace svazků viditelných z různých rovin obrazů B_i

[20]

2.4.2. Fotogrammetrie ve strojírenství

Ve strojírenství se používá pro již zmíněné měření deformací, dále pro monitorování montáže velkých rozměrů, bezpečnostní testy automobilů (crash testy), kalibrace a sledování pohybu robotů, optické měření tvarů apod. V oblasti tváření kovů fotogrammetrie umožňuje měření deformací. Naměřená data se využívají v simulacích, které poté slouží k vytvoření deformačního modelu, což urychluje výrobu. Existuje mnoho bezkontaktních optických 3D systémů, patří mezi ně například ARAMIS od firmy GOM, časté jsou také systémy PONTOS a ARGUS od stejné firmy. V experimentální části byl použit systém MercuryPro od firmy Sobriety. [20], [21]

MercuryPro

Měření deformací je prováděno za pomoci dvou snímacích kamer typu CMOS nebo CCD s přídatným zdrojem světla pro dobrou kvalitu snímku. Před snímáním vzorku je zapotřebí vytvořit na zkušebním vzorku kontrastní nástřík (deformační síť), který rozděluje zkoumanou oblast na menší podoblasti, nazývané fazetky. Podle stupně šedi (bílá, šedá, černá) kamera snímá jednotlivé pixely. V průběhu zkoušky se zaznamenává posuv jednotlivých bodů na vytvořené deformační síti. Výsledkem snímání je mapa rozložení deformací, která je znázorněna v podobě barevné škály. Lze měřit deformace vzorku v řádech několika milimetrů až několik metrů. Kamery nemají automatické zaostření, proto je potřeba je po namontování a namíření na zkušební vzorek následně kalibrovat za pomoci kalibrační destičky (nebo kalibračního kříže). Kalibrační objekt je vložen před kamery a podle pokynu měřicího systému se s ním pohybuje, dokud nedojde ke k zaostření kamer. [21]

3. Experimentální část

Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo analyzovat a zhodnotit výsledky z biaxiálních zatěžovacích zkoušek plechového materiálu HX260BD+Z100 MB, konkrétně provést experimentální měření v podobě bulge testu a rovinného zatěžování plechového kříže, s následným stanovením výsledných hodnot a vzájemného porovnání naměřených hodnot i srovnání průběhu jednotlivých zkoušek. Hlavním cílem zkoušek bylo určení koeficientu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n . Pro zjištění základních materiálových charakteristik byla provedena statická zkouška tahem, jejíž výsledky pomohly analyzovat a porovnat provedené biaxiální zkoušky. Data z tahové zkoušky byly využita i při softwarové simulaci, která umožnila stanovit výsledek z rovinného namáhání kříže. Experiment probíhal v laboratořích Technické Univerzity v Liberci a probíhal v následujících po sobě jdoucích krocích.

- 1) Příprava zkušebních vzorků z daného materiálu pro tahovou zkoušku, bulge test a biaxiálního namáhání rovinného kříže.
- 2) Provedení tahové zkoušky. Stanovení základních hodnot materiálu. Přepočet pracovního diagramu na smluvní diagram a následně na diagram skutečných hodnot s využitím softwaru OriginPro9.
- 3) Příprava vzorků pro použití optického systému při bulge testu. Realizování bulge testu.
- 4) Příprava vzorků pro biaxiální namáhání rovinného kříže a následné provedení zkoušky.
- 5) Zpracování naměřených dat z předchozích zkoušek za pomoci softwaru OriginPro9. Vyhodnocení a porovnání zkoušek v podobě stanovení deformačních hodnot s pomocí aproximační funkce Swift-Krupowski. V případě získání hodnot z biaxiálního namáhání rovinného kříže byl použit simulační program PAM-STAMP 2G.

3.1 Zkušební materiál

Pro experimentální část byl zvolen testovaný materiál s označením HX260BD+Z100MB. Jedná se o válcovaný plech, určený pro tváření za studena, vykazující vysokou pevnost i mez kluzu při tváření. Pro zkoušku byl zvolen plech o tloušťce 1,3 mm. Další vlastnosti materiálu vyplývají z jeho označení a to podle normy DIN EN 10346. Značení za znaménkem plus se vztahuje k povrchové úpravě materiálu.

HX260BD+Z100MB

H – plochá ocel pro tváření za studena

X – nespecifikován způsob válcování (za studena nebo za tepla)

260 – hodnota minimální smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]

B – bakehardening ocel

D – určeno pro žárové pokovení

Z - pozinkováno

100 – hodnota minimální nanesené ochranné vrstvy (v tomto případě zinku) [g/m^2]

M – kvalita zinkové ochranné vrstvy

B – kvalita povrchu plechu

Tab. 3.1 Chemické složení oceli HX260BD

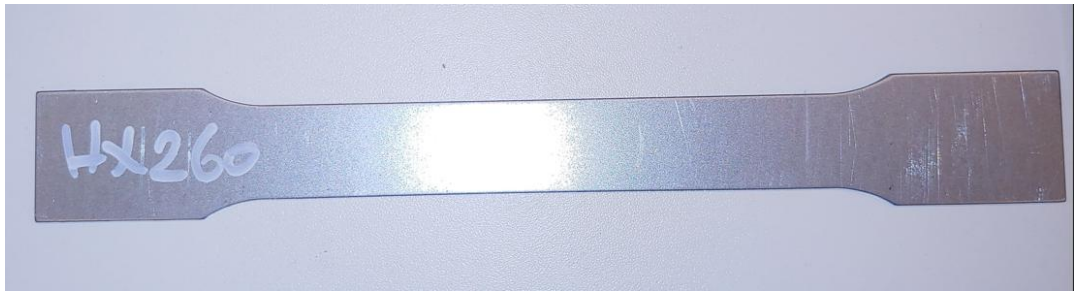
C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al
0,1%	0,5%	0,8%	0,1%	0,025%	0,09%	0,12%	0,1%

3.2 Statická zkouška tahem

Pro zjištění základních materiálových charakteristik byla zrealizována statická zkouška tahem, která je teoreticky popsána v předchozí kapitole 2.1.1. Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Protokoly ze zkoušky lze nalézt v příloze (příloha č. 1, 2 a 3).

3.2.1 Příprava zkušebních vzorků

Pro tahovou zkoušku byl zvolen obdélníkový průřez o rozměrech 1,3x20 mm. Ze zkušebního materiálu HX260BD+Z100MB o tloušťce 1,3 mm byly na elektrických tabulových nůžkách nastříhány dlouhé úzké pasy, ze kterých se na výstředníkovém lisu s upevněným nástrojem nastříhaly ploché zkušební vzorky. Pět vzorků bylo vystřiženo ve třech směrech vůči směru válcování, konkrétně 0°, 45° a 90°. Dohromady bylo pro tahovou zkoušku připraveno patnáct vzorků.



Obr. 3.1 zkušební vzorek pro tahovou zkoušku

3.2.2 Průběh měření

Zkouška probíhala na trhacím zařízení TIRA test 2300 v technologických laboratořích TU v Liberci. Parametry zkoušky byly předem stanoveny a nastaveny podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Všech patnáct zkušebních vzorků bylo jednotlivě a postupně upnuto vertikálně do hydraulických čelistí. Připevněný průtahoměr snímal prodloužení vzorku. Zkouška u jednotlivých vzorků byla automaticky ukončena ovládacím softwarem z připojeného počítače při poklesu zatěžovací síly o 40% vlivem porušení celistvosti vzorku.

3.2.3 Výsledky měření tahové zkoušky

Z výstupního pracovního diagramu, tj. závislost zatěžující síly na prodloužení zkušebního vzorku, se za pomoci softwaru LabNET spočítaly pro jednotlivé vzorky výsledné hodnoty smluvní meze pevnosti v tahu $R_{p0,2}$, meze pevnosti v tahu R_m , homogenní tažnost A_g , tažnost A_{80} , Youngův modul pružnosti E a součinitel normálové anizotropie r pro tři směry odběru vůči válcování. V následující tabulce (tab. 3.2) jsou souhrnně uvedeny průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami pro jednotlivé směry odebrání, i se střední hodnotou x_s pro změřené veličiny vypočítané podle vztahu (3.1).

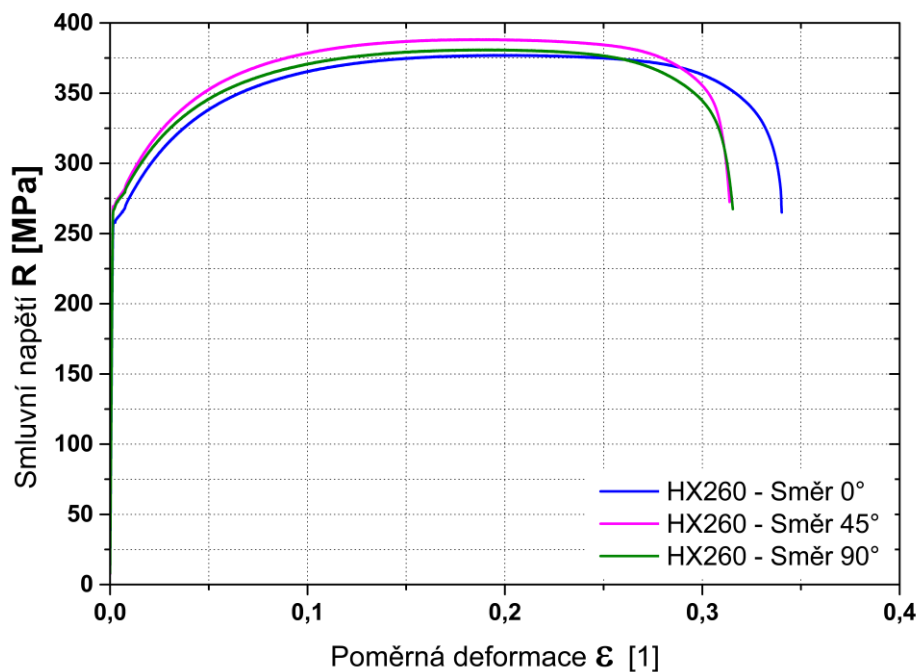
$$x_s = \frac{1}{4}(x_{0^\circ} + 2x_{45^\circ} + x_{90^\circ}) [1] \quad (3.1)$$

x_{0° , x_{45° , x_{90° - hodnoty veličin ve směru 0° , 45° a 90°

Tab. 3.2 Mechanické vlastnosti naměřené z tahové zkoušky tahem pro materiál HX260BD+Z100MB

Směr odebrání vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80} [%]	E [MPa]	r [1]
0°	261,6 ±1,3	377,5 ± 1,4	19,22 ± 0,18	33,76 ± 0,35	179898 ± 2705	1,466 ± 0,007
45°	273,3 ± 0,7	388,4 ± 0,9	18,38 ± 0,17	31,39 ± 0,34	196222 ± 4759	1,344 ± 0,010
90°	272,2 ± 0,6	381,2 ± 0,9	18,97 ± 0,22	31,42 ± 0,28	194418 ± 1401	1,827 ± 0,009
x_s	270,1 ± 5,275	383,875 ± 4,525	18,7375 ± 0,3521	31,99 ± 1,1102	191690 ± 7307,2	1,49525 ± 0,205

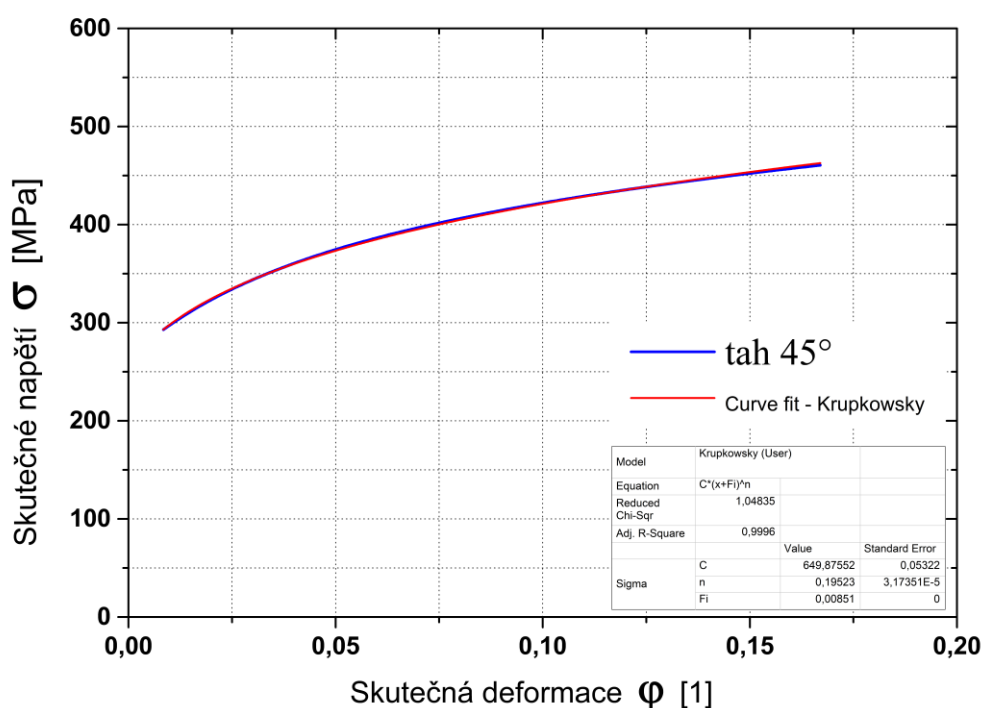
Vztahy určené pro přepočítání pracovního diagramu na smluvní diagram, tj. smluvní napětí R (2.1) a poměrné prodloužení ε (2.2), jsou zmíněné v úvodní kapitole 2.1.1. V programu OriginPro9 byla zpracována naměřená data, ze kterých byly vyexportovány smluvní diagramy tahové zkoušky pro tři směry vůči směru válcování (viz následující obr. 3.2).



Obr. 3.2 Porovnání smluvních diagramů tahové zkoušky pro materiál HB260BD+Z100MB, odebrané ve třech směrech vůči směru válcování

Pro zjištění deformačního chování materiálu byl diagram opět za pomoci programu Origin převeden s využitím vztahů (2.11 a 2.13) na diagram skutečných hodnot. Díky použití matematické aproximace podle Swift-Krupowski byl zjištěn tvar aproximační křivky a hodnoty koeficientu monotónního zpevnění C a exponentu deformačního zpevnění n . Tato aproximace dosahuje přesnějších výsledku, než již uvedená aproximace podle Ludwig-Hollomona (2.27). Aproximační křivka podle Swift-Krupowského neprochází středem souřadného systému, ale protíná osu napětí a začátek křivky je stanoven ofsetovou deformací φ_0 [1]. Tvar použité aproximace:

$$\sigma = C \cdot (\varphi + \varphi_0)^n \text{ [MPa]} \quad (3.2)$$



Obr. 3.3 Příklad použití matematické funkce Swift-Krupowski pro stanovení aproximační křivky a zjištění koeficientu monotónního zpevnění, exponentu deformačního zpevnění a ofsetové deformace, konkrétně pro vzorek ze směru 45°. V tabulce jsou uvedené deformační hodnoty.

Tab. 3.3 Vypočítané deformační konstanty s využitím funkce Swift-Krupowski pro tři odebrané směry z tahové zkoušky.

Směr odebrání vzorku	C [MPa]	n [1]	φ_0 [1]
0°	639,991	0,20547	0,00921
45°	649,88	0,19523	0,00851
90°	633,744	0,19457	0,00967
x_s	643,3738 ± 6,643191	0,197625 ± 0,00499	0,008975 ± 0,000477

3.3 Bulge test

Cílem zkoušky bylo určit hodnotu koeficientu monotónního zpevnění a exponent deformačního zpevnění pro zkušební materiál. Při bulge testu je zkušební vzorek namáhán dvouosým, rovnoměrně rozloženým napětím vlivem narůstajícího hydrostatického tlaku kapaliny (oleje) působící na stěnu zkušební vzorku. Měření probíhalo s využitím optického systému MercuryPro, pracujícího na principu fotogrammetrie s příslušným softwarovým programem MercuryRT, který měřil a zpracovával hodnoty deformace. S využitím této technologie lze z bulge testu snadno stanovit materiálové charakteristiky. Na rozdíl od tahové zkoušky je zatěžování v bulge testu více podobné reálné průmyslové výrobě v praxi.

3.3.1 Příprava zkušební vzorku

Zkušebním vzorkem byl kruhovitý plech o průměru 210 mm a tloušťce 1,3 mm z materiálu HX260BD+Z100MB. Vzorky byly nastříhané nejprve za pomoci tabulových nůžek do pásů a následně na výstředníkovém lisu vystřižnuté do kruhového vzorku. Vzhledem k použití optického systému a fotogrammetrie, bylo potřeba na povrchu vzorku vytvořit kontrastní deformační síť, tzv. pattern, který umožní optickému systému snímat deformace (viz kapitola 2.4.2). Nejčastěji je pattern tvořen nástřikem dvou barev (bílá a černá). Před nástřikem byl vzorek odmaštěn a očištěn technickým benzínem a acetonem, kvůli zajištění přilnavosti barvy na vzorku. Na snímanou stranu vzorku byla rovnoměrně nanesená bílá akrylová barva, která kompletně překryla původní povrch materiálu. Na zaschlou bílou barvu byla následně nástřikána černá akrylová barva, která na bílém podkladu vytvořila v podobě černých kapek požadovaný pattern. Po zaschnutí černé barvy byl vzorek připraven na měření. Nanášení deformační sítě (patternu) by mělo probíhat těsně před samotným bulge testem, aby vlivem nadměrného vysychání barev nedošlo k odlomení barvy při deformaci vzorku.



Obr. 3.4 Zkušební vzorek v podobě kruhovitého plechu s naneseným bílo-černým patternem před bulge testem

3.3.2 Příprava optického systému

Nad upevněný zkušební vzorek ve zkušebním zařízení byl nainstalován optický systém MercuryPro v podobě dvou kamer CMOS a světelného zdroje. Optickými kabely byl zajištěn přenos z kamer do notebooku, kde se zaznamenávají a vyhodnocují naměřená data deformací v softwarovém programu MercuryRTx69.29. Kamery byly zaostřeny kalibrační destičkou, která byla nasnímaná z různých vzdáleností a z různých úhlů podle pokynů softwaru. Mezi optický systém a zkušební vzorek bylo umístěno ochranné sklo, které zabraňuje znečištění kamer po úniku oleje z porušeného vzorku na konci bulge testu.



Obr. 3.5 Detailní záběr nainstalovaného optického systému nad zkušebním vzorkem, v dolní části se nachází ochranné sklo

3.3.4 Průběh měření

Měření probíhalo na dvojčinném hydraulickém lise CBA 300/63. Zkušební vzorek byl umístěn do přípravku a pevně zajištěn přídržovačem nad přívod oleje. Hydrostatický tlak oleje byl generován připojeným hydraulickým agregátem. Agregát byl ovládán připojeným notebookem, který zároveň snímal hodnotu tlaku z manometru umístěného v přípravku. Hodnoty tlaku byly následně posílány do notebooku sledující deformace optickým systémem s frekvencí 2 Hz a v programu MercuryRT se zaznamenával průběh zkoušky. Výstupem této zkoušky byly hodnoty deformace závislé na tlaku. Dohromady byly testovány tři vzorky.



Obr. 3.6 Hydraulický lis CBA 300/63 s připojeným optickým systémem a připevněným zkušebním vzorkem. Bližší notebook ovládal hydraulický agregát a posílal data o tlaku do vzdálenějšího notebooku, který snímal skrze optický systém deformace a vyhodnocoval průběh zkoušky.

Parametry zkoušky byly nastaveny následovně. Rychlost nárůstu tlaku byla 0,05 MPa/s. Po každém nárůstu o 0,5 MPa došlo k pozastavení hydraulického agregátu a výdrže 5s při konstantním tlaku. Výdrže byly uskutečněny z důvodu relaxace napětí a ustálení deformací vzorku, čímž se dosáhlo přesnějších výsledků. Zkouška skončila v momentě porušení vzorku, a tím způsobeným poklesem hydrostatického tlaku oleje.



Obr. 3.7 Zkušební vzorek po konci bulge testu

3.3.5 Výsledky bulge testu

Pro stanovení koeficientu monotónního zpevnění a exponentu deformačního zpevnění, tedy parametrů pro popis křivky zpevnění, bylo zapotřebí zjistit skutečné napětí a skutečné deformace. Vzhledem k ekvivalentnímu hlavnímu a vedlejšímu napětí se určovala intenzita napětí a intenzita deformace. Pro výpočet byly použité vztahy zmíněné v kapitole 2.2.1, pro přehlednost jsou zde uvedené znovu.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p \cdot R_d}{2 \cdot t} \text{ [MPa]} \quad (2.19)$$

$$t = t_0 \cdot e^{\varphi_3} \text{ [mm]} \quad (2.20)$$

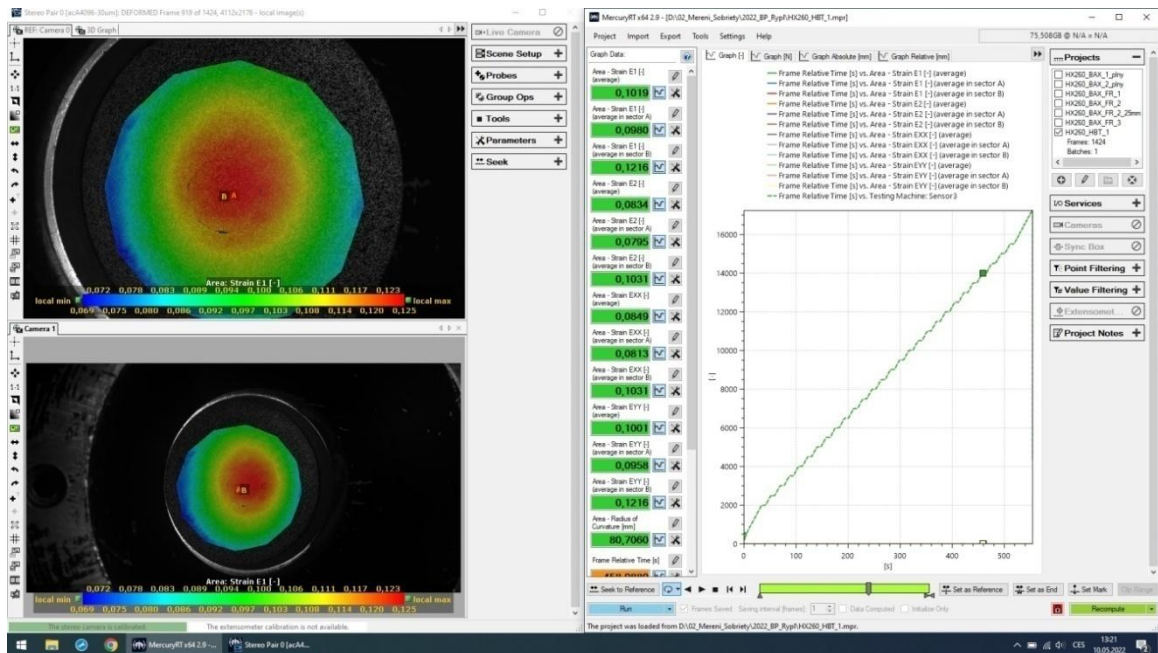
$$\sigma_i = \sigma_1 \cdot \frac{p}{2} \text{ [mm]} \quad (2.21)$$

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{12}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_2^2 + \varphi_1 \cdot \varphi_2} \text{ [1]} \quad (2.22)$$

Upravený tvar zákona o zachování objemu, určený pro výpočet φ_3 a výpočtu aktuální tloušťky plechu.

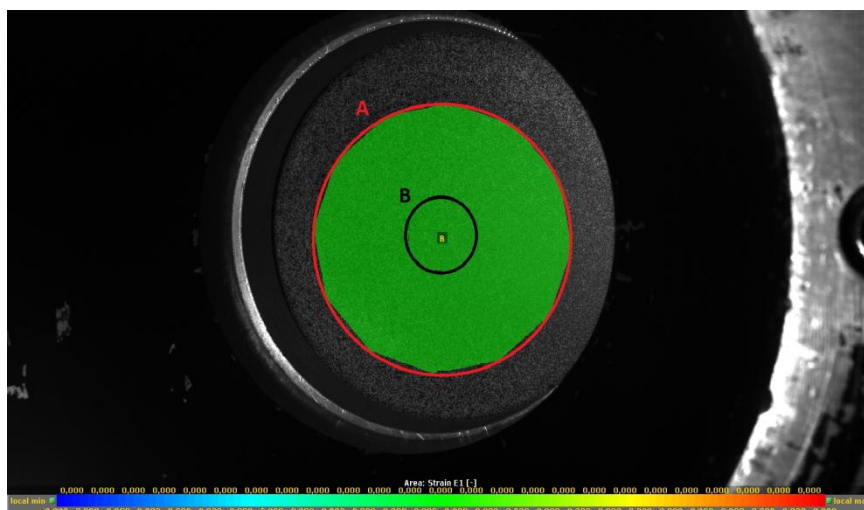
$$\varphi_3 = -\varphi_2 - \varphi_1 \text{ [1]} \quad (3.3)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že pro určení koeficientu monotónního zpevnění a exponentu deformačního zpevnění podle matematické funkce Swift-Krupowski bylo potřeba určit tři veličiny (hydrostatický tlak P , poloměr zakřivení vrchlíku R_d a deformace $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$). Hodnoty tlaku byly lehce zjištěny z manometru umístěného pod zkušební vzorkem. Pro zjištění deformací a poloměru zakřivení vrchlíku byl použit program MercuryPT, který zaznamenával hodnoty deformací v závislosti na tlaku pomocí optického systému s využitím fotogrammetrie.

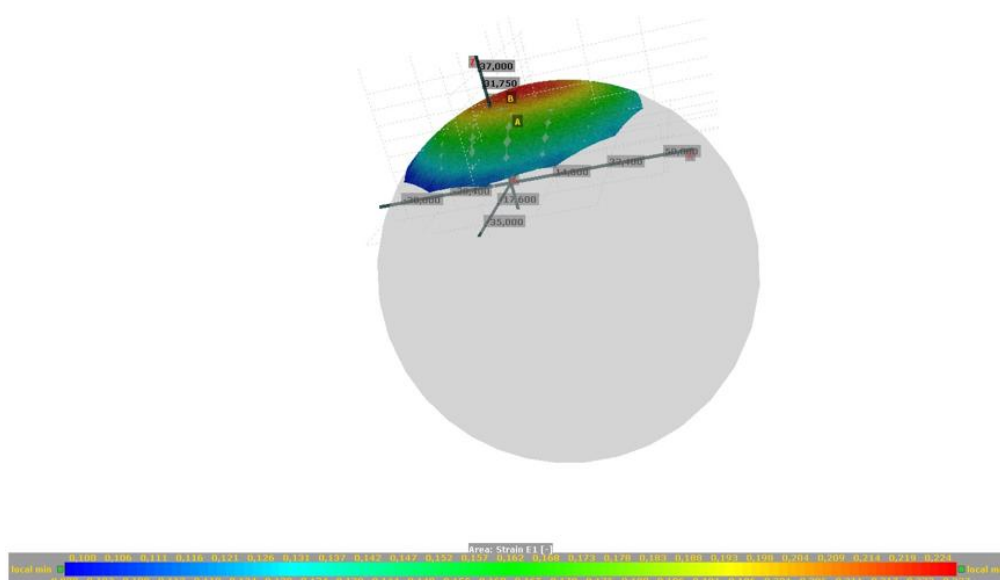


Obr. 3.7 Pracovní prostředí programu MercuryPTx69.29 v náhodném čase v průběhu zkoušky. Vlevo jsou umístěny snímky z kamer, barevná škála reprezentuje hodnoty deformací. Vpravo je grafické znázornění závislosti tlaku na čase. Uprostřed v zelených obdélnících jsou aktuální naměřené hodnoty.

Z úplně prvního snímku, ještě před začátkem zkoušky, bylo v programu MercuryPT zapotřebí určit zkoumanou oblast A, tzv. masku, na které probíhal následný výpočet deformací. Na obrázcích je maska vyznačená barevně (viz obr. 3.8). Dále byla vytvořena menší maska B, vytyčující vrchol vrchlíku a zároveň překrývající oblast A. Z větší oblasti A se díky většímu počtu naměřených hodnot lépe použije funkce best-fitu na kouli, teda proložení masky A na vrch koule – vytvoření 3D vrchlíku v prostředí programu MercuryPT, ze kterého se určí poloměr vrchlíku (viz obr. 3.9). Menší oblast B sloužila pro zjištění hodnot hlavní a vedlejší deformace na vrcholu vyboulení a naměřená data byla použita pro výpočet aktuální tloušťky vzorku.

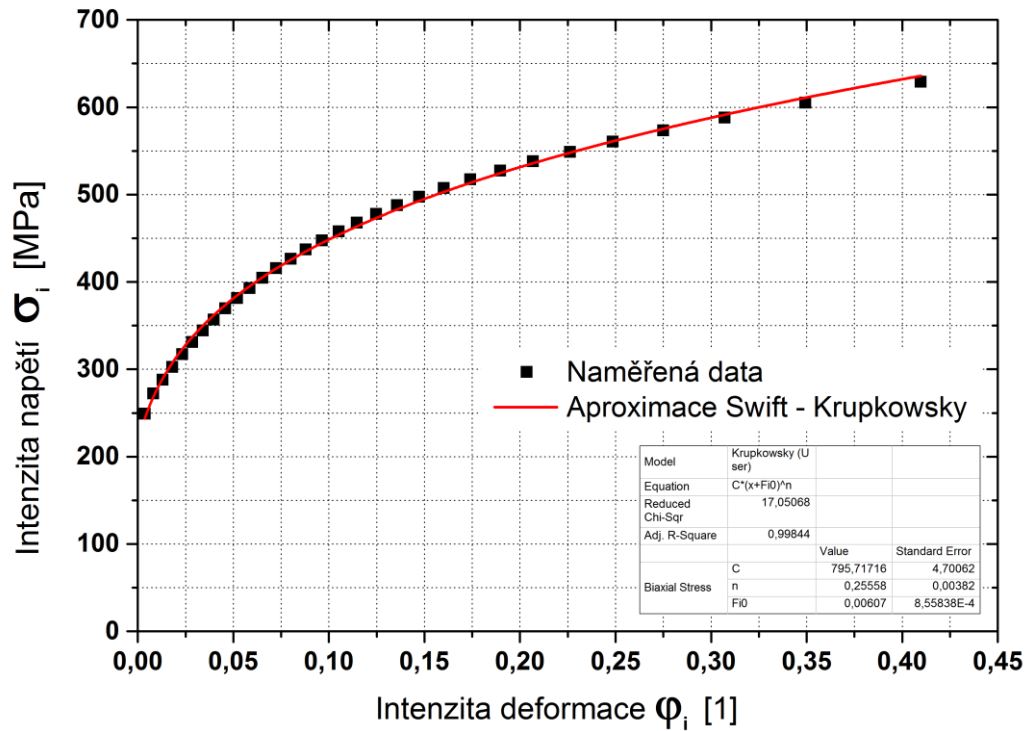


Obr. 3.8 Úvodní snímek pořízený před začátkem zkoušky v prostředí programu MercuryRT. Zelená oblast je celá zkoumaná oblast vzorku a odpovídá nulové hodnotě deformací. Červeně je ohraničena maska A, vně je černě ohraničená oblast B.



Obr. 3.9 Best-fit na kouli, proložení masky A z konce zkoušky na povrch koule s využitím programu MercuryRT. Způsob určení poloměru zakřivení.

Získané hodnoty z programu MercuryRT byly následně zpracovány v programu Origin Pro 9, kde skrze využití aproximační funkce Swift-Krupowski (vztah 3.2) byly vyexportovány křivky zpevnění s hodnotou koeficientu monotónního zpevnění a exponentu deformačního zpevnění.



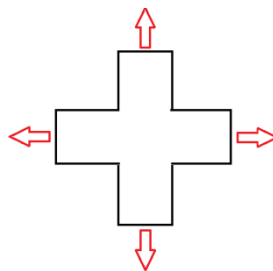
Obr. 3.10 Příklad využití funkce Swift-Krupowski pro stanovení křivky zpevnění a zjištění hodnot koeficientu monotónního zpevnění a exponentu deformačního zpevnění z bulge testu pro materiál HX260BD+Z100MP.

Tab. 3.4 Vypočítané deformační konstanty s využitím funkce Swift-Krupowski pro tři vzorky z bulge testu.

Číslo měření	C [MPa]	n [1]	ϕ_0 [1]
1. vzorek	812,57	0,2663	0,00772
2. vzorek	784,863	0,2543	0,00594
3. vzorek	795,717	0,2556	0,00607
x_s	794,504 ± 11,39937	0,2556 ± 11,39937	0,006418 ± 0,00081

3.4 Biaxiální namáhání rovinného kříže

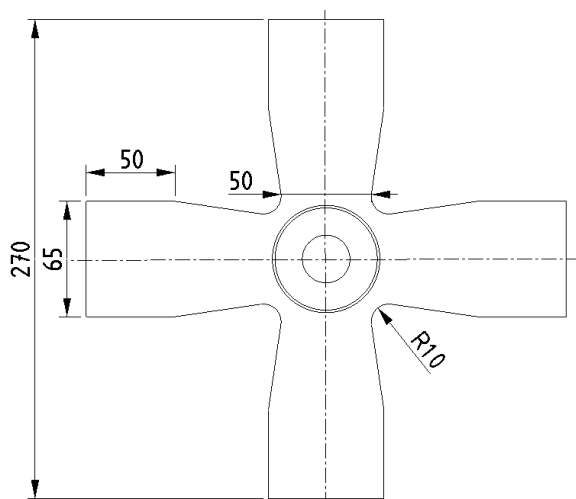
Oproti bulge testu se jedná o méně známou a používanou metodu pro určování materiálových charakteristik při biaxiálním zatěžování. Cílem této zkoušky bylo dané charakteristiky (konkrétně koeficient monotónního zpevnění, exponent deformačního zpevnění a ofsetovou deformaci) zjistit a následně porovnat výsledky a postup vyhodnocování s více používanou metodou bulge testu. Principiálně se jedná o jednoduchou a rychlou zkoušku, kdy je zkušební vzorek namáhán rovnoměrně rozloženým dvouosým tahovým napětím. Pro měření deformací byl opět využit optický systém MercuryPro.



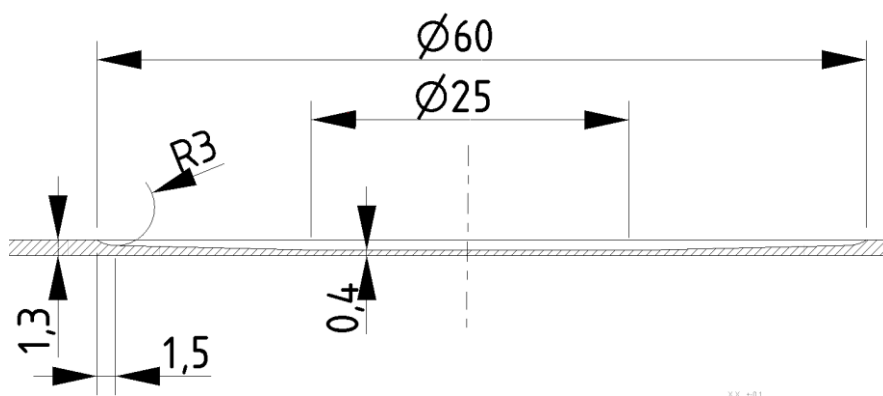
Obr. 3.11 Schéma biaxiálního namáhání rovinného kříže

3.4.1 Příprava měření

Zkušební vzorek v podobě plechového kříže o tloušťce 1,3 mm (viz obr. 3.12) z materiálu HB260BD+Z100MB byl zhotoven za pomoci laserového řezání, následně byl vzorek upraven odebráním materiálu frézováním ze středu kříže a zmenšení tloušťky vzorku v dané oblasti na 0,4 mm (viz obr. 3.13). Odebrání materiálu bylo z důvodu docílení soustředění deformací ve středu vzorku, kde právě dochází k biaxiálnímu namáhání. Pokud by nebyl vzorek ve středu oslaben, deformace by probíhaly převážně v ramenech kříže, kde by se jednalo pouze o jednoosé namáhání. Po nainstalování optického systému nad polohu zkušební vzorku v zkušebním zařízení byly kamery zkalibrovány (zaostřeny) pomocí kalibrační destičky. Nakonec byla na vzorek, stejně jako v případě bulge testu (kapitola 3.3.1), nanesena deformační síť (pattern) nastříkáním bílé a černé akrylové barvy. Připraveny byly tři zkušební vzorky.



Obr. 3.12 Rozměry zkušební vzorku pro biaxiální namáhání rovinného kříže



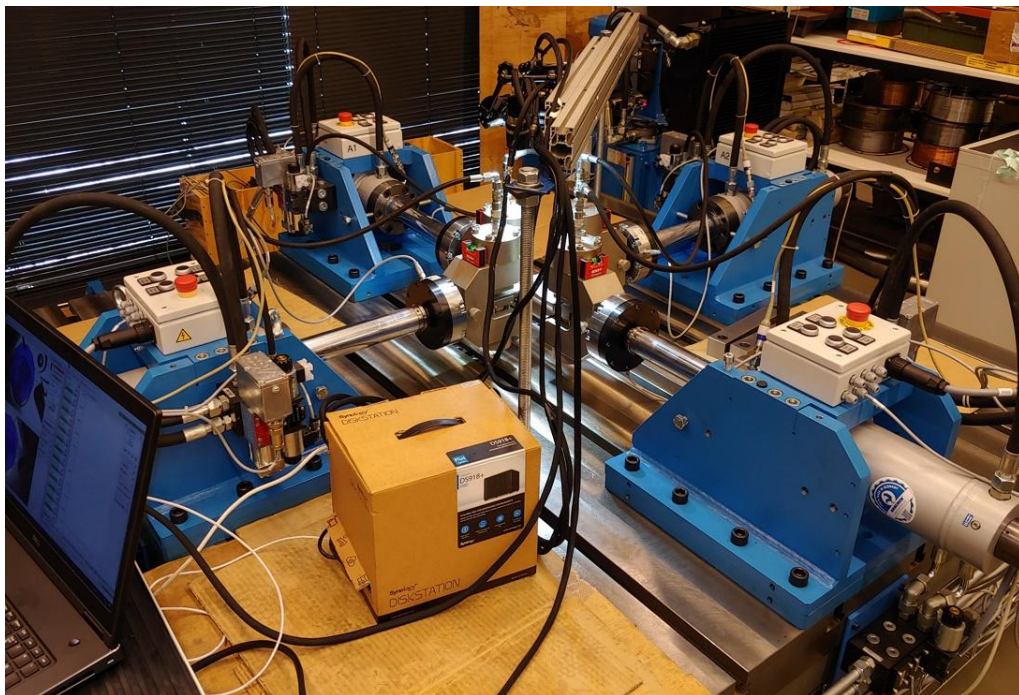
Obr. 3.13 Detail odebraného materiálu ze středu rovinného kříže



Obr. 3.14 Zkušební vzorek pro biaxiální namáhání rovinného kříže s naneseným bílo-černým patternem

3.4.2 Průběh měření

Měření probíhalo na speciálním zařízení (obr. 3.15). Na obrázku lze vidět čtyři nezávisle říditelné hydraulické válce umístěné proti sobě ve dvou navzájem kolmých osách. Hydraulické válce jsou řízené pomocí servo-ventilu s možností regulace v režimu pozice hydraulického válce, nebo v režimu síly, čímž je dosaženo rovnoměrného rozložení síly (posuvy čelistí). Nad čelisti byly nainstalovány optické kamery a snímky byly přenášeny do připojeného notebooku. Zkušební vzorek byl upevněn do čelistí a z prvního snímku před zatěžováním byla nastavena zkoumaná oblast (maska) v programu MercuryPro. Posuv pístů byl zvolen 5mm/min. Zkouška probíhala až do porušení integrity vzorku a poklesu zatěžovací síly, kdy byl posuv vypnut manuálně z ovládacího počítače, ze kterého byla v průběhu zkoušky posílána naměřená data popisující závislost zatěžovací síly na posuvu pístů z integrovaných senzorů do připojeného notebooku snímající přes optický systém hodnoty deformace.



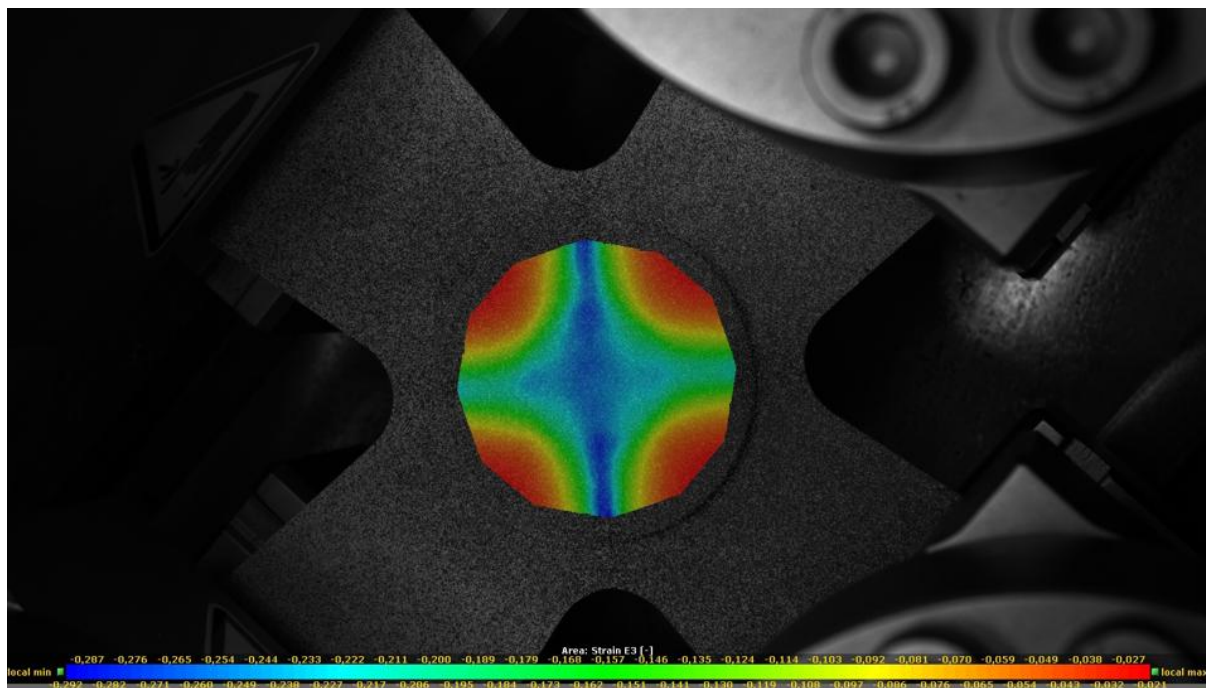
Obr. 3.15 Zařízení pro rovnoosé namáhání v laboratořích TUL s nainstalovaným optickým systémem MercuryPro.



Obr. 3.16 Detail umístění zkušební vzorku mezi čelistmi zkušebního zařízení (pozn. před nanesením deformační sítě).

3.4.3 Výsledky měření

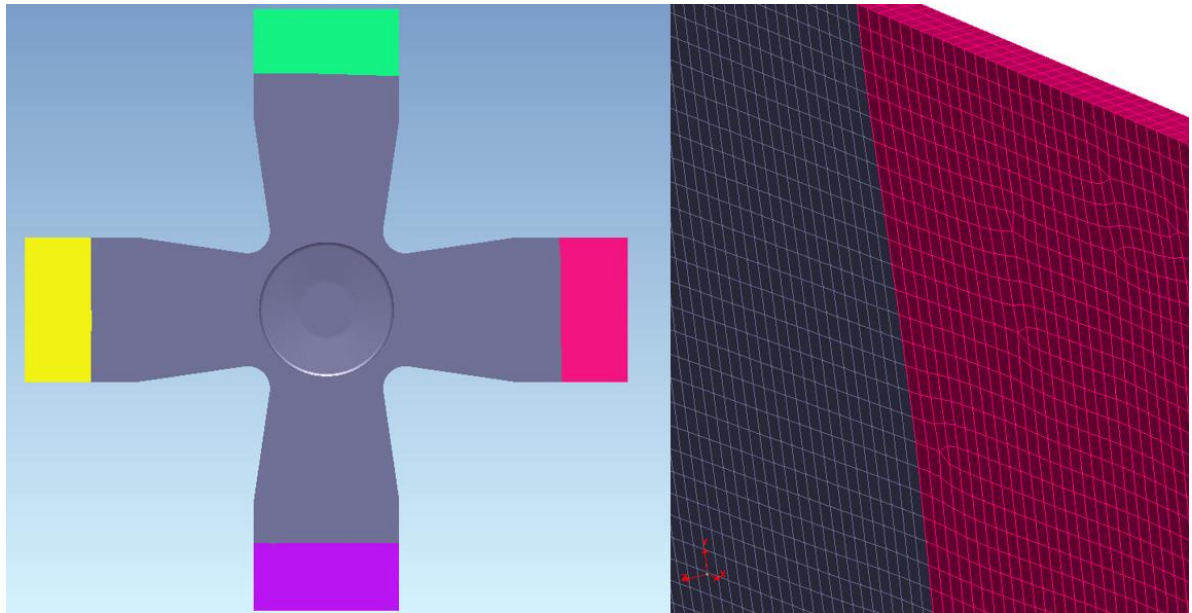
Výstupními hodnotami zkoušky byly tedy hodnoty deformace snímané a zaznamenané v programu MercuryRT, do kterého byly importovány hodnoty zatěžovací síly v závislosti na posuvu z ovládacího počítače. Při stanovení křivky zpevnění zjištěné tímto způsobem však došlo k problému při vyhodnocení dat, kdy se ukázalo, že nebude možné použít metodiku vyhodnocení jako při vyhodnocování výsledků z bulge testu. I přestože byl vzorek tvarově upraven, viz obr. 3.13, docházelo k deformaci mimo zkoumanou oblast, a tím docházelo k nerovnoměrnému rozložení napětí v průřezu vzorku. Napětí „obtékalo“ kolem vyfrézované oblasti. I přes konzultace na Katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti, nebylo nalezeno žádné analytické řešení pro tuto úlohu. Pro zjištění konstant koeficientu monotónního zpevnění a exponentu deformační zpevnění proto byla využita metoda numerické simulace pomocí software PAM-STAMP 2G, který využívá metody konečných prvků.



Obr. 3.17 Znáznornění deformací v průběhu zkoušky v programu MercuryRT.

Simulace v programu PAM-STAMP 2G

V CAD softwaru Catia byl vytřen model, viz obr. 3.18, odpovídající rozměrům reálného zkušební vzorku, který byl následně importován do simulačního programu Pam-Stamp 2G. Pro zasíťování byly voleny objemové elementy o velikosti 0,6mm x 0,6mm, přičemž v tloušťce byly vždy 3 elementy bez ohledu na proměnnou tloušťku zkušební vzorku. Tuhé části (nedeformovatelné) modelu byly definovány pro oblast odpovídající reálnému upnutí do čelistí a reprezentovaly působíště zatěžovací síly v modelu. Cílem simulace bylo dosáhnout podobného (ideálně stejného) průběhu zatěžovací síly v závislosti na posuvu, který byl naměřen při reálném biaxiálním namáháním rovinného kříže. Konkrétně dosáhnout stejné hodnoty maximální síly před porušením v simulaci jako při zkoušce.



Obr. 3.18 Na levém snímku je model zkušebního vzorku v programu Pam-Stamp 2g. Tuhé části jsou barevně odlišené. Vpravo je detail deformační sítě a jednotlivých elementů.

Prvotními vstupními parametry pro simulaci byly naměřené hodnoty z tahové zkoušky (tab. 3.2), které byly zadány do materiálové karty modelu v programu. Výsledkem jednotlivých simulací byla vždy závislost zatěžovací síly na posuvu a křivka zpevnění aproximována za pomoci funkce Swift-Krupowski a k ní odpovídající hodnoty koeficientu monotónního zpevnění C , exponentu deformačního zpevnění n a ofsetové deformace φ_0 . Při první simulaci maximální zatěžovací síla v simulaci očekávaně neodpovídala reálné zatěžovací síle při zkoušce, proto za pomoci aproximace a úpravy deformačních hodnot koeficient monotónního zpevnění C a exponent deformačního zpevnění n se simulace opakovaly až do dosažení podobné maximální zatěžovací síly. Při reálné zkoušce biaxiálního namáhání rovinného kříže byla naměřena maximální zatěžovací síla $F_{\max} = 20109$ N. Ofsetová deformace popisuje pouze pozici začátku deformační křivky a nemá vliv při vyhodnocování maximální zatěžovací síly. Dohromady byly provedeny dvě úpravy hodnot.

Tab. 3.5 Deformační hodnoty materiálu při jednotlivých simulacích. V pravém sloupci je posuzována maximální zatěžovací síla.

Číslo simulace	C [MPa]	n [1]	φ_0 [1]	maximální zatěžovací síla F_{\max} [N]
1. simulace	0,6399	0,205469	0,009206	18978
2. simulace	0,7164	0,21736	0,009206	20869
3. simulace	0,685596	0,2126036	0,009206	20126
Reálné měření	-	-	-	20109

Při poslední třetí simulaci byl rozdíl maximální zatěžovací síly v simulaci oproti reálné zkoušce řadově v setinách procenta (0,084%), proto zadané deformační hodnoty z této simulace byly brány jako výsledek odpovídající reálnému biaxiálnímu namáhání rovinného kříže.

4. Diskuze výsledků

V experimentální části této bakalářské práce byly změřeny a vyhodnoceny charakteristiky materiálu HB260BD+Z100MB ze tří materiálových zkoušek, konkrétně ze statické tahové zkoušky a ze dvou biaxiálních zkoušek v podobě bulge testu a rovinného namáhání kříže. Zpracovaná data z tahové zkoušky popisují chování materiálu při jednoosém zatěžování, což ne vždy odpovídá praktickému využití součástky daného materiálu. Z tohoto důvodu se provádějí zkoušky při dvojosém zatěžování materiálu, výsledky těchto zkoušek společně s hodnotami z tahové zkoušky se používají jako vstupní parametry pro numerickou simulaci tvarově složitých výrobků, kdy materiálové hodnoty z tahové zkoušky představují spodní mez oblasti působících napětí a deformací a hodnoty z biaxiálních zkoušek limitují tuto oblast shora. Nejčastěji se pro stanovení materiálových charakteristik při biaxiálním zatěžování provádí metoda vyboulováním - bulge test. V rámci této bakalářské práce byla provedena i zkouška biaxiálního namáhání rovinného kříže pro porovnání a analyzování výsledků a postupu obou biaxiálních zkoušek. Posuzovaným výsledkem zkoušek byl koeficient monotónního zpevnění C a exponent deformačního zpevnění n , které se využívají pro stanovení křivky zpevnění pro daný materiál.

Výsledkem statické tahové zkoušky byly základní materiálové charakteristiky zapsané v tabulce 3.2. S využitím matematické aproximační metody Swift-Krupowski byla vytvořena křivka zpevnění pro jednoosé zatěžování a k ní odpovídající deformační hodnoty $C = 643,3738$ MPa a $n = 0,197625$ [1] z tabulky 3.3. Deformační hodnoty z biaxiálního namáhání při bulge testu vyšly následovně, $C = 794,504$ MPa a $n = 0,2556$ [1] (tabulka 3.4). Hodnoty z bulge testu byly očekávaně značně vyšší, konkrétně koeficient monotónního zpevnění je o 23,5% větší s porovnáním hodnot z tahové zkoušky. Důvodem je samotná podstata jednotlivých zkoušek, kdy v případě bulge testu dochází vlivem dvojosého zatěžování k většímu deformačnímu zpevnění než při jednoosém namáhání.

Při vyhodnocování výsledků zkoušky biaxiálního namáhání rovinného kříže se nepodařilo stanovit deformační hodnoty podobným analytickým postupem, jaký byl použit při vyhodnocování tahové zkoušky a bulge testu, z důvodu nerovnoměrně rozloženého napětí v průřezu zkušební vzorku. V tomto případě byla použita numerická simulace provedená v programu Pam-Stamp 2G, kdy se deformační hodnoty modelu aproximovaly po jednotlivých simulacích, než byly dosaženy podobné hodnoty (relativně stejné)

maximální zatěžovací síly naměřené při reálné zkoušce. Korelace maximálních zatěžovacích sil nastala při deformačních hodnotách $C = 685,596\text{MPa}$ a $n = 0,2126036$ (tab. 3.5).

Rozdíl mezi získanými hodnotami z biaxiálních zkoušek je relativně velký, rozdíl koeficientu monotónního zpevnění mezi bulge testem a namáhání rovinného kříže je 15,9%. Deformační hodnoty z biaxiálního namáhání rovinného kříže jsou mnohem blíže k hodnotám z tahové zkoušky, reprezentující v praxi ne příliš se vyskytující jednoosé zatěžování, než k hodnotám z bulge testu, který je technologicky podobný reálným výrobním procesům. Navíc jak je patrné z deformačních hodnot, při bulge testu lze dosáhnout větších deformací, než při biaxiálním zatěžování rovinného kříže. Z tohoto důvodu jsou z praktického hlediska výsledné deformační hodnoty a křivky zpevnění z bulge testu přesnější a pro reálnou výrobu a využití vhodnější, než hodnoty získané z biaxiálního namáhání rovinného kříže. Ovšem v případě potřeby určení meze kluzu při biaxiálním zatěžování jsou naměřená data z biaxiálního zatěžování rovinného kříže výhodnější a především rychlejší, než při výpočtu z bulge testu, kde stanovení meze kluzu je naopak komplikovanější a časově náročnější.

Z hlediska samotného měření je namáhání rovinného kříže rychlejší a jednodušší metodou než bulge test, jelikož v průběhu bulge testu dochází často k úniku hydraulické kapaliny skrz trhlinu ve zkušebním vzorku, a tím dojde ke znečištění zkušebního prostředí a následné čištění a doplňování kapaliny je časově náročné, stejně tak jako samotné zatěžování zkušebního vzorku. Avšak co se týče vyhodnocování a stanovení deformačních hodnot z výsledků zkoušek, je rovinné namáhání kříže v tomto případě s využitím výpočetní techniky a simulací velmi časově náročné. Z těchto důvodů je z technického hlediska výhodnější použití metody a výsledku z bulge testu pro stanovení deformačních hodnot a křivky zpevnění. Pro stanovení meze kluzu při biaxiálním zatěžování je snazší a rychlejší metoda namáhání rovinného kříže.

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat deformační chování při biaxiálním zatěžování. Analýza probíhala na základě vykonaných experimentů v podobě provedení tří materiálových zkoušek a následným zpracováním naměřených hodnot a výpočtu deformačních hodnot daného zkušebního materiálu. Vzájemně se posuzovala zkouška hydraulickým vyboulováním – tzv. bulge test a biaxiální namáhání rovinného kříže. Pro určení základních materiálových charakteristik byla realizována statická zkouška tahem, která pomohla později vyhodnotit výsledky experimentu.

Jako zkušební materiál byl zvolen žárově pozinkovaný plech s označením HX260BD+Z100MB o tloušťce 1,3 mm. Materiál je vhodný pro tváření za studena, kde vykazuje vysokou pevnost. Široké využití má ve výrobě automobilových karoserií.

Nejprve byla provedena statická zkouška tahem na zkušebním zařízení TIRAtest 2300 podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Z naměřených hodnot byly vypočítány základní charakteristiky materiálu a v programu OriginPro9 byla využita matematická funkce podle Swift-Krupowski pro stanovení křivky zpevnění a k tomu odpovídající deformační hodnoty.

Biaxiální zkouška hydraulickým vyboulováním – bulge test - byla provedena na dvojčinném hydraulickém lisu CBA 300/63 s využitím optického systému MercuryPro a softwarového programu MercuryRT, který umožnil na základě fotogrammetrie měřit průběhy deformací v závislosti na zatěžovacím hydrostatickém tlaku. Výsledkem této zkoušky byly vypočítané deformační hodnoty z aproximované křivky zpevnění z naměřených dat. Další realizovanou biaxiální zkouškou bylo namáhání rovinného kříže ve speciálním zkušebním zařízení, které za pomoci čtyř na sobě kolmých hydraulických válců zatěžovalo zkušební kříž. Hodnoty deformací byly opět snímány optickým systémem. Pro určení výsledku z této zkoušky bylo zhotoveno několik numerických simulací v programu Pam-Stamp 2g, jejichž výsledkem byla simulace s průběhem zatěžovací síly, která odpovídala skutečným hodnotám zatěžovací síly naměřené ze skutečné zkoušky biaxiálního zatěžování rovinného kříže.

Po porovnání a analýze výsledků jednotlivých zkoušek, včetně zohlednění procesu měření a vyhodnocování dat, se dospělo k závěru. Pro technické a praktické využití jsou deformační hodnoty z biaxiálního zatěžování v podobě bulge testu výhodnější než hodnoty

získané z biaxiálního namáhání rovinného kříže. Výsledné deformační hodnoty z bulge testu jsou věrohodnější pro využití v praxi z důvodu podobnosti testu k reálnému výrobnímu procesu a dosažení vyšších deformačních hodnot a obecně deformace, kdežto výsledky z namáhání rovinného kříže se přibližují spíše hodnotám ze statické zkoušky tahem, tedy případu jednoosého zatěžování. Výstupní data z biaxiálního namáhání rovinného kříže jsou vhodnější pro stanovení meze kluzu při biaxiálním zatěžování než data z bulge testu. Aplikovaný postup vyhodnocení deformačních hodnot z namáhání rovinného kříže za pomoci simulace byl časově a výpočetně náročný. V případě zjišťování materiálových charakteristik materiálu pro biaxiální namáhání by bylo ideální kombinovat biaxiální zkoušky, pro určení meze kluzu využít metodu biaxiálního namáhání rovinného kříže a pro výpočet křivky zpevnění a deformačních hodnot použít data z bulge testu.

Naměřené a zpracované hodnoty z realizovaných materiálových zkoušek lze dále uplatnit v praxi při numerickém modelování, kde definují deformační chování materiálu. V dnešní moderní době představují tyto získané hodnoty základní vstupní parametry pro numerické simulování tváření a deformační chování materiálů.

6. Použitá literatura

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [2] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2 vyd. Bratislava: Alfa, 1989.
- [3] PELLEG, Joshua. *Mechanical properties of materials*. Dordrecht: Springer, 2013.
- [4] ČSN EN ISO 6891-1: *Kovové materiály - zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [5] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-2798-8.
- [6] HLADKÝ, Jan. *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_4.pdf
- [7] WEI, Liu. *Identification of strain rate dependent hardening sensitivity of metallic sheets under in-plane biaxial loading* [online]. březen 2015 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278827607_Identification_of_strainrate_dependent_hardening_sensitivity_of_metallic_sheets_under_in-plane_biaxial_loading
- [8] SOBOTKA, Jiří, Pavel SOLFRONK, Pavel DOUBEK a Lukáš ZUZÁNEK. *The hydraulic bulge test and its importance for the von Mises criterion* [online]. 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/12/reports/1485.pdf>
- [9] MIZERA, David. *Relaxace napětí materiálu při provádění zkoušky hydrostatickým vypínáním*. TU v Liberci, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Pavel Solfronk.
- [10] What is a Planar Biaxial Test. *Test Resources* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.testresources.net/applications/test-types/planar-biaxial-test/>
- [11] XIANG, Y., X. CHEN and J.J. VLASSAK, 2005. Plane-strain Bulge Test for Thin Films. *Journal of Materials Research* [online]. B.m.: Cambridge University Press, vol. 20, no. 9, pp. 2360–2370. Retrieved z: doi:10.1557/jmr.2005.0313

- [12] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 5. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [13] *Zkouška hlubokotažnosti: Erichsenova zkouška* [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1568>
- [14] FABÍK, Richard. *Tváření kovů*. VŠB - Technická univerzita Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2572-4. Dostupné také z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/TVKB/Tvareni%20kovu.pdf>
- [15] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *Deformační chování materiálů* [online]. VŠB - TÚ Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 94 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf
- [16] TMĚJ, J. a V. MIKEŠ. *Teorie tváření*. 2. vydání. Liberec: VŠSST, 1990.
- [17] PETRUŽELKA, Jiří. *Plošné tváření*. Ostrava: Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2004.
- [18] DHATT, Gouri, Gilbert TOUZOT a Emmanuel LEFRANÇOIS. *Finite element method: Numerical method sseries*. London: ISTE ; Hoboken, N.J. ; Wiley, 2012.
- [19] SCHENK, Toni. Introduction to photogrammetry. *The Ohio State University, Columbus*, 2005, 106.
- [20] BEHRING, Dirk, Jan THESING, Holger BECKER a Robert ZOBEL. *Optical Coordinate Measuring Techniques for the Determination and Visualization of 3D Displacements in Crash Investigations. Technical Papers* [online]. 2003, 9 [cit. 2022-04-19]. ISSN 0148-7191. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.4271/2003-01-0891](https://doi.org/10.4271/2003-01-0891)
- [21] 3D měřicí systémy: MCAE Systems. *MCAE* [online]. Kuřim [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/3d-merici-systemy/>

7. Seznam příloh

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

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

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

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

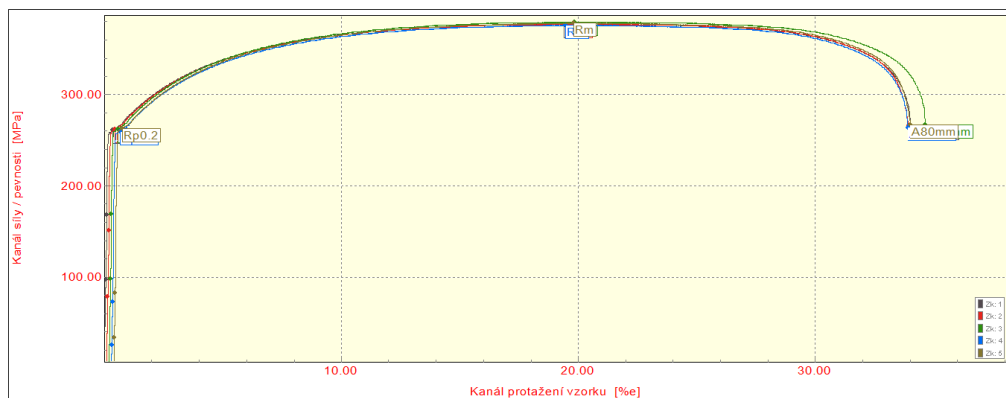
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX260BD + Z100 MB
 Rozměry vzorku : [1,3 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Štěpán Rypl
 Datum provedení testu : 14.1.2022
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa	R
1	260.6	377.1	19.20	33.88	179656	1.468
2	262.2	377.2	19.31	33.69	184635	1.456
3	262.3	379.5	19.44	34.31	178513	1.472
4	259.8	375.7	18.96	33.46	178239	1.462
5	263.0	378.0	19.19	33.47	178446	1.471

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa	R
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	261.6	377.5	19.22	33.76	179898	1.466
Směrodatná odchylka	1.3	1.4	0.18	0.35	2705	0.007
Minimální hodnota	259.8	375.7	18.96	33.46	178239	1.456
Maximální hodnota	263.0	379.5	19.44	34.31	184635	1.472



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

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

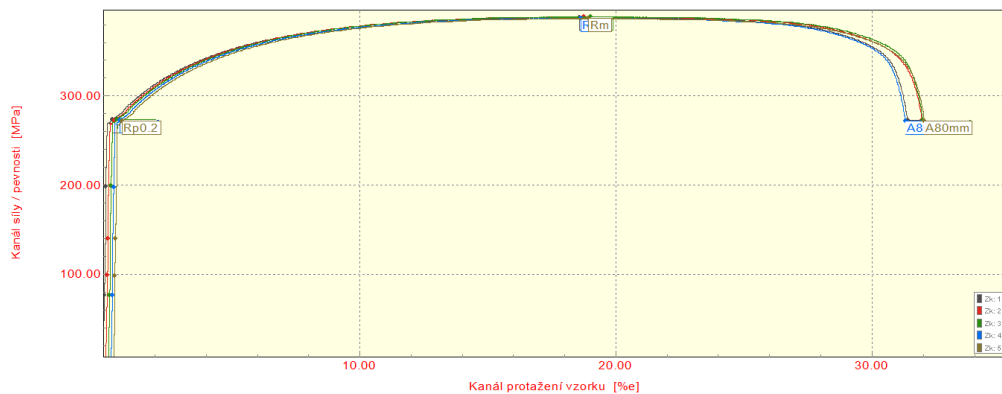
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX260BD + Z100 MB
 Rozměry vzorku : [1,3 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 45°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Štěpán Ryppl
 Datum provedení testu : 14.1.2022
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa	R
1	273.6	388.4	18.37	31.25	199537	1.347
2	273.5	389.2	18.46	31.71	191100	1.336
3	274.1	389.3	18.60	31.64	197502	1.352
4	273.1	387.5	18.14	30.86	201564	1.331
5	272.2	387.4	18.34	31.51	191407	1.355

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa	R
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	273.3	388.4	18.38	31.39	196222	1.344
Směrodatná odchylka	0.7	0.9	0.17	0.34	4759	0.010
Minimální hodnota	272.2	387.4	18.14	30.86	191100	1.331
Maximální hodnota	274.1	389.3	18.60	31.71	201564	1.355



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

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

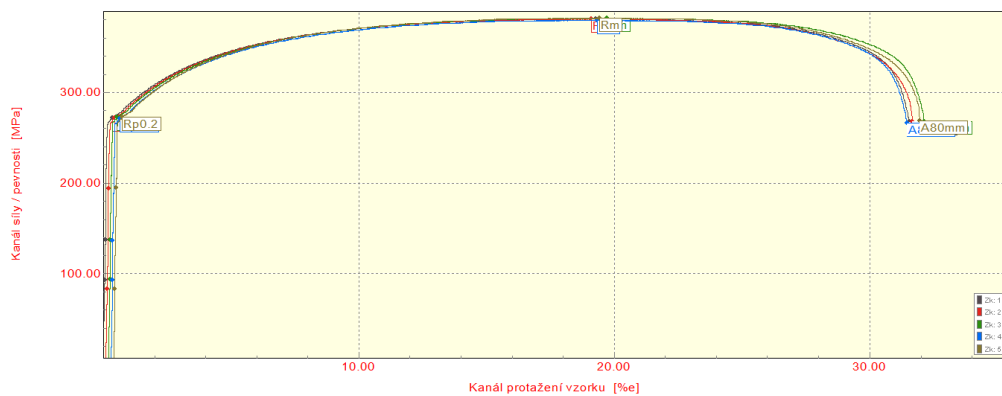
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX260BD + Z100 MB
 Rozměry vzorku : [1,3 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Štěpán Rypl
 Datum provedení testu : 14.1.2022
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa	R
1	272.1	381.0	19.07	31.41	194231	1.825
2	271.9	381.0	18.81	31.43	194476	1.816
3	272.6	381.9	19.32	31.81	192249	1.832
4	271.3	379.9	18.84	31.02	196053	1.840
5	272.8	382.2	18.81	31.43	195080	1.822

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	E MPa	R
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	272.2	381.2	18.97	31.42	194418	1.827
Směrodatná odchylka	0.6	0.9	0.22	0.28	1401	0.009
Minimální hodnota	271.3	379.9	18.81	31.02	192249	1.816
Maximální hodnota	272.8	382.2	19.32	31.81	196053	1.840



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