

Využití sendvičového plechu pro stavbu karoserie automobilu

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Martin Solfronk

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. David Koreček

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Využití sendvičového plechu pro stavbu karoserie automobilu

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Solfronk**
Osobní číslo: S19000472
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

1. Základní rozdělení materiálů používaných v automobilovém průmyslu (konvenční hlubokotažné a pevnostní materiály, nekonvenční materiály atd.).
2. Hodnocení tvárnosti tenkých ocelových plechů (statická zkouška tahem, digram mezních přetvoření, zkouška hydrostatickým vypínáním, zkouška hloubením dle Erichsena atd.)
3. Experimentální zjištění deformačních schopností vybraného sendvičového plechu a jeho porovnání s konvenčním hlubokotažným materiálem.
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat.
5. Diskuze a závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] DAVIES, Geoffrey. *Materials for Automobile Bodies*. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] BUNGE, H., J. D. BANABIC a Klaus PÖHLANDT. *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Berlin; London: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-08750-9.
- [3] 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.
- [4] PÖHLANDT, Klaus. *Materials testing for the metal forming industry*. Berlin u.a.: Springer, 1989. ISBN 978-3-540-50651-5.
- [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 20482 (420406) *Kovové materiály – Plecha a pásy – Zkouška hloubením podle Erichsen*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

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

Konzultant práce: Ing. David Koreček
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

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

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.

3. června 2021

Bc. Martin Solfronk

Využití sendvičového plechu pro stavbu karoserie automobilu

Anotace

Předložená diplomová práce se zabývala charakteristikou deformačního chování sendvičového plechu a jeho využití pro stavbu karoserie automobilu. V teoretické části diplomové práce jsou popsány základní zkoušky mechanických vlastností materiálu. Dále se tato část práce zabývá konvenčními i nekonvenčními materiály používanými v automobilovém průmyslu. Experimentální část diplomové práce porovnává sendvičový materiál CR270Y340T-LA a mikrolegovanou ocel HC 300LAD z hlediska mechanických vlastností a zejména tvárnosti. Vlastnosti materiálů byly zjišťovány statickou zkouškou tahem, zkouškou hydrostatickým vypínáním (tzv. Bulge test) a vypínáním pevným polokulovým tažníkem (tzv. Nakazima test), z které se následně stanovily tzv. diagramy mezních přetvoření. Posledním z porovnávaných parametrů byl tvar střížné hrany v závislosti na velikosti střížné mezery. V hodnocení jsou následně shrnuty základní charakteristiky a rozdíly mezi testovanými materiály, z kterých jsou vyvozeny příslušné závěry.

Klíčová slova: mechanické zkoušky materiálů, tvárnost, sendvičové materiály, zkouška hydrostatickým vypínáním, Nakazima test, DMP

Use of Sandwich Sheet for the Car body Design

Annotation

The submitted diploma thesis dealt with the characterization of the sandwich sheet deformation behaviour and its use for the car-body design. The theoretical part of the thesis describes the basic tests of the material mechanical properties. Furthermore, this part of the thesis deals with conventional and unconventional materials used in the automotive industry. The experimental part of the thesis compares the sandwich material CR270Y340T-LA and the micro-alloyed steel HC 300LAD in terms of mechanical properties and especially formability. The properties of the materials were determined by static tensile test, hydraulic bulge test and by modified Nakazima test, from which the forming limit diagrams were subsequently determined. The last compared parameter was the shape of the cut edge in dependence on magnitude of cutting clearance. The evaluation then summarises the basic characteristics and differences between the tested materials, from which conclusions are drawn.

Key words: Mechanical Testing of Materials, Formability, Sandwich Materials, Hydraulic Bulge Test, Nakazima Test, FLD

Poděkování

V této části bych chtěl poděkovat všem, díky kterým jsem dokázal dokončit svou diplomovou práci. Mé díky patří zejména panu doktorovi Sobotkovi za odborné a trpělivé vedení a za čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za to, že mi byli oporou. I díky jejich pomoci a podpoře jsem byl schopen tuto práci dokončit.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1 Úvod.....	12
2 Teoretická část	13
2.1 Zkoušky tvářitelnosti kovových materiálů	13
2.1.1 Statická zkouška tahem.....	13
2.1.2 Technologické zkoušky	20
2.1.3 Diagramy mezních přetvoření.....	26
2.2 Materiály používané v automobilovém průmyslu.....	29
2.3 Hlubokotažné oceli.....	30
2.3.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem.....	31
2.3.2 Plechy z IF (Interstitials Free) ocelí	32
2.3.3 Plechy z IF ocelí s BH (Bake Hardening) efektem.....	33
2.4 Pevnostní materiály	34
2.4.1 DP (Dual Phase) oceli	34
2.4.2 TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli	35
2.4.3 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli	35
2.4.4 CP (Complex Phase) oceli	36
2.4.5 Martenzitické oceli.....	37
2.4.6 HSLA (High Strength Low Alloy) oceli.....	38
2.5 Nekonvenční materiály.....	39
2.5.1 Kovové pěny	39
2.5.2 Svařované přístřihy - TWB (Tailored Welded Blanks)	40
2.5.3 Vývalky s proměnnou tloušťkou - TRB (Tailored Rolled Blanks)	40
2.5.4 Sendvičové materiály.....	40
3 Experimentální část.....	43
3.1 Zkoušené materiály	43
3.2 Statická zkouška tahem	44
3.2.1 Měření mechanických vlastností při jednoosém namáhání	44
3.2.2 Aproximace křivky zpevnění ze statické zkoušky tahem	50
3.3 Zkouška hydrostatickým vypínáním – Bulge test	54
3.3.1 Měření mechanických vlastností při biaxiálním zatížení.....	55

3.3.2	Aproximace deformační křivky – hydrostatické vypínání.....	59
3.4	Vypínání pevným polokulovým tažníkem – Nakazima test	62
3.4.1	Příprava vzorků	62
3.4.2	Vlastní měření	63
3.5	Porovnání tvaru střižné hrany.....	67
4	Diskuze výsledků	70
4.1	Statická zkouška tahem	70
4.2	Zkouška hydrostatickým vypínáním	73
4.3	Vypínání pevným polokulovým tažníkem – Nakazima test	74
4.4	Porovnání tvaru střižné hrany.....	77
5	Závěr	78
	Literatura.....	79
	Seznam příloh	81

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_g	Tažnost homogenní	[1;%]
A_x	Tažnost celková	[1;%]
C	Modul monotónního zpevnění	[MPa]
F	Zatěžující síla	[N]
F_{max}	Maximální zatěžující síla	[N]
F_{vp}	Síla při porušení vzorku	[N]
F_{tmax}	Maximální síla při fázi tažení	[N]
KUT	Komplexní ukazatel tváritelnosti	[1]
R	Smluvní napětí	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_{ed}	Dolní mez kluzu	[MPa]
R_{eh}	Horní mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
R	zakřivení vzorku	[mm]
S_u	Nejmenší průřezová plocha	[mm]
S_0	Počáteční průřezová plocha	[mm ²]
S	Aktuální plocha průřezu	[mm ²]
T	Přirozený ukazatel hlubokotažnosti	[1,%]
UH	Ukazatel hlubokotažnosti	[1]
ZP	Zásoba plasticity	[MPa]
Z	Kontrakce	[1;%]
h	Hloubka v momentě porušení vzorku	[mm]
l	Celková délka po přetržení	[mm]
l_0	Počáteční délka	[mm]
l_{Rm}	Délka při dosažení meze pevnosti	[mm]
Δl	Absolutní prodloužení	[mm]
n	Exponent deformačního zpevnění	[1]
p	Tlak kapaliny	[MPa]
r_α	Součinitel plastické anizotropie	[1]
t	Aktuální tloušťka materiálu	[mm]

v	výška vyboulení	[mm]
ε	Poměrné prodloužení	[1]
σ	Skutečné napětí	[MPa]
φ	Přirozená deformace	[1]
φ_0	Posunutí křivky zpevnění	[1]
BH	Bake Hardening	
CP	Complex Phase	
DP	Dual Phase	
HSLA	High Strength Low Alloy	
IF	Interstitials Free	
MS	Matensite steels	
TRB	Tailored Rolled Blanks	
TRIP	TRansformation Induced Plasticity	
TWB	Tailored Welded Blanks	
TWIP	TWinning Induced Plasticity	

1 ÚVOD

V automobilovém průmyslu se neustále zvyšují nároky na mechanické vlastnosti jednotlivých komponent a tedy i na mechanické vlastnosti použitých materiálů. Dlouholetým tlakem na zlepšování mechanických vlastností konvenčních materiálů bylo s největší pravděpodobností dosaženo pomyslné hranice jejich možností a je třeba poohlížet se po nových typech materiálů. V důsledku toho dochází ke značnému rozvoji tzv. nekonvenčních materiálů. Mezi významné zástupce této skupiny materiálů patří například svařované přístřihy, vývalky proměnné tloušťky, kovové pěny a v neposlední řadě tzv. sendvičové materiály.

Nekonvenční materiály často výhodně kombinují vlastnosti různých materiálů. Výsledná kombinace vlastností bývá často v oblasti konvenčních materiálů nedosažitelná. Pro použití nekonvenčních materiálů pro jakoukoli výrobu součástí je nutné znát jejich přesně mechanické vlastnosti. Pro oblast tváření, resp. pro oblast simulace tváření, je klíčové znát zejména deformační chování těchto materiálů a dokázat je vhodně simulovat. K tomu jsou velmi často využívány tzv. aproximační konstanty – modul monotónního zpevnění C , exponent deformačního zpevnění n a posunutí křivky zpevnění φ_0 .

Zjištění deformačního chování nekonvenčního materiálu (v tomto případě sendvičového materiálu) je cílem této práce. Mechanické vlastnosti budou zjišťovány pomocí standardních zkoušek – statickou zkouškou tahem, zkouškou hydrostatickým vypínáním (tzv. Bulge test) a vypínáním pevným polokulovým tažníkem (tzv. Nakazima test). Dále bude v rámci této práce provedeno porovnání střížné hrany v závislosti na velikosti střížné mezery.

Na základě dosavadních zkušeností je v porovnání s konvenčními materiály určenými pro tváření očekávána celkově horší tvářitelnost a to z důvodu očekávané nižší koheze na rozhraní jednotlivých vrstev sendvičového materiálu. Obecně platí, že v případě porovnávání dvou plechů rozdílné tloušťky vyrobených ze shodného materiálu, dosahuje tenčí z plechů horší tvářitelnosti. Pokud tedy bude na sendvičový materiál nahlíženo jako na tváření dvou tenkých plechů, namísto jednoho plechu o tloušťce odpovídající tloušťce celého sendvičového materiálu, lze opět očekávat horší tvářitelnost než jaké by dosahoval konvenční materiál.

2 TEORETICKÁ ČÁST

První kapitoly teoretické části této práce jsou věnovány popisu mechanických vlastností materiálů a způsobů jejich měření a vyhodnocování. Na tyto kapitoly navazuje přehled vybraných materiálů používaných v automobilovém průmyslu.

2.1 Zkoušky tvářitelnosti kovových materiálů

Z hlediska mechanických vlastností jsou na materiály používané v automobilovém průmyslu kladeny vysoké nároky. Jejich zjišťování lze provádět mnoha různými metodami. Jejich základní rozdělení je na zkoušky normalizované a technologické. Normalizované zkoušky jsou přesně popsány z hlediska podmínek průběhu zkoušky i z hlediska vyhodnocování výsledků. Technologické zkoušky normované nejsou a slouží zejména pro porovnání vlastností více materiálů. Pro tyto účely bývá zpravidla navržena zkouška simulující konkrétní děj (např. hluboké tažení) a následně je vyhodnocováno a porovnáváno chování materiálu při tomto ději vzhledem k jinému materiálu.

Několik vybraných zkoušek materiálu (zejména s ohledem na experimentální část této práce) je v této kapitole představeno a popsáno.

2.1.1 Statická zkouška tahem

Nejpoužívanější zkouškou pro hodnocení mechanických vlastností materiálu je statická zkouška tahem. Zkušební vzorek je v průběhu této zkoušky zatěžován jednoosým tahem až do porušení. Na obr. 1 je zobrazeno zařízení pro statickou zkoušku tahem. Primárně je v průběhu této zkoušky průtahoměrem zaznamenáváno absolutní prodloužení vzorku a tomu odpovídající zatěžující síla [1, 2].

Přesné podmínky této zkoušky i způsob vyhodnocování výsledků jsou popsány normou ČSN EN ISO 6892-1.

Základní veličiny získávané touto zkouškou jsou:

- mez kluzu R_e (příp. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, horní mez kluzu R_{eh} nebo dolní mez kluzu R_{ed}),
- mez pevnosti R_m ,
- tažnost celková A_x ,
- tažnost homogenní A_g ,
- kontrakce Z .



Obr. 1: Zařízení pro statickou zkoušku tahem [3]

Na následujících stránkách jsou podrobně popsány jednotlivé základní veličiny získávané při vyhodnocování statické zkoušky tahem.

Mez kluzu R_e

Mez kluzu R_e je hodnota napětí, při kterém začne docházet ke vzniku trvalých plastických deformací. V případě běžných konstrukčních ocelí dochází na mezi kluzu v jeden okamžik k deformaci bez přírůstku napětí. V tahovém diagramu se tento jev projeví jako zlom na zatěžující křivce. V tomto případě se vyhodnocuje tzv. výrazná mez kluzu R_e [1].

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

V případě některých technických materiálů (např. hlubokotažných ocelí) není mez kluzu R_e výrazná, případně není z tahového diagramu patrná vůbec. Pro vyhodnocování meze kluzu těchto materiálů se zavádí tzv. smluvní mez kluzu, která odpovídá napětí při určité poměrné deformaci. Nejčastěji se používá smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, což je napětí, které vyvolá trvalou plastickou deformaci o velikosti 0,2 %.

Mez kluzu, případně smluvní mez kluzu, je z hlediska návrhu strojních součástí velmi důležitou hodnotou, která je udávána v materiálových normách a od které se odvíjí dovolené napětí v součástech [1, 4].

Mez pevnosti R_m

Mez pevnosti R_m je hodnota napětí, kterému odpovídá maximální dosažená zatěžující síla při tahové zkoušce. Toto maximální napětí lze vypočítat podle rovnice (1).

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad (1)$$

Kde značí:

R_m	- smluvní mez pevnosti	[MPa]
F_{max}	- maximální zatěžující síla	[N]
S_0	- počáteční průřezová plocha	[mm ²]

Při zatěžování křehkých materiálů dochází při tomto napětí k prasknutí zkušebního vzorku. Při zatěžování houževnatých materiálů dochází za mezí pevnosti k výraznému zúžení vzorku v určitém místě (vznik tzv. krčku) a dále jsou deformace koncentrovány v této oblasti dokud nedojde k prasknutí vzorku. Mez pevnosti je velmi důležitý parametr pro návrh procesu tváření a také bývá uváděn v materiálových normách [1, 4].

Celková tažnost A_x

Celková tažnost A_x je veličina udávaná zpravidla v procentech a odpovídá trvalému prodloužení zkušebního vzorku po přetržení. Její hodnota je vypočítávána podle rovnice (2) [1].

$$A_x = \frac{l-l_0}{l_0} * 100 \quad (2)$$

Kde značí:

A_x	- celková tažnost	[%]
l	- celková délka po přetržení	[mm ²]
l_0	- počáteční délka	[mm ²]

Homogenní tažnost A_g

Jak již bylo zmíněno výše, nemusí při dosažení meze pevnosti nutně dojít k přetržení vzorku. Namísto toho se vzorek může dále v určité oblasti deformovat za vzniku tzv. krčku, ve kterém následně dojde k přetržení. Tato nehomogenní deformace se projeví v celkové tažnosti. Aby bylo možné rozlišit oblast před dosažením meze pevnosti R_m , zavádí se tzv. homogenní tažnost A_g , jejíž hodnota odpovídá právě tažnosti do okamžiku dosažení meze pevnosti. Vypočítávána je podle rovnice (3).

Homogenní tažnost A_g a celková tažnost A_x resp. poměr mezi nimi, jsou velmi významné parametry při vyhodnocování tváritelnosti materiálu [1].

$$A_g = \frac{l_{Rm} - l_0}{l_0} * 100 \quad (3)$$

Kde značí:

A_g	- homogenní tažnost	[%]
l_{Rm}	- délka při dosažení meze pevnosti	[mm]
l_0	- počáteční délka	[mm]

Kontrakce Z

Kontrakce Z je veličina udávaná zpravidla v procentech a odpovídá největší změně průřezové plochy zkušebního vzorku v průběhu zkoušky. Její hodnota je vypočítávána podle rovnice (4) [1].

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} * 100 \quad (4)$$

Kde značí:

Z	- kontrakce	[%]
S_u	- nejmenší průřezová plocha	[mm]
S_0	- počáteční průřezová plocha	[mm]

Součinitel plastické anizotropie r_α

Součinitel plastické anizotropie r_α udává schopnost materiálu odolávat ztenčení ve směru tloušťky při tažení. Čím je jeho hodnota vyšší, tím materiál lépe odolává tomuto ztenčení a je tedy vhodnější pro tváření. [1, 5].

Pracovní diagram

V průběhu zkoušky se primárně zaznamenává tzv. pracovní diagram, který vyjadřuje závislost zatěžující síly F na absolutním prodloužení Δl . Jak již bylo zmíněno výše, tyto veličiny jsou přímo měřeny při testování vzorku.

Smluvní diagram

Z pracovního diagramu se s ohledem na rozměry vzorku následně vypočte tzv. smluvní diagram, ze kterého se vyhodnocují meze kluzu i pevnosti. Smluvní diagram vyjadřuje závislost smluvního napětí R na poměrném prodloužení ε . Výpočet smluvního napětí R je uveden v rovnici (5), výpočet poměrného prodloužení ε v rovnici (6).

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (5)$$

Kde značí:

R	- smluvní napětí	[MPa]
F	- zatěžující síla	[N]
S_0	- počáteční průřezová plocha	[mm ²]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$

Kde značí:

ε	- poměrné prodloužení	[1]
Δl	- absolutní prodloužení	[mm]
l_0	- počáteční délka	[mm]

Skutečný diagram

Posledním z diagramů vyhodnocovaných ze statické zkoušky tahem je tzv. skutečný diagram, který vyjadřuje závislost skutečného napětí σ na přirozené (skutečné) deformaci φ . Skutečné napětí σ je primárně definováno podle rovnice (7).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (7)$$

Kde značí:

σ	- skutečné napětí	[MPa]
F	- zatěžující síla	[N]
S	- plocha aktuálního průřezu	[mm ²]

Na základě zákona zachování objemu je možné odvodit druhý tvar rovnice pro výpočet skutečného napětí σ , jejíž tvar je uveden níže jako rovnice (8). Nicméně tato rovnice platí pouze do meze pevnosti.

$$\sigma = R * (1 + \varepsilon) \quad (8)$$

Kde značí:

σ	- skutečné napětí	[MPa]
R	- smluvní napětí	[MPa]
ε	- poměrné prodloužení	[1]

Výpočet přirozené deformace φ je prováděn podle rovnice (9). Tato rovnice vychází z definice přirozené deformace φ .

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (9)$$

Kde značí:

- | | | |
|---------------|----------------------------------|-----|
| φ | - přirozená (skutečná) deformace | [1] |
| ε | - poměrné prodloužení | [1] |

Pro procesy tváření bývají výše uvedené základní veličiny doplňovány o tzv. **odvozené ukazatele tvářitelnosti**, které blíže upřesňují deformační chování materiálu [6]. Do této skupiny veličin patří zejména:

- ukazatel hlubokotažnosti UH [1],
- zásoba plasticity ZP [MPa],
- komplexní ukazatel tvářitelnosti KUT [1].

Jak již jejich název napovídá, tyto veličiny jsou odvozovány ze základních veličin. Ukazatel hlubokotažnosti UH je vypočítáván podle rovnice (10), zásoba plasticity ZP podle rovnice (11) a komplexní ukazatel tvářitelnosti KUT podle rovnice (12) [6].

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad (10)$$

Kde značí:

- | | | |
|------------|----------------------------|-------|
| UH | - ukazatel hlubokotažnosti | [1] |
| $R_{p0,2}$ | - mez kluzu | [MPa] |
| R_m | - mez pevnosti | [MPa] |

$$ZP = k * (R_m - R_{p0,2}) * A_x \quad (11)$$

Kde značí:

- | | | |
|------------|------------------------|-------|
| ZP | - zásoba plasticity | [MPa] |
| k | - koeficient zaplnění | [1] |
| R_m | - smluvní mez pevnosti | [MPa] |
| $R_{p0,2}$ | - smluvní mez kluzu | [MPa] |
| A_x | - celková tažnost | [1] |

$$KUT = A_x * \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad (12)$$

Kde značí:

KUT	- komplexní ukazatel tvářitelnosti	[1]
A_x	- celková tažnost	[1]
$R_{p0,2}$	- smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	- smluvní mez pevnosti	[MPa]

Dále jsou pro popis deformačního chování materiálu velmi důležité tzv. **aproximační konstanty**. Tyto aproximační konstanty vyjadřují závislost skutečného napětí σ na přirozené deformaci φ a jsou klíčové především pro numerické simulace tváření. Do skupiny aproximačních konstant patří tyto veličiny:

- modul monotónního zpevnění C [MPa],
- exponent deformačního zpevnění n [1],
- posunutí křivky zpevnění φ_0 [1].

Aproximační konstanty jsou získávány aproximací skutečné křivky zpevnění zpravidla pomocí specializovaných numerických programů. Základní aproximační rovnicí je tzv. Hollomonova rovnice, jejíž tvar je uveden jako rovnice (13).

$$\sigma = C * \varphi^n \quad (13)$$

Kde značí:

σ	- skutečné napětí	[MPa]
C	- modul monotónního zpevnění	[MPa]
φ	- přirozená deformace	[1]
n	- exponent deformačního zpevnění	[1]

Pro zpřesnění výsledků bývá v praxi tato rovnice velmi často upravována do tvaru podle Swift-Krupkowského, která je doplněna o posunutí křivky zpevnění φ_0 . Tento tvar je uveden jako rovnice (14).

$$\sigma = C * (\varphi + \varphi_0)^n \quad (14)$$

Kde značí:

σ	- skutečné napětí	[MPa]
C	- modul monotónního zpevnění	[MPa]
φ	- přirozená deformace	[1]
φ_0	- posunutí křivky zpevnění	[1]
n	- exponent deformačního zpevnění	[1]

Tyto aproximační konstanty jsou získávány interpolačně specializovanými numerickými programy ze skutečného diagramu $\sigma - \varphi$. Pro správné vypočítání konstanty n je důležité správné určení intervalu hodnot. Tyto intervaly jsou určeny různými normami s určitými rozdíly.

Dle normy ČSN ISO 10275 je spodní hranice intervalu v bodě křivky zpevnění, ve kterém je dosaženo poměrného prodloužení $\varepsilon = 5 \%$. Horní hranice intervalu je pak v bodě křivky zpevnění, ve kterém je dosaženo homogenní tažnosti A_g .

Dle normy EN 10130 + A1: 2000 odpovídá spodní hranice intervalu bodu křivky zpevnění, ve kterém je dosaženo poměrného prodloužení $\varepsilon = 10 \%$. Horní hranice je dána poměrným prodloužením $\varepsilon = 20 \%$. Pokud maximální hodnota ε nedosahuje 20% , je interval dán od $\varepsilon = 5 \%$ do $\varepsilon = 15 \%$.

Dle normy ASTM E 646 – 78 může být konstanta n zjištěna z libovolného intervalu mezi mezí kluzu a mezí pevnosti.

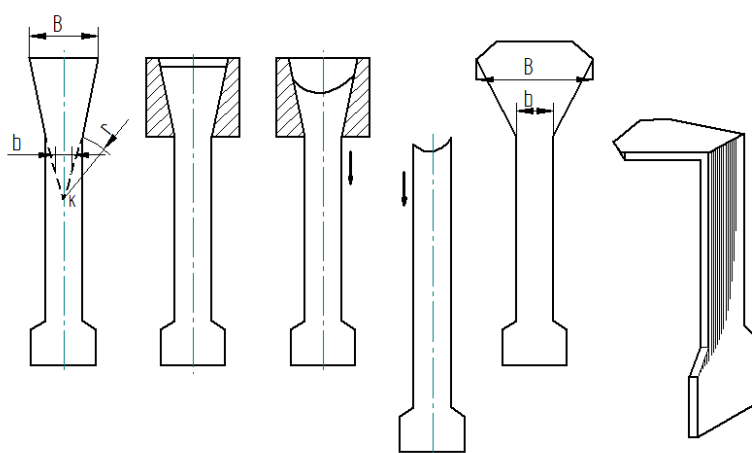
2.1.2 Technologické zkoušky

V této kapitole jsou představeny vybrané technologické zkoušky. Tyto zkoušky patřící do skupiny destruktivní metod se snaží napodobit modelové operace realizované během tváření. Nejsou normované a slouží pouze k porovnání určitých požadovaných vlastností materiálů. Patří sem např. tyto zkoušky:

- klínová zkouška,
- zkouška hlubokotažnosti (podle Erichsena),
- zkouška kombinovaná – hluboké tažení a hloubení,
- zkouška vyboulení,
- zkouška hydrostatickým vypínáním.

Klínová zkouška

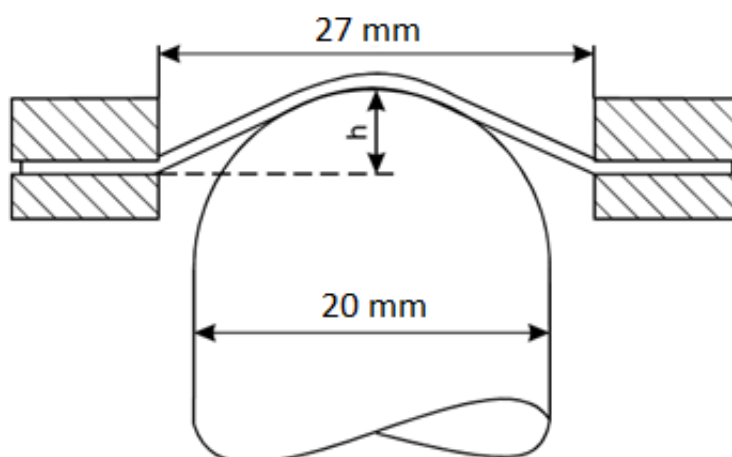
Při této zkoušce je plochá zkušební tyč vtahována do klínovitého průvzlaku. Hlubokotažnost je dána poměrem největší a nejmenší šířky klínu. Tato metoda se také využívá k vyhodnocení náchylnosti k hrubnutí zrn např. hliníkových nebo ocelových plechů. Na obr. 2 je schematicky znázorněn průběh této zkoušky.



Obr. 2: Klínová zkouška [zdroj: vlastní]

Zkouška hlubokotažnosti (podle Erichsena)

Tato zkouška namáhá zkušební vzorek dvouosým tahem. Kruhový přístřih je po obvodu pevně upnut a následně je vzorek vypínán kulovým tažníkem. Zkouška probíhá do okamžiku porušení vzorku. Ukazatelem hlubokotažnosti je v tomto případě velikost hloubky h v momentě vzniku trhliny. Na obr. 3 je schematicky znázorněn průběh zkoušky hlubokotažnosti [7].



Obr. 3: Zkouška hlubokotažnosti [6]

Zkouška kombinovaná – hluboké tažení a hloubení

Jak napovídá název, zkouška kombinuje hluboké tažení a hloubení. V první fázi dojde k hlubokému tažení (tzn. vzorek může být vtahován do tažnice), následuje fáze hloubení (přidržovač sevře vzorek) až do prasknutí vzorku. Zaznamenává se síla působící v jednotlivých fázích. Výstupním parametrem této zkoušky je tzv. přirozený ukazatel hlubokotažnosti T , který se spočte podle rovnice (15).

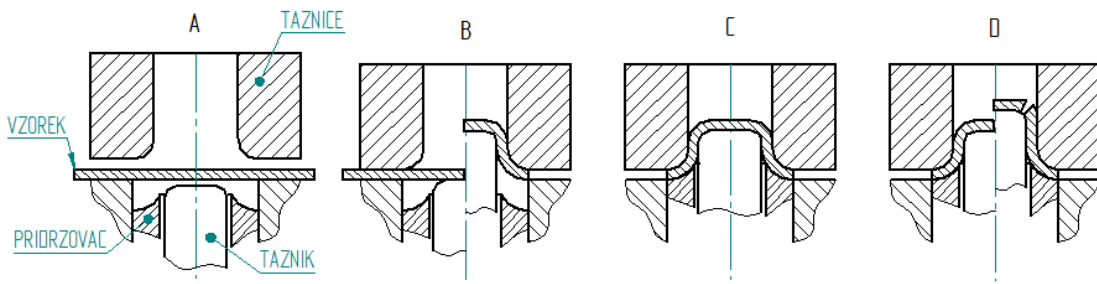
$$T = \frac{(F_{vp} - F_{tmax})}{F_{vp}} \quad (15)$$

Kde značí:

T	- přirozený ukazatel hlubokotažnosti	[1]
F_{vp}	- síla při porušení vzorku	[N]
F_{tmax}	- maximální síla při fázi tažení	[N]

Dobře tvářitelné hlubokotažné materiály mají $T > 0,4$. Na obr. 4 je schematicky znázorněn průběh kombinované zkoušky.

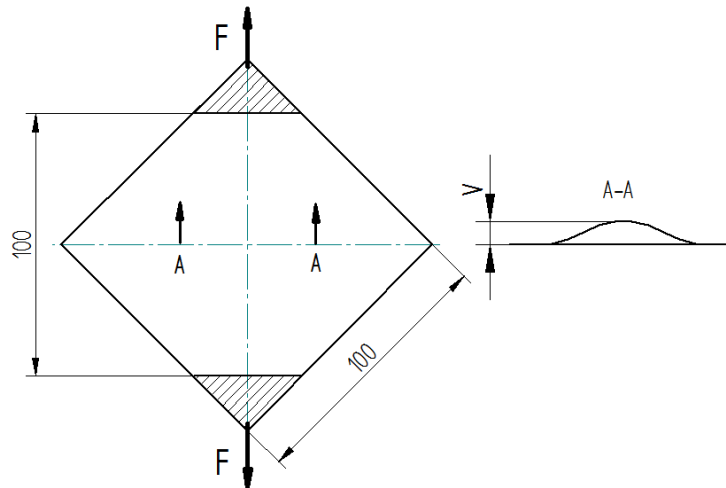
- Probíhající děje:
- A – ustavení vzorku
 - B – tažení
 - C – sevření vzorku přidržovačem
 - D – hloubení do okamžiku vzniku trhliny



Obr. 4: Zkouška kombinovaná [zdroj: vlastní]

Zkouška vyboulení

Zkouška spočívá v napínání čtvercového vzorku podél jeho úhlopříčky, vyhodnocuje se vyboulení v ose vzorku. Schematicky je zkouška znázorněna na obr. 5. Vyboulení je patrné z pohledu na řez A-A, kde je označeno kótou v .

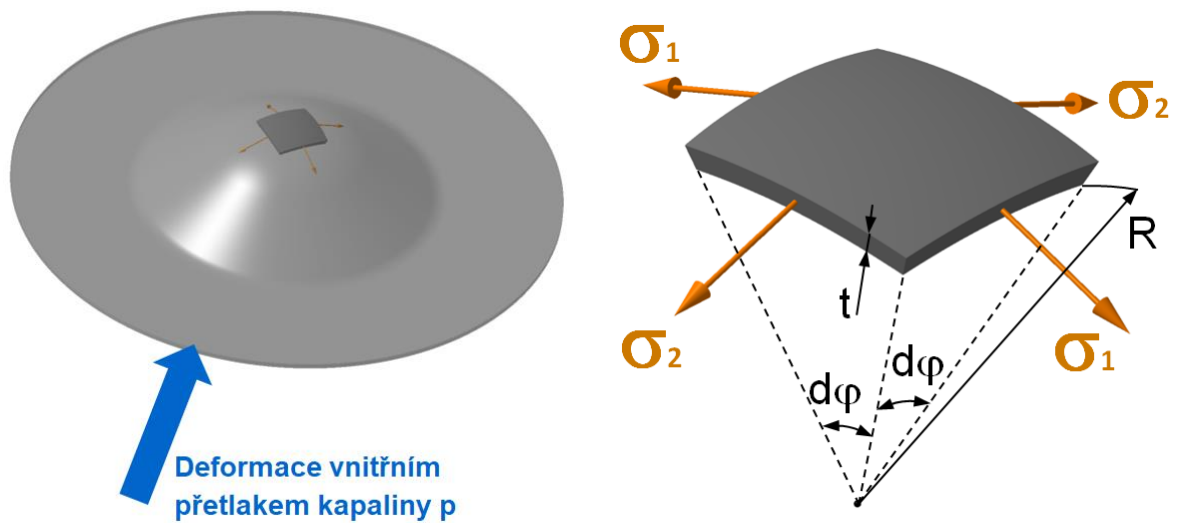


Obr. 5: Zkouška vyboulení [zdroj: vlastní]

Zkouška hydrostatickým vypínáním – Bulge test

Tato zkouška spočívá ve vypínání vzorku přes kruhovou tažnici působením tlaku kapaliny až do vzniku trhliny. Vyhodnocuje se maximální dosažené přetvoření. V porovnání se statickou zkouškou v tahu spočívá rozdíl ve způsobu zatěžování vzorku. Zatímco během statické zkoušky tahem dochází k jednoosému zatěžování, během Bulge testu je vzorek namáhán biaxiálně (rovnoměrné dvouosé zatěžování).

Na obr. 6 je znázorněn element testovaného vzorku spolu s parametry, na základě kterých je možné odvodit napětí v testovaném vzorku během Bulge testu.



Obr. 6: Element testovaného vzorku během Bulge testu

Napětí v materiálu vzorku je odvozeno z následujících vztahů. Základním předpokladem je rovnice (15), která vyplývá za zákona zachování objemu, a po úpravě rovnice (16)

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (15)$$

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (16)$$

Kde značí:

$$\varphi_{1-3} \quad - \text{přirozená deformace} \quad [1]$$

Na základě pravé části obr. 6, kde jsou znázorněny účinky tlaku kapaliny na element vzorku, je sestavena rovnice (17).

$$p * R^2 * d\varphi^2 = 4 * \sigma * \sin \frac{d\varphi}{2} * R * d\varphi * t \quad (17)$$

Kde značí:

p	- tlak kapaliny	[MPa]
R	- zakřivení vzorku	[mm]
φ	- úhel vymežující rozměr elementu vzorku	[rad]
σ	- tahové napětí v materiálu	[MPa]
t	- aktuální tloušťka materiálu	[mm]

Výše uvedenou rovnicí lze zjednodušit do tvaru rovnice (18).

$$p \cdot R^2 = 2 \cdot \sigma \cdot R \cdot t \quad (18)$$

Následně je možné rovnici pro výpočet napětí v materiálu během Bulge testu vyjádřit ve tvaru rovnice (19).

$$\sigma_{HBT} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot t} \quad (19)$$

Kde značí:

σ_{HBT} - napětí v materiálu během Bulge testu [MPa]

Pro vypočtení intenzity napětí σ_i je kromě výše uvedeného nutné také zohlednit tlak kapaliny působící na povrch měřeného vzorku. Na jedné straně je plech namáhán tlakem p , na opačné straně je uvažován nulový tlak. Proto je od hodnoty σ_{HBT} odečítán tlak $p/2$. Tvar rovnice pro výpočet intenzity napětí je uveden jako rovnice (20).

$$\sigma_i = \sigma_{HBT} - p/2 \quad (20)$$

Kde značí:

σ_i - intenzita napětí [MPa]

Intenzita přetvoření φ_i je vypočítávána podle rovnice (21).

$$\varphi_i = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1 \varphi_2 + \varphi_2^2} = -\varphi_3 = -\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (21)$$

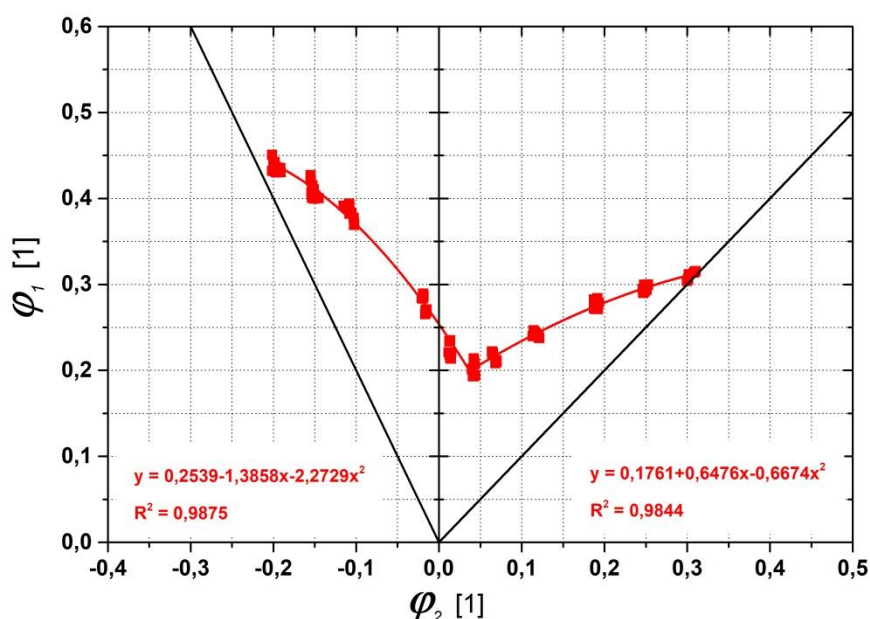
Kde značí:

φ_i - intenzita přetvoření [1]

Výsledky Bulge testu jsou vyhodnocovány na základě těchto rovnic. Příklad použití výpočtů je zachycen v experimentální části práce.

2.1.3 Diagramy mezních přetvoření

Na základě potřeby znalosti maximálního možného přetvoření za různých stavů napjatosti vznikl tzv. diagram mezních přetvoření. V tomto diagramu jsou spojitě zaneseny hodnoty mezního přetvoření pro různé poměry hlavního a vedlejšího přetvoření a to od jednoosého tahu po dvouosé vypínání. Znalost těchto hodnot je klíčová pro veškeré numerické simulace plošného tváření. Ukázka diagramu mezních přetvoření jednoho z materiálů použitých v experimentální části práce je zobrazena na obr. 7.



Obr. 7: Diagram mezního přetvoření materiálu Sandwich [zdroj: vlastní]

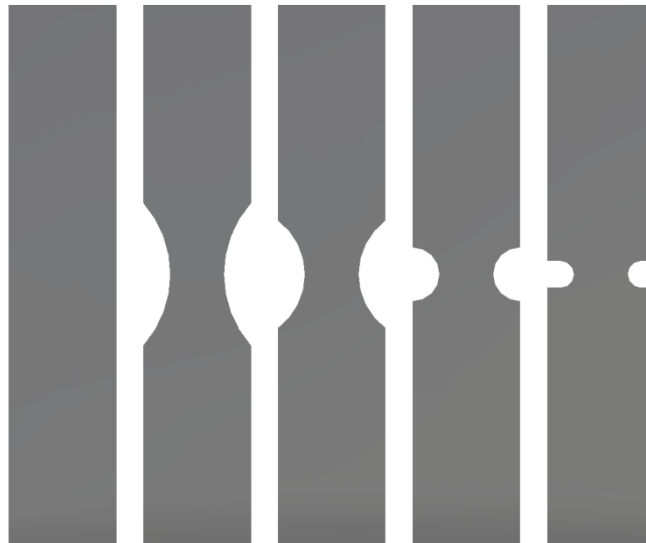
Diagramy mezního přetvoření je možné zjišťovat početně i experimentálně. Mezi početní metody patří např. metoda podle Tomlenova, podle Kellera, nebo podle Goshe a dalších. Všechny tyto početní metody jsou ale založeny na zanedbání určitého vlivu (např. tření, tloušťky materiálu atd.), což způsobuje odchylky od hodnot zjištěných experimentálně. Z tohoto důvodu se diagramy mezních přetvoření určují téměř výhradně experimentálně [8].

Pro experimentální zjišťování diagramů mezních přetvoření také existuje několik metod, z nichž má každá své výhody i nevýhody. Mezi nejčastější metody patří:

- tahová zkouška vzorků s různými vruby,
- vypínání pevným polokulovým tažníkem – Nakazima test,
- zkouška hydrostatickým vypínáním – Bulge test.

Tahová zkouška vzorků s různými vruby

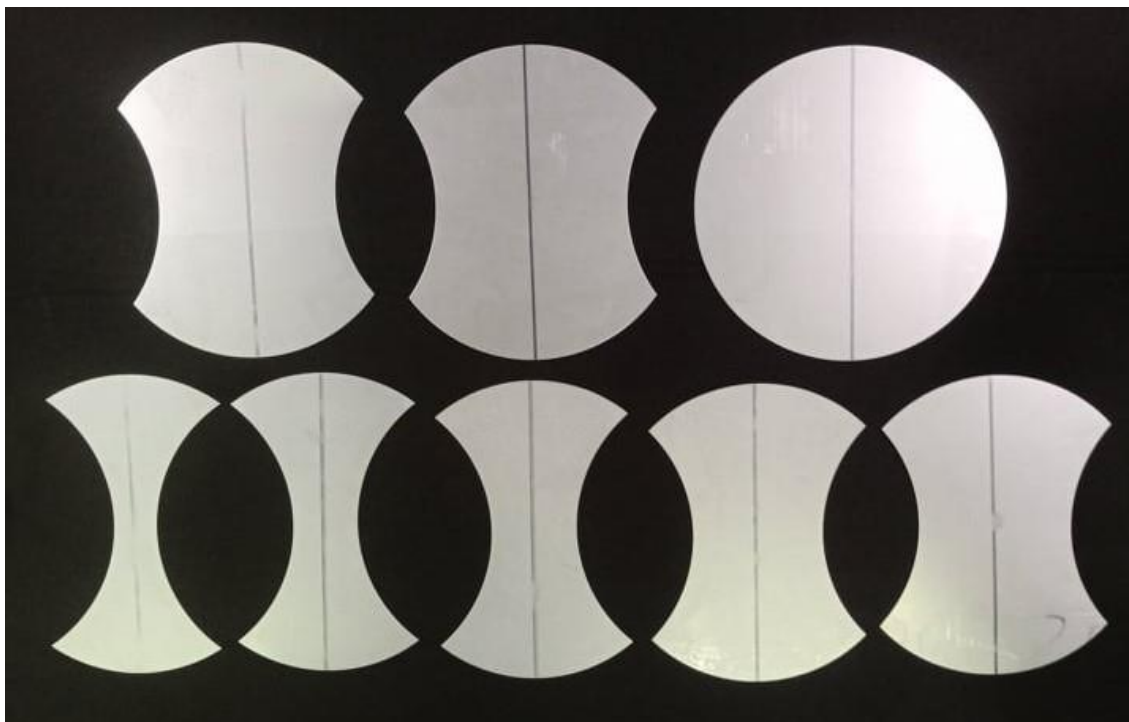
Tato metoda je odvozena ze statické zkoušky tahem. Rozdíl spočívá v úpravě zkušebních vzorků. Zkoušeny jsou vzorky opatřené kruhovými výseky s proměnlivým tvarem a rozměrem, které svým vrubovým účinkem ovlivňují stav napjatosti ve vzorku. Tímto způsobem je možné provést měření pouze levé strany diagramu mezních přetvoření, což je nevýhoda této metody. Naopak výhodou je snadná příprava vzorků. Na obr. 8 jsou zobrazeny vzorky s různými vruby pro tuto zkoušku.



Obr. 8: Tvar vzorků s vruby

Vypínání pevným polokulovým tažníkem – Nakazima test

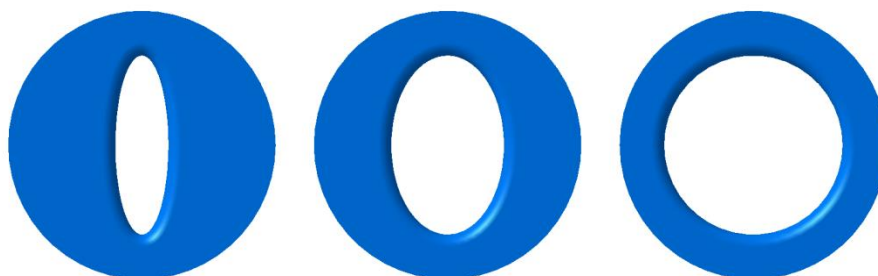
Tato metoda spočívá ve vypínání vzorku skrz kruhovou tažnici. Různých stavů napjatosti se dosahuje vystřiháváním různě velkých prizmatických výseků do původně kruhových vzorků a na rozdíl od ostatních metod je použitelná pro všechny oblasti diagramu mezních přetvoření. Nevýhodou této metody je poměrně složitá příprava vzorků a nutnost eliminace tření pomocí vhodného maziva [8]. Průběh této zkoušky a postup jejího vyhodnocování je popsán normou ISO/DIS 12004-2. Pro zjednodušení přípravy vzorků je možné nahradit prizmatické výseky kruhovými výseky. Příklad použitých vzorků s kruhovými výseky je vidět na obr. 9.



Obr. 9: Příklad použitých vzorků s kruhovými výseky pro Nakazima test [zdroj: vlastní]

Zkouška hydrostatickým vypínáním – Bulge test

Pro pravou stranu diagramu mezních přetvoření je možné v jisté modifikaci použít i výše zmíněnou zkoušku hydrostatickým vypínáním. Různých stavů napjatosti se potom dosahuje pomocí tažení skrz eliptické tažnice, přičemž stav napjatosti je dán poměrem délek hlavní a vedlejší osy elipsy. Výhodou této metody v porovnání s Nakazima testem je eliminace působení tření [8]. Na obr. 10 jsou znázorněny eliptické tažnice pro dosažení různých stavů napjatosti, napravo je zobrazena kruhová tažnice (stav rovnoosého vypínání).



Obr. 10: Eliptické tažnice pro zkoušku hydrostatickým vypínáním

2.2 Materiály používané v automobilovém průmyslu

Pro stavbu karoserie dnešních automobilů se téměř výhradně používají tzv. samonosné karoserie. Skládají se z mnoha dílů, které mohou být vyrobeny z celé řady dostupných materiálů. Použitím různých materiálů může být konstrukce karoserie optimalizována např. z hlediska tuhosti, hmotnosti nebo výrobních nákladů. Na obr. 11 je pro ukázkou zobrazena karoserie automobilu.



Obr. 11: Karoserie automobilu [9]

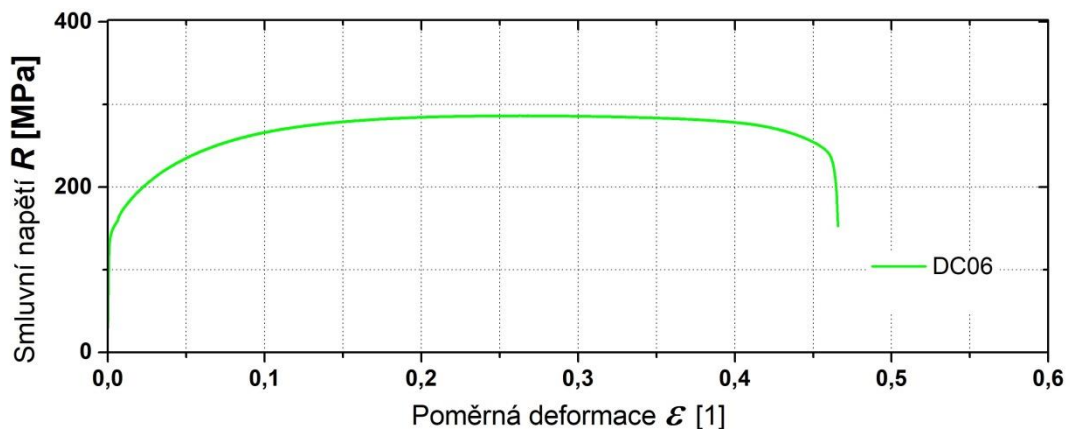
Jak je z obr. 11 patrné, při stavbě karoserie je používáno množství různých materiálů, zejména s ohledem na požadovanou pevnost a vyrobitelnost dílu. Ty jsou téměř výhradně tvářeny z přístřihů, tudíž je při volbě vhodného materiálu hlavním ze sledovaných parametrů jeho tvářitelnost. V následujících podkapitolách této práce jsou představeny nejčastěji používané materiály pro stavbu karoserie [10].

2.3 Hlubokotažné oceli

Jedním ze základních faktorů, které nejvíce ovlivňují tvářitelnost plechu, je chemické složení. Z hlediska chemického složení obsahují oceli určené pro hluboké tažení kromě uhlíku také doprovodné prvky jako mangan, chrom, nikl nebo molybden, dále pak malé množství síry, fosforu a křemíku [11].

Dalším z významných faktorů ovlivňujících tvářitelnost je mikrostruktura oceli. Základní strukturou je ferit a cementit, přičemž zrna cementitu se mohou vyloučit v různých formách. Z hlediska tváření je nejvýhodnější cementit vyloučený ve formě globulí a to co nejrovnoměrněji v základní feritické matici. Dále je důležitá homogenní velikost zrn, aby bylo dosaženo co nejrovnoměrnější deformace plechu [11].

Dále je vhodnost plechu pro hluboké tažení do značné míry dána mechanickými vlastnostmi. Nejdůležitějšími z nich jsou mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce, exponent deformačního zpevnění a poměr meze kluzu a meze pevnosti. Přibližné mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí bývají následující: $R_e < 190$ MPa, $R_m > 270$ MPa, $A_{80mm} > 36$ %, $R_e/R_m < 0,7$. Vliv má také tvar křivky zpevnění, pro tváření je výhodný průběh bez výrazné horní a dolní meze kluzu. Na obr. 12 je znázorněn smluvní tahový diagram hlubokotažného materiálu DC06 [11].



Obr. 12: Smluvní tahový diagram mat. DC06 [zdroj: vlastní]

2.3.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem byly až donedávna nejpoužívanějším materiálem pro stavbu karoserie automobilu. Obsahují velmi malé množství uhlíku (řádově stovky ppm) a díky výborné tváritelnosti jsou vhodné pro tvarově složité výlisky [12].

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem se dělí na základě kvality (dána chemickým složením, mechanickými vlastnostmi, způsobem výroby) do několika skupin:

- **CQ** (Comercial Quality) – plechy běžné kvality,
- **DQ** (Drawing Quality) – tažné plechy,
- **DDQ** (Deep Drawing Quality) – hlubokotažné plechy,
- **EDDQ** (Extra Deep Drawing Quality) – zvlášť hlubokotažné plechy,
- **EDDQ – S** (Extra Deep Drawing Quality - Super) – super hlubokotažné plechy [12].

Značení hlubokotažných materiálů je dáno normou EN 10 142. V tab. 1 jsou zapsány mechanické vlastnosti pro jednotlivé skupiny hlubokotažných materiálů dle normy EN 10 142.

Tab. 1: Mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí uklidněných hliníkem [12]

Označení	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_{80mm} [%]	r_α [1]	n [1]	UH [1]	KUT [1]
DX 51 D (DDQ)	240-260	26-30	1,0-1,2	0,14-0,16	1,2-1,3	30-40
DX 52D (DDQ)	220-240	30-36	1,2-1,4	0,16-0,18	1,3-1,4	40-50
DX 53 D (DDQ)	200-220	36-38	1,4-1,6	0,18-0,20	1,4-1,5	50-57
DX 54 D (EDDQ)	180-200	38-40	1,6-1,8	0,20-0,22	1,5-1,67	57-67
DX 56 D (EDDQ – S)	<180	>40	>1,8	>0,22	>1,67	>67

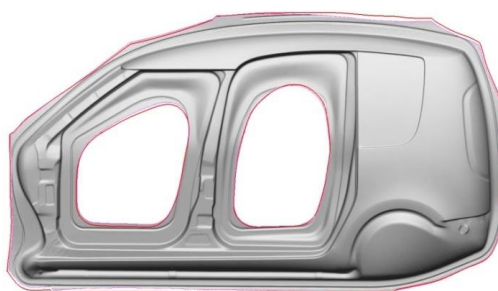
Pro zvýšení pevnosti jsou oceli legovány P, nebo mikrolegovány MN, Si, Al, V, Ti apod. Hlubokotažné plechy nejsou vhodné pro úpravu při zvýšených teplotách, např. žárovým zinkováním, protože podléhají stárnutí, čímž dochází ke snižování jejich mechanických vlastností. Takto zpracované materiály mohou pak nejvýše dosahovat stupně tvářitelnosti skupiny DDQ. Reakcí na tuto nevýhodu je vyvinutí tzv. ocelí bez intersticií – tzv. IF ocelí [12, 13].

2.3.2 Plechy z IF (Interstitials Free) ocelí

Tento typ ocelí obsahuje velmi malé množství intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku, což má za následek výbornou tvářitelnost a relativně nízkou pevnost. IF oceli bývají mikrolegovány titanem a niobem. Tyto legury na sebe vzájemnými vazbami vážou zbytkové množství uhlíku a dusíku, čímž dochází ke vzniku karbidů (TiCN, NbCN). Vznik těchto legur je doprovázen zvýšením pevnosti při zachování plastičnosti materiálu [12, 13].

Výhodou IF ocelí je schopnost po válcování za studena dosahovat vysokého deformačního zpevnění a tvářitelnosti. Dále jsou velmi odolné proti stárnutí a jsou tedy vhodné i pro technologii žárového zinkování nebo žihání [12].

Mez pevnosti R_m se pohybuje mezi 120 – 290 MPa. Díky zmiňovaným mechanickým vlastnostem jsou plechy z IF ocelí vhodné pro výrobu tvarově složitých dílů, jako jsou např. blatníky, rámy dveří apod. Příklad možné aplikace plechů z IF ocelí je na obr. 13 [14].



Obr. 13: Díl vyráběný z IF ocelí [15]

2.3.3 Plechy z IF ocelí s BH (Bake Hardening) efektem

Pro klasické IF oceli bez intersticií je typická nízká mez kluzu, která je z hlediska tuhosti vyráběného dílu nevýhodou. Tento nežádoucí jev lze eliminovat tzv. BH efektem (Bake Hardening). Vlivem ohřevu dochází u ocelí s BH efektem ke zvýšení meze kluzu, přičemž tento ohřev lze výhodně realizovat např. při vypalování laku karoserie. Ohřevem při vypalování laku dochází v materiálu k precipitaci karbidů a nitridů, čímž se zvyšuje mez kluzu o 30 – 80 MPa. Kromě velikosti obsahu uhlíku, manganu a síry je velikost zpevnění dána historií tváření a parametry rekrystalizačního žhání [12, 14].

Jak již bylo zmíněno, IF oceli s BH efektem jsou velice dobře tvářitelné za studena a jsou tedy vhodné pro velkoplošné výlisky. Uplatnění nacházejí zejména při lisování dílů jako jsou např. střechy, dveře a kapoty automobilů. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou v tab. 2 [12, 14].

Z hlediska obsahu legur jsou rozlišovány dvě základní skupiny těchto ocelí:

- **BH oceli se zvýšeným obsahem uhlíku,**
- **BH oceli se zvýšeným obsahem titanu, resp. niobu.**

BH oceli se zvýšeným obsahem uhlíku

Díky nižšímu obsahu titanu a niobu zůstává část intersticiálně rozpuštěného uhlíku i po válcování za tepla nevázána na vzniklé karbidy legur. BH efektu je díky tomu možné dosáhnout při nižších teplotách ohřevu. Ve struktuře tohoto typu ocelí se nachází určité množství nevázaného uhlíku, proto oceli tohoto složení nedosahují vysoké hlubokotažnosti. Plechy z BH ocelí se zvýšeným obsahem uhlíku mají nižší koeficient plastické anizotropie r než běžné plechy z IF ocelí [12, 14].

BH oceli se zvýšeným obsahem titanu, resp. niobu

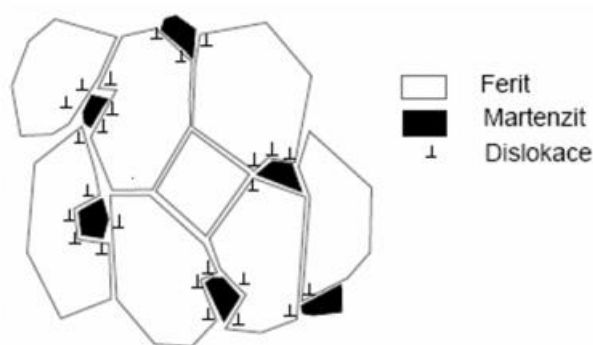
Díky zvýšenému obsahu legur titanu a niobu je veškerý uhlík obsažený v oceli vázán ve formě karbidonitridických precipitátů, což těmto ocelím zajišťuje vynikající hlubokotažnost. Vytvrzovacího efektu se dosáhne rozpuštěním těchto precipitátů při vysokoteplotním žhání a následným ochlazením. Velikost vytvrzení je přímo úměrná žhací teplotě a rychlosti ochlazování. Vzhledem k ohřevu na vyšší teploty je vytvrzování těchto ocelí nákladnější v porovnání s BH oceli se zvýšeným obsahem uhlíku [12].

2.4 Pevnostní materiály

Vzhledem ke stále přísnějším emisním normám je neustále vyvíjen tlak na snižování hmotnosti automobilů. Přírozená cesta ke snížení hmotnosti vede přes snižování množství použitých materiálů a to zejména redukcí jejich tloušťky. Aby byla zachována tuhost a tedy i bezpečnost konstrukce, musí se tyto redukce kompenzovat zvyšováním pevnosti konstrukčních materiálů, což negativně ovlivňuje tváritelnost. Pro splnění těchto protichůdných požadavků byly vyvinuty tzv. vysokopevnostní oceli, které využívají různé mechanismy zpevnění (např. zpevnění tuhého roztoku, precipitační, deformační nebo transformační zpevnění). Mezi nejrozšířenější skupiny těchto ocelí patří DP, TRIP a CP oceli. Dále TWIP oceli a martenzitické oceli. Výrazného zpevnění dosahují oceli těchto typů zejména díky strukturnímu zpevnění.

2.4.1 DP (Dual Phase) oceli

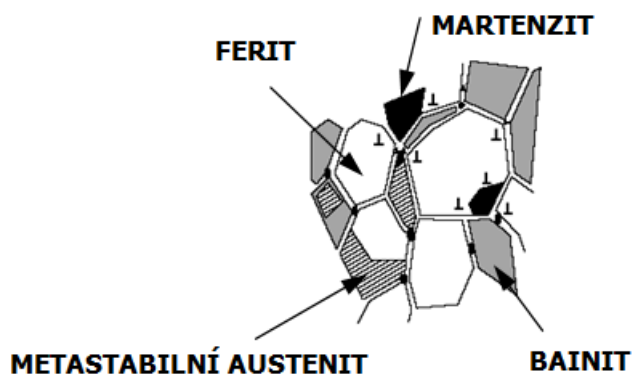
DP oceli jsou nízkouhlíkové oceli na bázi Mn-Si. Struktura se skládá z feritické matrice a menších oblastí austenitu. Feritická oblast zaujímá přibližně 70 – 90 % objemu, tvrdá martenzitická oblast přibližně 10 – 30 %. Feritická matrice umožňuje dobrou tváritelnost, oblasti martenzitu zase pevnost (přibližně 500 – 600 MPa). Materiál dále obsahuje vyšší množství uhlíku pro zlepšení kalitelnosti. Tvářecí proces je usnadněn nižším poměrem R_e/R_m v porovnání s vysokopevnými mikrolegovanými oceli. DP oceli dosahují vysokého zpevnění i při malém stupni deformace. V případě, že je vytvrzení oceli způsobeno pouze martenzitem, dochází ke ztrátě pevnosti již při ohřevu nad 300°C. Díky svým vlastnostem nalézá tento typ ocelí využití např. při výrobě disků kol. Na obr. 14 je zobrazena struktura DP oceli. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou v tab. 2 [12, 14].



Obr. 14: Struktura DP oceli [16]

2.4.2 TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli

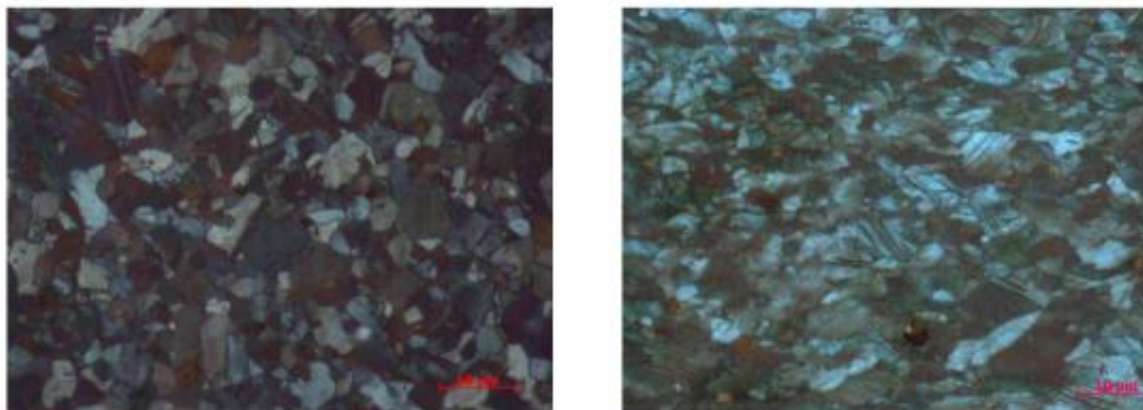
TRIP oceli jsou oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Jsou to nízkouhlíkové oceli legované Mn a Si s feriticko – bainitickou strukturou, které dále obsahují přibližně 6 – 10 % zbytkového austenitu. Po válcování plechů za tepla je plech prudce ochlazen na vzduchu a dále tepelně zpracuje, čímž vznikne výše zmiňovaná struktura. Ke zpevnění dochází během tváření, při kterém dojde k transformaci zbytkového austenitu na martenzit. Po zpevnění dosahují tyto materiály pevnosti až 900 MPa. V oblasti automobilového průmyslu jsou vhodné pro použití na výztuhy karoserie a další prvky s požadavkem na vyšší pevnost. Na obr. 15 je zobrazena struktura TRIP oceli. Mechanické vlastnosti tohoto typu ocelí jsou v tab. 2 [12, 14].



Obr. 15: Struktura TRIP oceli [12]

2.4.3 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

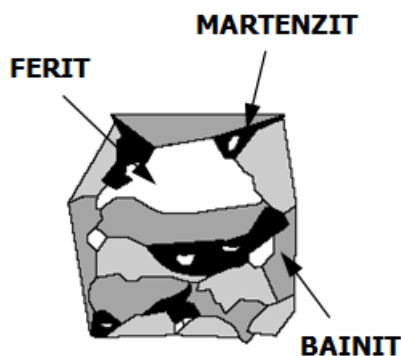
TWIP oceli jsou oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním. Jsou to uhlíkové oceli s austenitickou strukturou za každé teploty, které jsou legovány manganem (15 – 25 %) a dalšími prvky jako jsou např. hliník nebo křemík. Mají vysokou pevnost (až 1200 MPa) a díky své struktuře lze při jejich zpracování dosahovat velmi vysoké tažnosti (až 82 %). Na dosažitelnou tažnost má rozhodující vliv rychlost deformace, pro dosažení uvedené tažnosti musí deformace probíhat při velmi malých rychlostech. Základním deformačním mechanismem TWIP ocelí je dvojčatění. Na obr. 16 je zobrazena struktura TWIP oceli [12, 17].



Obr. 16: Struktura TWIP oceli před deformací (vlevo) a po deformaci (vpravo) [18]

2.4.4 CP (Complex Phase) oceli

CP oceli jsou nízkouhlíkové oceli s feritickou matricí s oblastmi bainitu a martenzitu. Jsou mikrolegovány niobem, titanem či vanadem. Zvýšené pevnosti je u tohoto typu ocelí dosahováno tzv. strukturním zpevněním, které je založené na zavádění různých strukturních složek (s různými pevnostmi a disperzitou) do matrice. Při vhodném deformačně-tepelném zpracování mohou CP oceli dosahovat pevnosti až 1100 MPa. Vhodným chemickým složením je možné dosáhnout i BH efektu (zvýšení meze kluzu může dosahovat až 115 MPa). Výsledná struktura je velmi jemnozrná a materiál je vhodný pro dynamicky zatěžované součásti. Na obr. 17 je zobrazena struktura CP oceli. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou v tab. 2 [13].

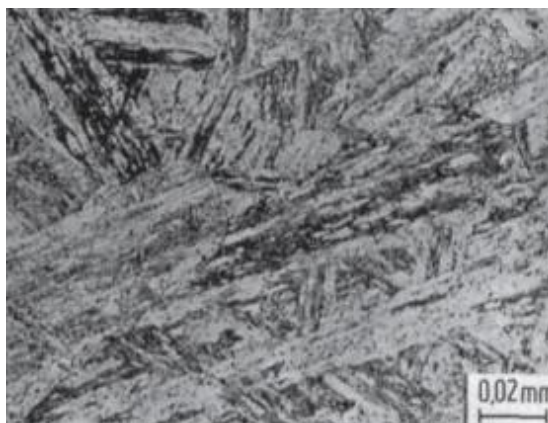


Obr. 17: Struktura CP oceli [12]

2.4.5 Martenzitické oceli

Strukturu martenzitických ocelí tvoří martenzit s malými oblastmi feritu a pevnost těchto ocelí může dosahovat až 1300 MPa. Legované bývají zpravidla manganem, křemíkem, chromem, molybdenem nebo vanadem či niklem. Martenzitické struktury se dosahuje snížením válcovací teploty při výrobě plechu. Při snížení válcovací teploty se nejdříve dosahuje feriticko-bainitické struktury, při výraznějším snížení teploty dosahujeme požadované martenzitické struktury. I přes vysokou pevnost lze tyto materiály do určité míry tvářet za studena, což je umožněno malými oblastmi feritu.

Po tváření v oblasti austenitu lze řízeným ochlazováním docílit čistě martenzitické struktury a tím i vyšší pevnosti (až 1600 MPa). Na obr. 18 je zobrazena struktura martenzitické oceli. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou v tab. 2 [12, 13].

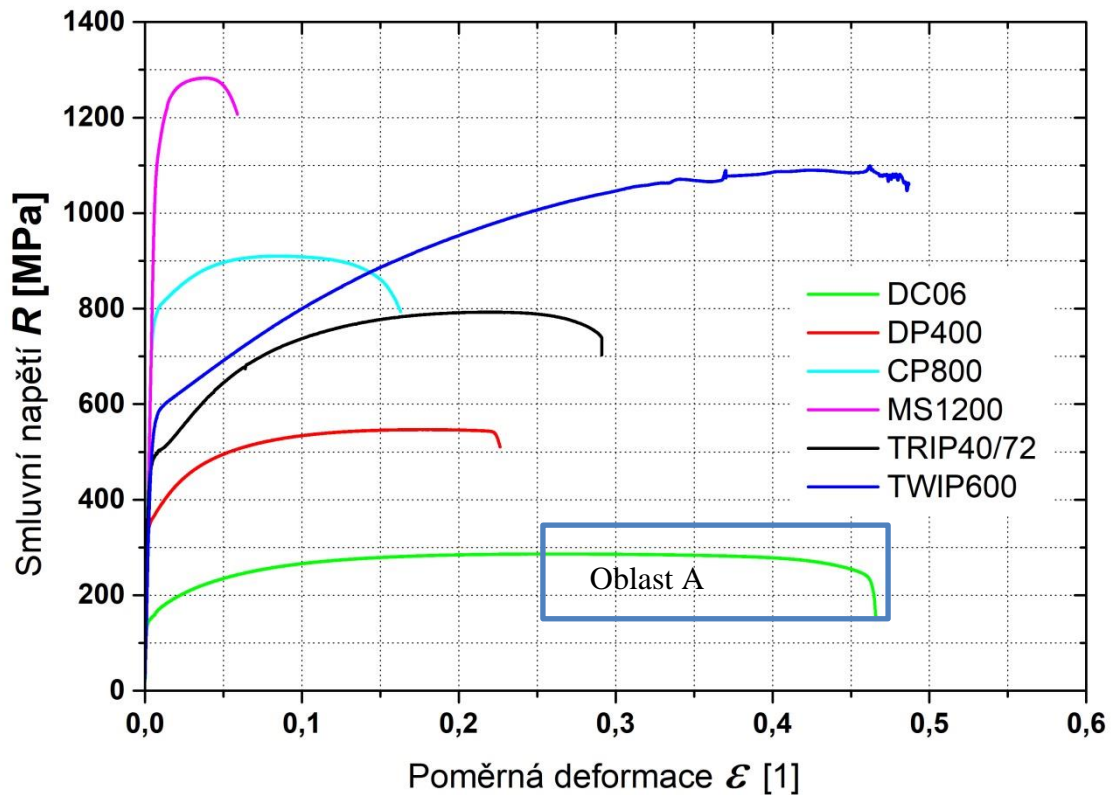


Obr. 18: Struktura martenzitické oceli [19]

Tab. 2: Vlastnosti vybraných materiálů

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]
IF oceli	120-140	250-290	20-45
BH oceli	200-300	350-450	min. 36
DP oceli	270-460	500-600	18-25
TRIP oceli	400-700	600-1000	22-26
MS oceli		1000-1650	min. 8
CP oceli	680-700	800-1050	min. 10

Na obr. 19 jsou zobrazeny křivky zpevnění vybraných materiálů. V legendě grafu jsou jednotlivé křivky popsány.



Obr. 19: Křivky zpevnění vybraných materiálů

Z obrázku je patrné, že hlubokotažný materiál (zelená křivka) je možné dál tvářet i po překročení meze pevnosti, aniž by došlo k jeho poškození, tedy v oblasti A. Tato vlastnost je charakterizována pomocí tzv. zásoby plasticity ZP a je výhodně využívána. Na druhou stranu pevnostní materiál (např. MS1200) tuto vlastnost nemá a je tedy třeba dbát na to, aby při tvářeni nedošlo k překročení meze pevnosti.

2.4.6 HSLA (High Strength Low Alloy) oceli

Oceli typu HSLA jsou mikrolegované oceli a to buď za účelem vyšší pevnosti nebo vyšší korozní odolnosti v porovnání s konvenčními uhlíkovými oceli. Obsah uhlíku se pohybuje od 0,05 % do 0,5 %. Obsah legur bývá od 0,01 % do 0,1 %, výjimkou je mangan s obsahem až 2 % v závislosti na požadované svařitelnosti a tvářitelnosti. Mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 350 – 650 MPa. Zvýšené pevnosti v porovnání s konvenčními uhlíkovými oceli je dosaženo jemnozrnnou strukturou dosahovanou

řízeným válcováním a precipitačním vytvrzením díky přítomnosti V, Nb, Ti a dalších prvků. Materiál spadající do této skupiny ocelí byl v praktické části této práce vybrán jako porovnávací materiál, konkrétně se jednalo o materiál HC 300LAD [12].

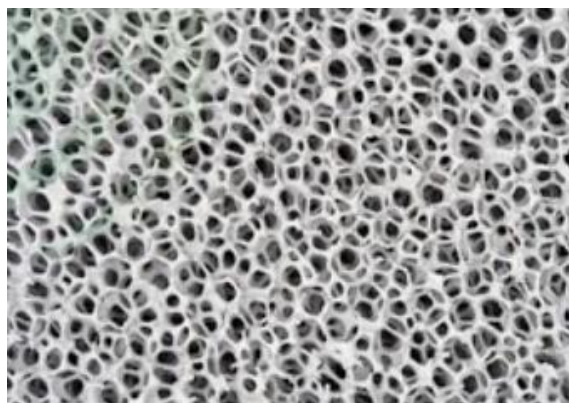
2.5 Nekonvenční materiály

K vývoj nekonvenčních materiálů dochází důsledkem neustále se zvyšujících nároků na veškeré materiály používané v automobilovém průmyslu. Nekonvenční materiály většinou dosahují specifických vlastností, kterých je dosahováno např. kombinací různých materiálů, nestandardním zpracováním atd. Níže jsou popsány následující materiály patřící do skupiny nekonvenčních materiálů:

- kovové pěny,
- svařované přístřihy,
- vývalky s proměnnou tloušťkou,
- sendvičové materiály.

2.5.1 Kovové pěny

Kovové pěny jsou materiály, které jsou lehčené vzduchovými bublinami. Struktura takovéto pěny je zobrazena na obr. 20. Dutiny v kovu vznikají např. přidáním hydridu titanu do taveniny kovu. Jednou z nesporných výhod je nízká hustota výsledného produktu (za předpokladu, že je hmotnost přepočtena na objem vymezený vnější obálkou tohoto produktu) dále pak tento typ materiálu vykazuje dobré tlumící účinky a zachovává si vlastnosti kovu. Kovové pěny jsou téměř výhradně vytvářeny z hliníkových slitin [20].



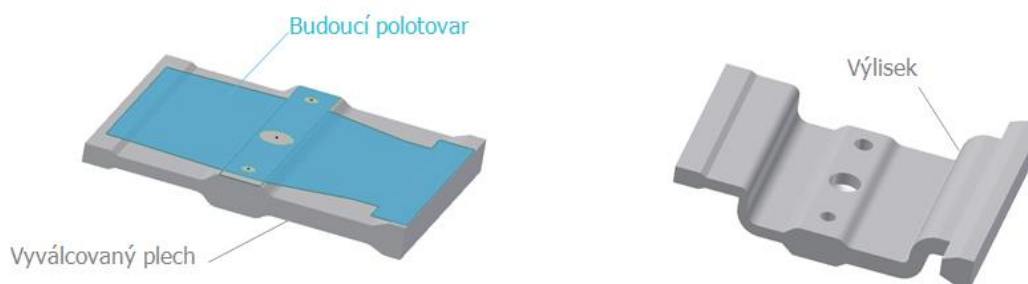
Obr. 20: Struktura hliníkové pěny [21]

2.5.2 Svařované přístřihy - TWB (Tailored Welded Blanks)

Svařované přístřihy, označované jako TWB (Tailored Welded Blanks), jsou přístřihy „šité na míru“. Skládají se z dvou či více částí, které jsou spojovány většinou svařováním – nejčastěji laserovým, vysokofrekvenčním nebo elektronovým paprskem. Dílčí plechy mohou mít různé tloušťky, vlastnosti či jakost. Výhodou svařovaných přístřihů je možnost kombinovat jejich vlastnosti v rámci jednoho budoucího výlisku [12].

2.5.3 Vývalky s proměnnou tloušťkou - TRB (Tailored Rolled Blanks)

Vývalky s proměnnou tloušťkou, označované jako TRB (Tailored Rolled Blanks), jsou plechy dosahující různých tlouštěk s ohledem na požadavky na výsledný výlisek. Výhodou takto připravených výlisků je úspora materiálu, která může dosahovat až 16 %. Výhodou v porovnání se svařovanými přístřihy je absence tepelně ovlivněného pásma svařováním a plynulý přechod mezi tloušťkami [12]. Na obr. 21 je zobrazen vývalek proměnné tloušťky.



Obr. 21: Vývalek proměnné tloušťky [12]

2.5.4 Sendvičové materiály

Sendvičový materiál se obecně skládá ze dvou či více typů materiálů, které jsou na sebe vrstveny. V závislosti na poměru tlouštěk jednotlivých vrstev a jejich vlastností mohou sendvičové materiály dosahovat různých specifických vlastností. V automobilovém průmyslu jsou vzhledem k výsledným vlastnostem rozlišovány dvě základní skupiny sendvičových materiálů:

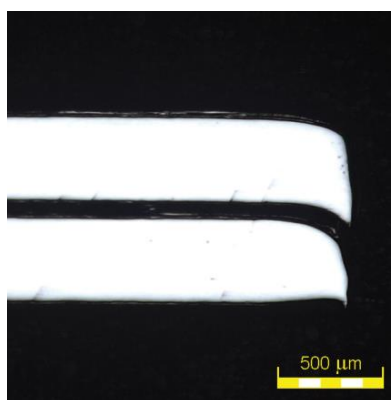
Lehké a tuhé:

Jako vzorový zástupce této skupiny může posloužit sendvičový plech *ocel-polypropylen-ocel* o tloušťce 0,75 mm. Jednotlivé vrstvy mají tloušťky přibližně 0,25 - 0,25 - 0,25 mm, Tento sendvičový materiál dosahuje podobných mechanických vlastností jako plech o síle 0,7 mm. Úspora hmotnosti při stejných mechanických vlastnostech tedy odpovídá přibližně 25 % [12].

Akustické:

Jako vzorový zástupce této skupiny může posloužit sendvičový plech *ocel-polypropylen-ocel* o tloušťce 0,85 mm. V porovnání s předchozí skupinou je plastová vrstva mnohem tenčí. Jednotlivé vrstvy mají tloušťky přibližně 0,4 - 0,05 - 0,4 mm. Tento typ materiálu má výborné akustické vlastnosti, resp. se dá použít jako zvuková bariéra. Lze jej tedy výhodně používat např. pro snížení hladiny hluku uvnitř skeletu automobilu [12].

Experimentální část této práce se zabývá sendvičovým materiálem vzniklým spojením dvou ocelových plechů, mezi které je vsazena plastová folie. Tato folie je k ocelovým plechům lepena. Na obr. 22 je zobrazen průřez tímto sendvičovým plechem. Konkrétně se jedná o materiál CR270Y340T-LA.



Obr. 22: Řez sendvičovým plechem [zdroj: vlastní]

Z hlediska zpracování nabízejí sendvičové plechy podobné možnosti jako konvenční plechy – lze je stříhat, ohýbat, táhnout atd. Problematické jsou ale technologie, při kterých dochází k ohřevu materiálu, např. svařování. Problémy ale mohou nastat i při vypalování laku karoserie, které probíhá přibližně při 170°C. Vlivem působení tepla může dojít k natavení plastového jádra sendvičového materiálu a následně může začít plast stékat, čímž významně sníží mechanické vlastnosti sendviče. Tuto nevýhodu lze

eliminovat nahrazením plastové folie např. kovovou pěnou, případně jiným vhodným materiálem [12, 22, 23].

Jak již bylo výše uvedeno, sendvičové materiály je možné zpracovávat podobně jako konvenční materiály např. stříháním nebo tvářením, což umožňuje jejich postupné zavádění do výrobních procesů. Zaváděny jsou zejména tam, kde lze vhodně využít jejich výhody, tedy výborné akustické vlastnosti nebo snížení hmotnosti při zachování tuhosti výsledného dílu. Takovéto díly mohou být například součásti kabinového prostoru automobilu, kapoty, podběhy kol apod. Jedna z možností použití sendvičových materiálů je zobrazena na obr. 23 [22–24].



Obr. 23: Možnost použití sendvičových materiálů [24]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na základě zadání diplomové práce byla v její experimentální části hodnocena tvářitelnost dvou materiálů, které se používají v automobilovém průmyslu. V prvním případě se jednalo o nový vývojový materiál Sandwich, který se využívá pro své výborné akustické vlastnosti a ve druhém případě o porovnávací materiál z mikrolegované oceli. Oba materiály byly hodnoceny na základě těchto zkoušek:

- statická zkouška tahem,
- zkouška hydrostatickým vypínáním – tzv. Bulge test,
- vypínání pevným polokulovým tažníkem – tzv. Nakazima test,
- porovnání tvaru střížné hrany.

3.1 Zkoušené materiály

Sandwich

Označení materiálu: CR270Y340T-LA –EG47/47-E-R-O (označení dle normy VW 50065), dále bude označován jako Sandwich

Kde značí:

CR	za studena válcovaná ocel
270Y	min. mez kluzu 270 MPa
340T	min. mez pevnosti 340 MPa
LA	nízko/mikrolegovaná ocel (low alloy/micro-alloyed steel)
EG	elektrolyticky nanášený ochranný zinkovaný povlak
47/47	množství zinku (g/m^2)
E	určeno pro povrchové díly karoserie
R	zvýšený požadavek na drsnost
O	olejováno

Sandwich je složen ze dvou vrstev ocelového plechu o tloušťce 0,4 mm, mezi kterými je vrstva plastové folie o tloušťce 0,1 mm

Počáteční tloušťka materiálu je $0,890 \pm 0,008$ mm a byla stanovena z 10 měření na 5 různých vzorcích.

Mikrolegovaná ocel (porovnávací materiál)

Označení materiálu: HC 300LAD + Z100 MBO (označení dle normy EN 10346), dále bude označován jako HC 300LAD

Kde značí:

H	produkt určený pro tváření za studena
C	za studena válcovaná ocel
300	Mez kluzu
LA	nízko/mikrolegovaná ocel (low alloy/micro-alloyed steel)
D	určeno pro žárové pozinkování
Z	žárově nanášený ochranný povlak zinku
100	množství zinku (g/m^2)
MBO	zvýšená kvalita povrchu, plech olejován

Počáteční tloušťka materiálu je $0,815 \pm 0,006$ mm a byla stanovena z 10 měření na 5 různých vzorcích.

3.2 Statická zkouška tahem

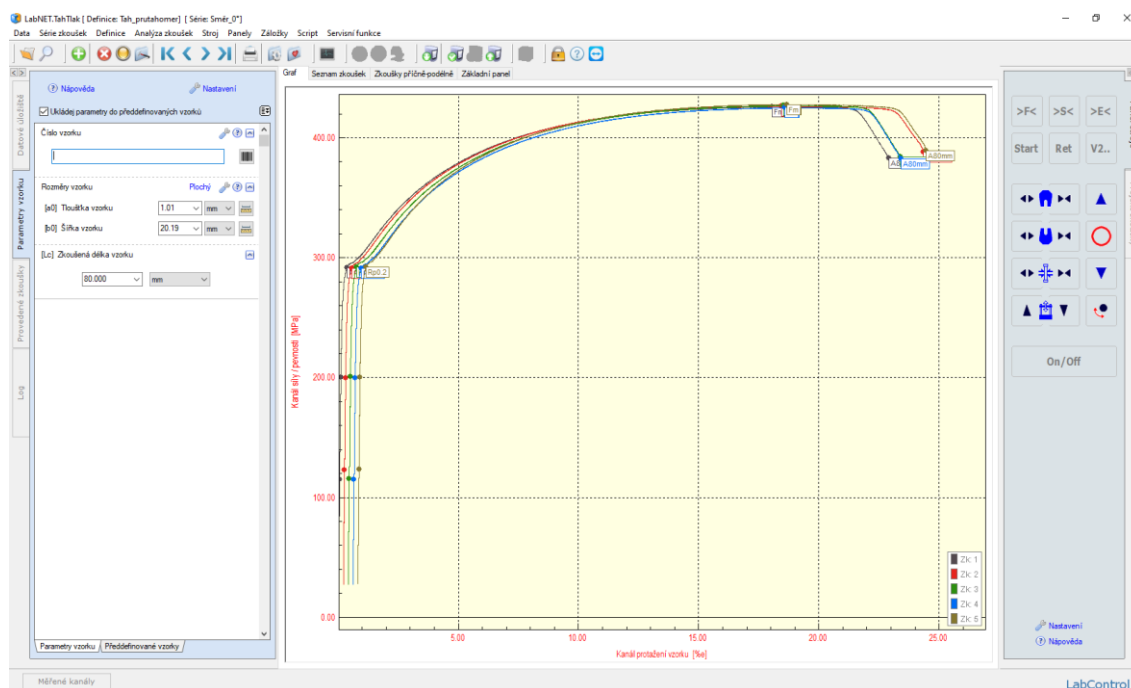
3.2.1 Měření mechanických vlastností při jednoosém namáhání

Základní mechanické hodnoty testovaných materiálů byly stanoveny statickou zkouškou tahem vždy ze souboru 5 vzorků. Zkušební vzorky byly odebrány ve směrech 0° , 45° a 90° vzhledem ke směru válcování. Tvar a rozměry zkušebních tyčí byly voleny v souladu s normou ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební vzorky testovaných materiálů byly zhotoveny stříháním s následným broušením střížných ploch. Metodika provedení a vyhodnocení statické zkoušky tahem byla v souladu s výše uvedenou normou ČSN EN ISO 6892-1. Statická zkouška tahem byla provedena na stroji TIRA Test 2300 s použitím softwaru Labtest 4.9 pro zpracování naměřených dat a vyhodnocení základních charakteristik ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , A_{80mm} , E a součinitele plastické anizotropie r). Součinitel plastické anizotropie r byl zjišťován v intervalu deformace $\varepsilon = 5\%$ až 15% .

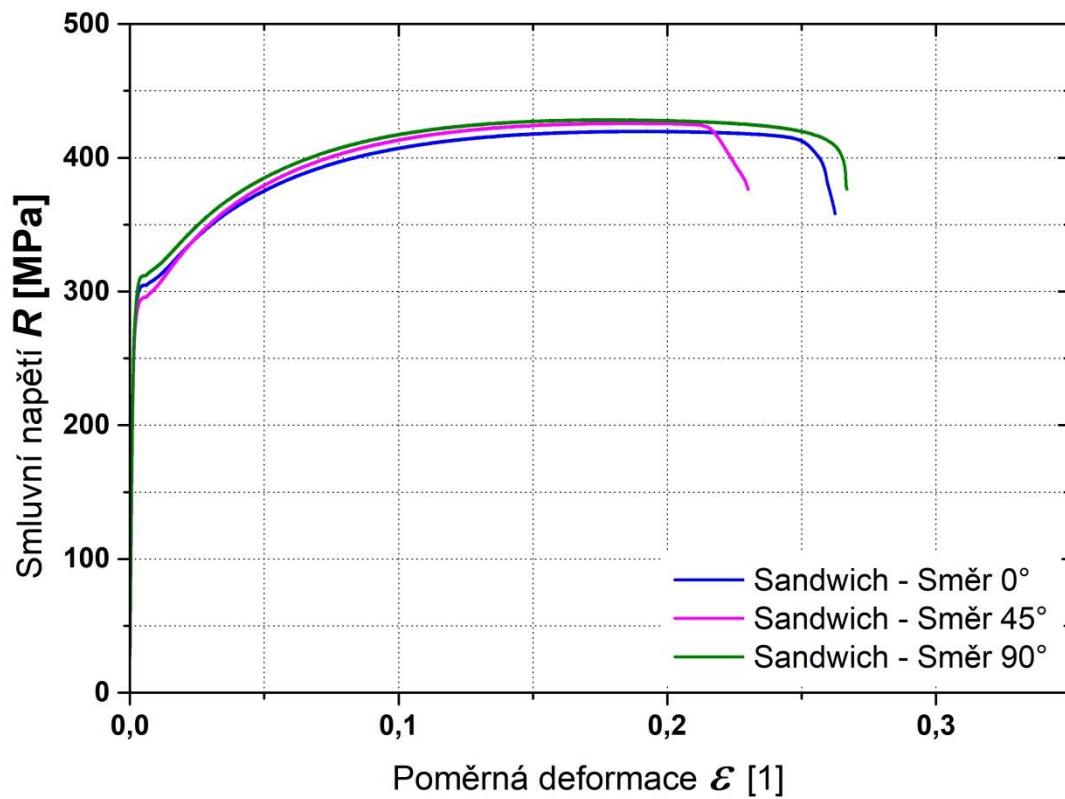
Prostředí softwaru Labtest 4.9 je vidět na obr. 24. Prostředí software Labtest 4.9 umožňuje zadání veškerých vstupních parametrů nutných pro výpočet výstupních hodnot a zároveň definici podmínek zkoušky, jako je rychlost posuvu příčnicku (definice deformace zkušební vzorku), velikost předpětí atd. Dalšími parametry zadávanými do softwaru jsou

kritéria ukončení zkoušky. Pro konkrétní experimenty byla v souladu s výše uvedenou normou volena proměnná rychlost posuvu příčnicku. Do meze kluzu byla volena rychlost 1 mm/min, po dosažení této hodnoty se rychlost plynule zvyšovala až na hodnotu 15 mm/min. Grafy naměřených průběhů zkoušek pro oba testované materiály jsou vidět na obr. 25 (pro materiál Sandwich) a na obr. 26 (pro materiál HC 300LAD), kde jsou uvedeny vždy průměrné křivky v jednotlivých směrech odebrání vzorků – 0°, 45° a 90° vůči směru válcování. Protokoly statické zkoušky tahem pro všechny testované vzorky jsou uvedeny v příloze diplomové práce pod označením P1 až P6.

Hodnoty materiálových charakteristik zjištěných výše popsáním způsobem byly zpracovány do tab. 3 a tab. 4, kde jsou uvedeny střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru získané vždy z měření pěti vzorků.



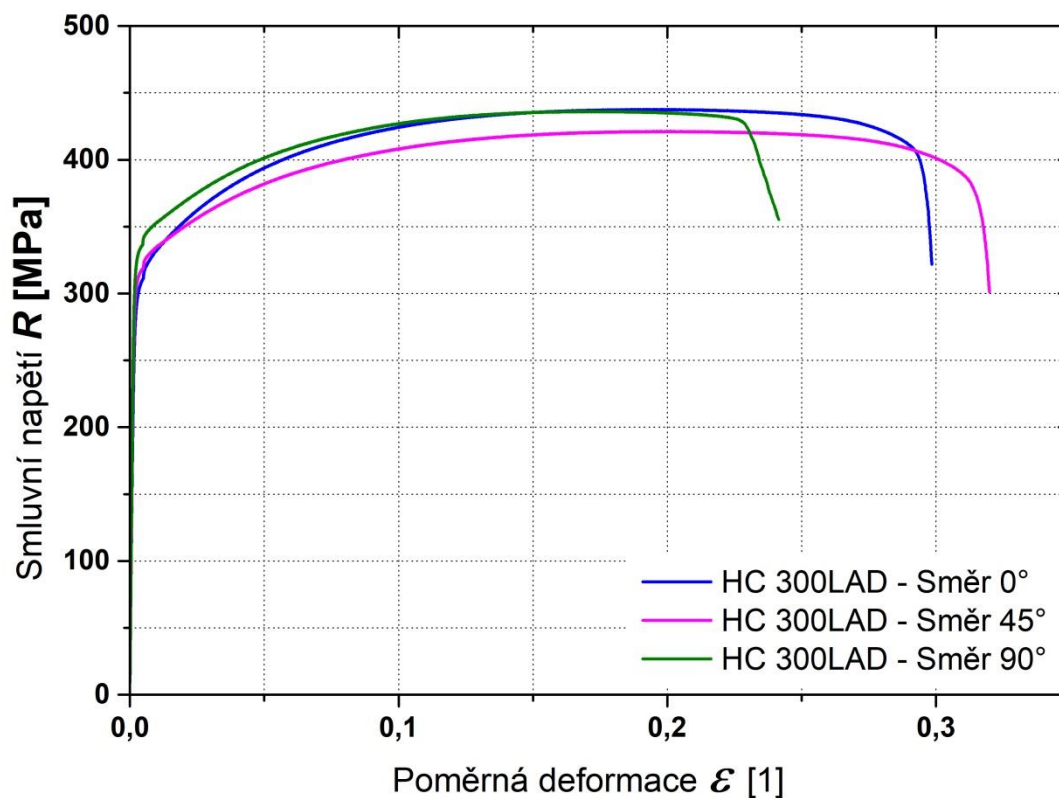
Obr. 24: Prostředí sw Labtest 4.9 [zdroj: vlastní]



Obr. 25: Charakteristické grafy tahových zkoušek pro materiál Sandwich [zdroj: vlastní]

Tab. 3: Tabulka naměřených mechanických hodnot pro materiál Sandwich

Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	r_{5-15} [1]	E [MPa]
Směr 0°	$291,7 \pm 0,6$	$426,5 \pm 1,0$	$17,8 \pm 0,1$	$23,1 \pm 0,6$	$1,335 \pm 0,012$	174283 ± 1735
Směr 45°	$299,6 \pm 1,3$	$418,3 \pm 1,8$	$18,9 \pm 0,2$	$27,1 \pm 1,1$	$1,515 \pm 0,009$	183718 ± 2148
Směr 90°	$307,7 \pm 1,3$	$428,5 \pm 1,5$	$18,1 \pm 0,2$	$26,6 \pm 1,4$	$1,622 \pm 0,008$	179928 ± 2875



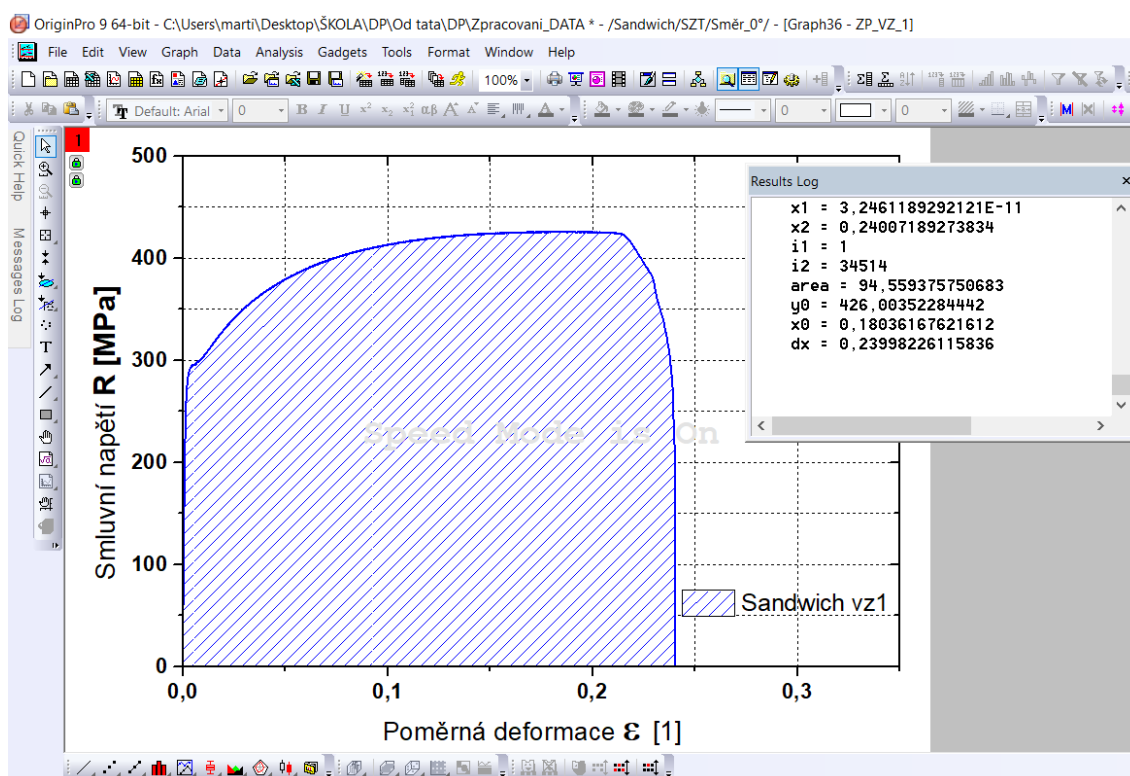
Obr. 26: Charakteristické grafy tahových zkoušek pro materiál HC 300LAD [zdroj: vlastní]

Tab. 4: Tabulka naměřených mechanických hodnot pro materiál HC 300LAD

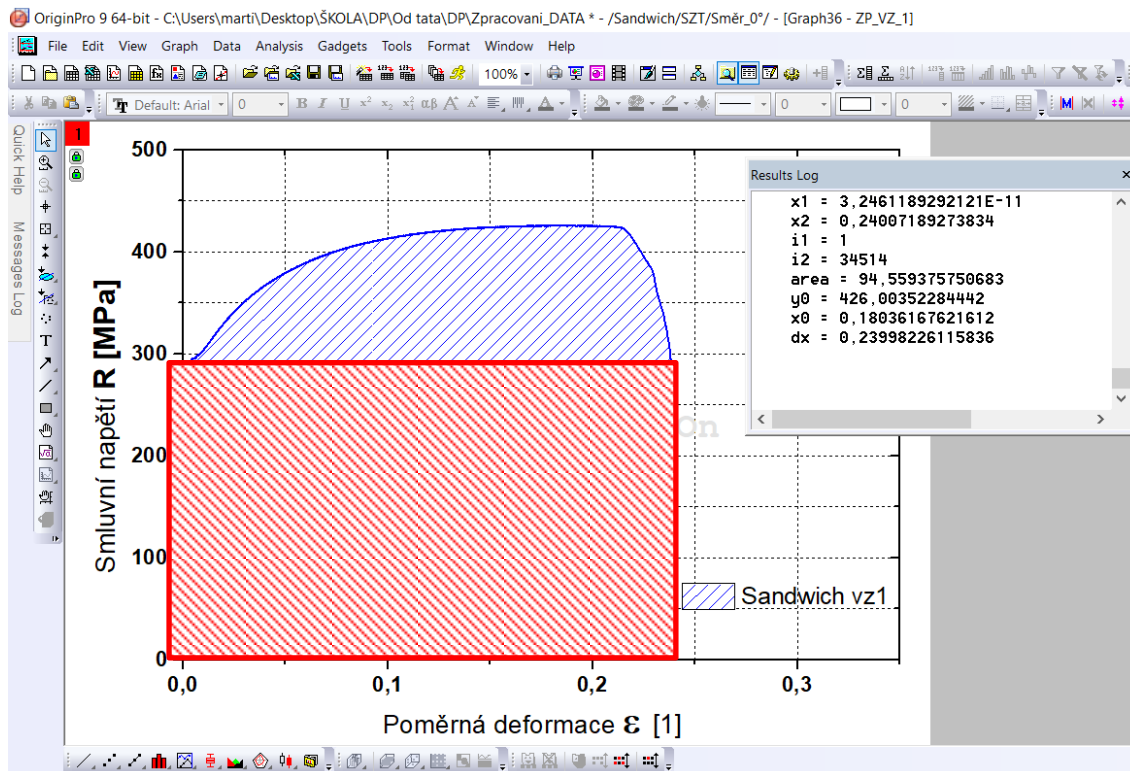
Vzorek	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	r_{5-15} [1]	E [MPa]
Směr 0°	$304 \pm 3,5$	$436,2 \pm 3,6$	$19,5 \pm 0,2$	$30,1 \pm 0,4$	$1,236 \pm 0,011$	202055 ± 1543
Směr 45°	$315,6 \pm 1,6$	$422,5 \pm 2,3$	$20,0 \pm 0,1$	$31,9 \pm 0,2$	$1,753 \pm 0,012$	206499 ± 1278
Směr 90°	$330,0 \pm 1,4$	$434,6 \pm 1,3$	$17,9 \pm 0,3$	$25,1 \pm 0,6$	$1,898 \pm 0,009$	202325 ± 884

Z důvodu vzájemného porovnání obou testovaných materiálů byly z naměřených hodnot dále vypočítány odvozené ukazatele tváritelnosti (ukazatel hlubokotažnosti UH , zásoba plasticity ZP a komplexní ukazatel tváritelnosti KUT). Pro výpočet zásoby plasticity je třeba zvolit koeficient zaplnění k (viz vztah 11). Vzhledem k znalosti průběhu tahové zkoušky pro každý z naměřených vzorků byla pro výpočet ZP zvolena metoda integrace plochy pod touto křivkou, koeficient zaplnění k nebylo proto nutné volit. Výpočet plochy pod křivkou byl proveden pomocí software OriginPro 9. Příklad výpočtu plochy pod křivkou je zobrazen na obr. 27. Pro výpočet zásoby plasticity ZP je třeba odečíst plochu odpovídající ploše do meze kluzu. Příklad výpočtu (odečtení plochy) zásoby plasticity ZP je zobrazen na obr. 28.

Vypočtené hodnoty odvozených ukazatelů tváritelnosti pro oba zkoumané materiály jsou uvedeny v tab. 5 a tab. 6. Uvedeny jsou střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru získané vždy z měření pěti vzorků.



Obr. 27: Příklad výpočtu plochy pod křivkou v sw OriginPro 9 [zdroj: vlastní]



Obr. 28: Příklad odečtení plochy [zdroj: vlastní]

Tab. 5: Tabulka hodnot odvozených ukazatelů tváritelnosti pro materiál Sandwich

Vzorek	UH [1]	ZP [MPa]	KUT [1]
Směr 0°	$0,684 \pm 0,001$	$29,24 \pm 2,92$	$0,158 \pm 0,004$
Směr 45°	$0,717 \pm 0,001$	$28,05 \pm 4,31$	$0,194 \pm 0,008$
Směr 90°	$0,718 \pm 0,001$	$28,10 \pm 5,60$	$0,191 \pm 0,010$

Tab. 6: Tabulka hodnot odvozených ukazatelů tváritelnosti pro materiál HC 300LAD

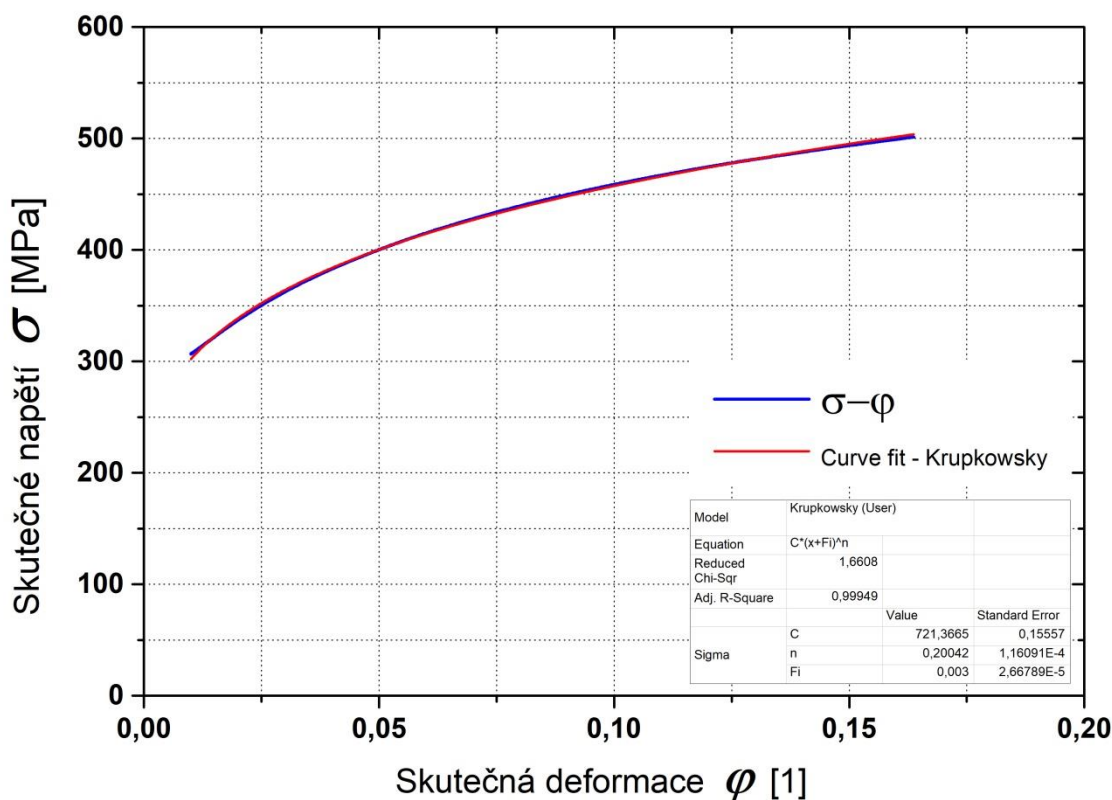
Vzorek	UH [1]	ZP [MPa]	KUT [1]
Směr 0°	$0,697 \pm 0,002$	$33,10 \pm 1,31$	$0,209 \pm 0,002$
Směr 45°	$0,747 \pm 0,001$	$27,23 \pm 0,41$	$0,238 \pm 0,001$
Směr 90°	$0,759 \pm 0,002$	$27,83 \pm 2,21$	$0,190 \pm 0,004$

3.2.2 Aproximace křivky zpevnění ze statické zkoušky tahem

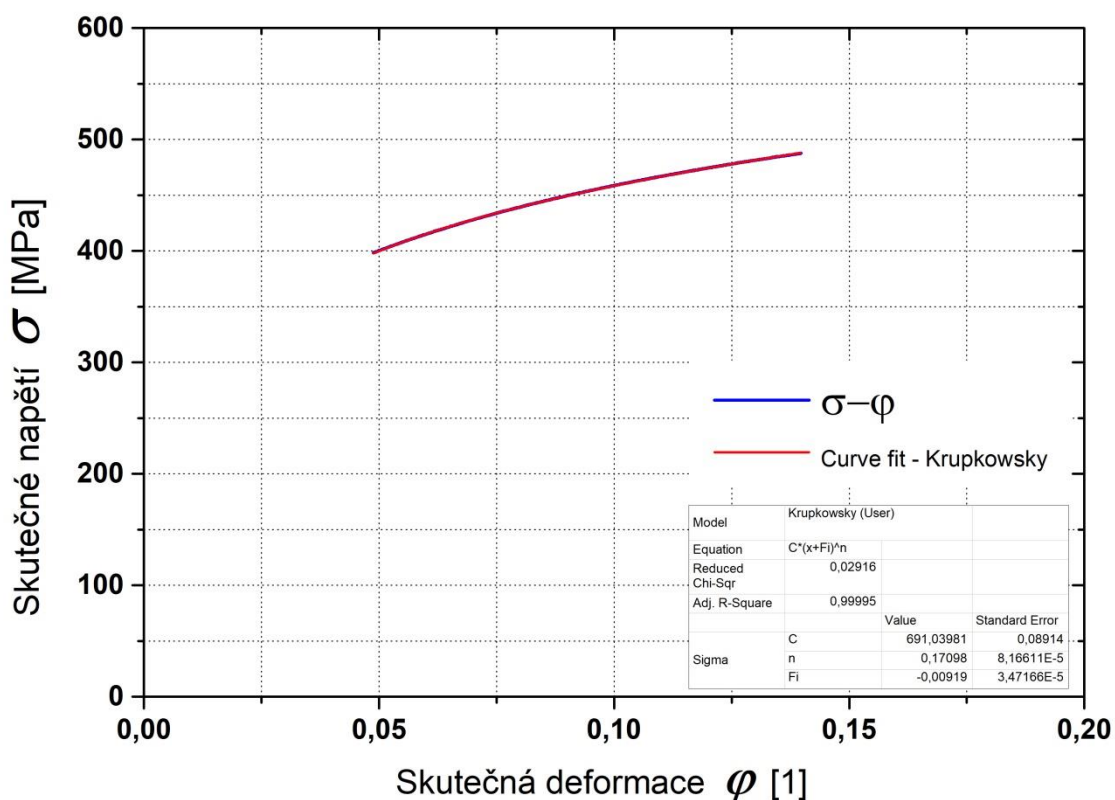
Při výpočtech procesu tváření pomocí metod konečných prvků je třeba křivku zpevnění zadávat v souřadnicích skutečné napětí σ a skutečné přetvoření φ . Z hlediska definice této křivky zpevnění je výhodné naměřenou křivku aproximovat funkčním vztahem. Pro tyto aproximace se často používá vztah podle Swift-Krukowského (viz vztah 14). Konstanty aproximační funkce byly stanoveny pomocí programu OriginPro 9. Při výpočtu je důležitým faktorem zvolená oblast aproximace. V rámci řešení diplomové práce byly aproximační konstanty vypočítány v následujících intervalech:

- dle normy ASTM E 646 – 78 libovolný od $R_{p0,2}$ do R_m ,
- dle normy EN 10130 + A1: 2000 od $\varepsilon = 5\%$ do $\varepsilon = 15\%$.

Příklad výpočtu aproximačních konstant pro materiál Sandwich je zobrazen na obr. 29 (dle normy ASTM E 646 – 78) a na obr. 30 (dle normy EN 10130 + A1: 2000).



Obr. 29: Příklad aproximace křivky zpevnění mat. Sandwich, interval dle normy ASTM E 646 - 78 [zdroj: vlastní]



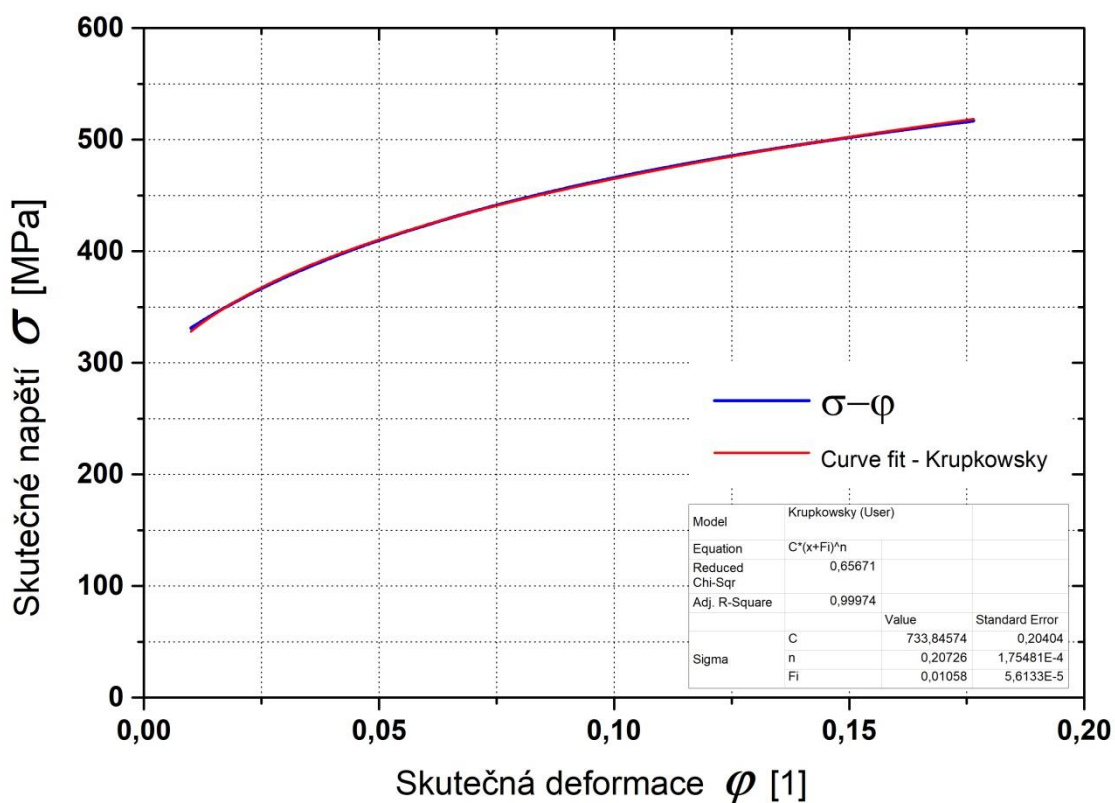
Obr. 30: Příklad aproximace křivky zpevnění *mat. Sandwich*, interval dle normy dle normy EN 10130 + Al: 2000 [zdroj: vlastní]

Vypočtené aproximační konstanty pro materiál Sandwich jsou zaznamenány v tab. 7. Pro porovnání jsou uvedeny hodnoty získané dle normy ASTM E 646 – 78 i dle normy EN 10130 + Al: 2000. Uvedeny jsou střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru získané vždy z měření pěti vzorků.

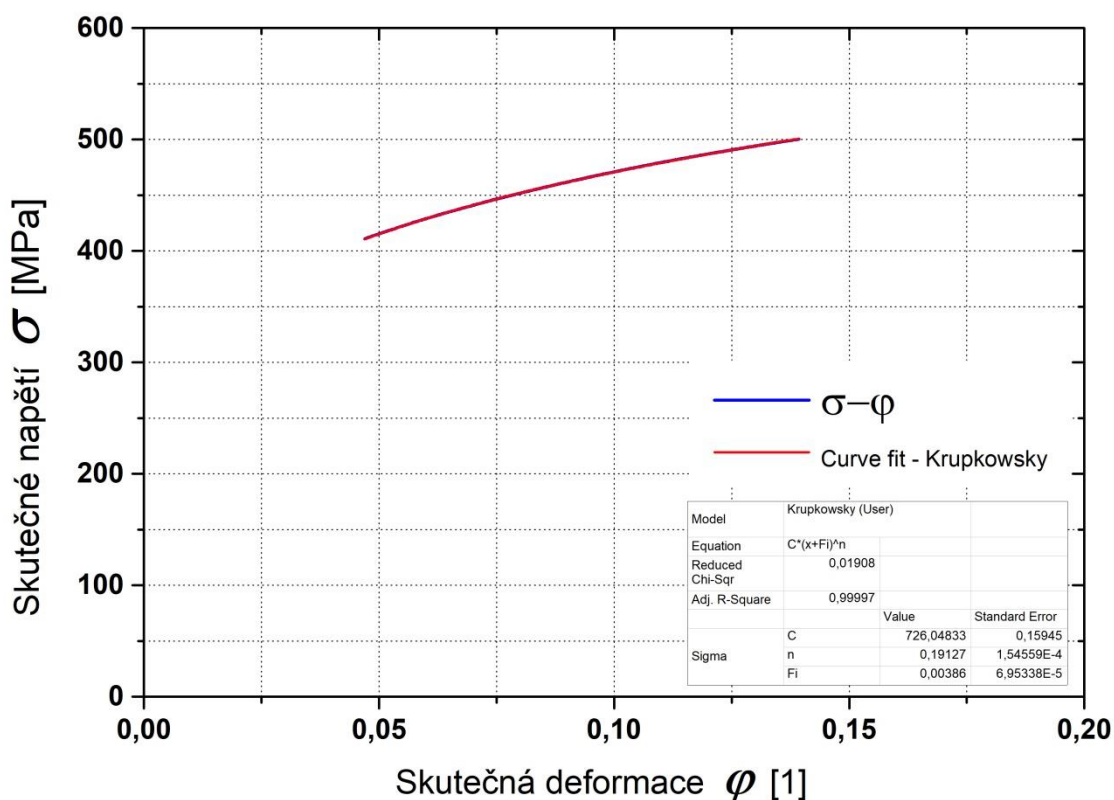
Tab. 7: Tabulka aproximačních konstant *mat. Sandwich*

Norma	Směr [°]	C [MPa]	n [1]	ϕ_0 [1]
ASTM E 646 – 78	0	720,6 ± 0,8	0,1995 ± 0,0013	0,0030 ± 0,0001
	45	707,6 ± 3,6	0,2025 ± 0,0007	0,0065 ± 0,0001
	90	726,9 ± 0,4	0,2039 ± 0,0001	0,0067 ± 0,0001
EN 10130 + Al: 2000	0	691,0 ± 0,0	0,1707 ± 0,0004	-0,0090 ± 0,0002
	45	684,4 ± 1,5	0,1779 ± 0,0011	0,0046 ± 0,0007
	90	693,5 ± 0,5	0,1704 ± 0,0002	-0,0079 ± 0,0001

Příklad výpočtu aproximačních konstant pro materiál HC 300LAD je zobrazen na obr. 31 (dle normy ASTM E 646 – 78) a na obr. 32 (dle normy EN 10130 + AI: 2000).



Obr. 31: Aproximace křivky zpevnění mat. HC 300LAD, interval dle normy ASTM E 646 - 78 [zdroj: vlastní]



Obr. 32: Aproximace křivky zpevnění mat. HC 300LAD, interval dle normy EN 10130 + Al: 2000 [zdroj: vlastní]

Vypočtené aproximační konstanty pro materiál HC 300LAD jsou zaznamenány v tab. 8, pro porovnání jsou uvedeny hodnoty získané dle normy ASTM E 646 – 78 i dle normy EN 10130 + Al: 2000. Uvedeny jsou střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchylky výběru získané vždy z měření pěti vzorků.

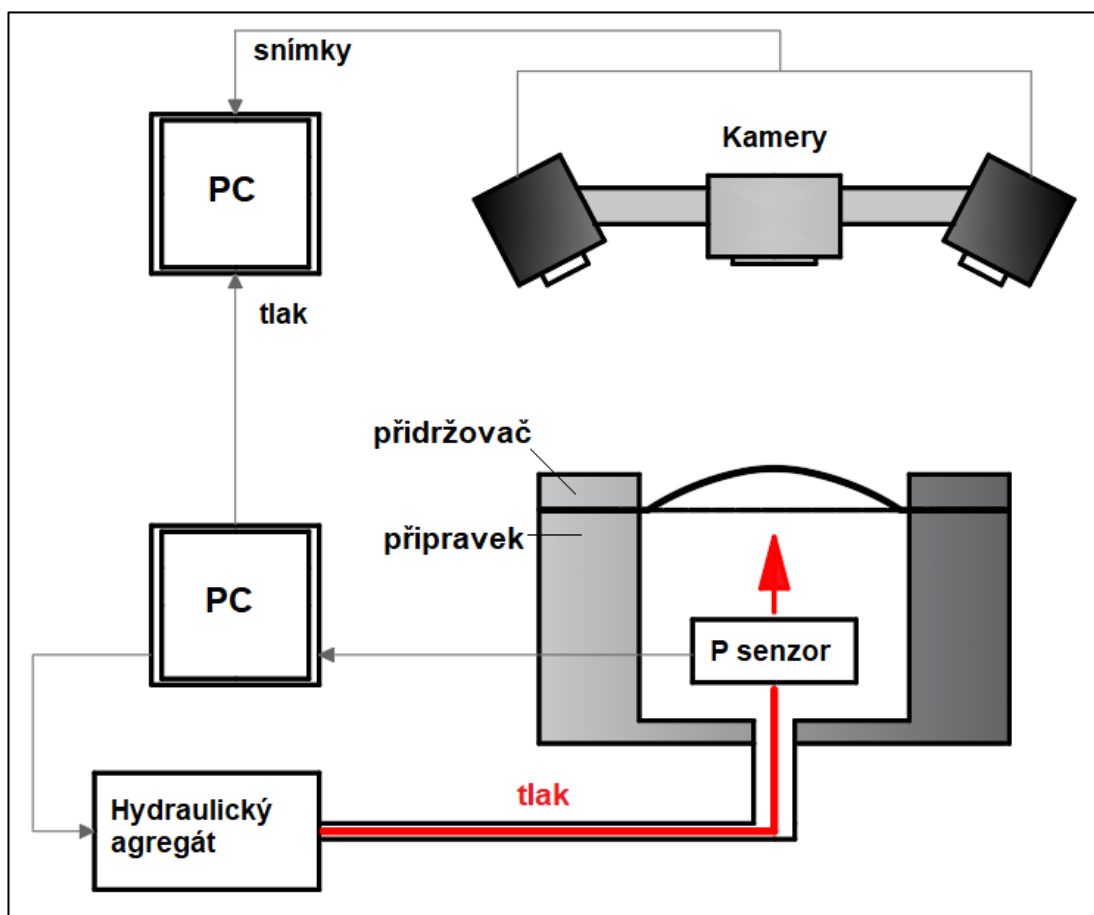
Tab. 8: Tabulka aproximačních konstant mat. HC 300LAD

Norma	Směr [°]	C [MPa]	n [1]	ϕ_0 [1]
ASTM E 646 – 78	0	734,8 ± 1,4	0,2051 ± 0,0031	0,0103 ± 0,0003
	45	715,0 ± 0,9	0,2159 ± 0,0004	0,0202 ± 0,0001
	90	732,5 ± 0,3	0,2095 ± 0,0024	0,0199 ± 0,0002
EN 10130 + Al: 2000	0	720,9 ± 7,3	0,1890 ± 0,0032	0,0020 ± 0,0027
	45	711,9 ± 0,8	0,2104 ± 0,0001	0,0165 ± 0,0005
	90	718,8 ± 0,7	0,1931 ± 0,0015	0,0112 ± 0,0001

3.3 Zkouška hydrostatickým vypínáním – Bulge test

Při testování materiálu statickou zkouškou tahem je zkušební vzorek deformován působením jednoosého tahu. Vzhledem k tomu, že při plošném tváření, resp. lisování plechů, dochází téměř výhradně k deformaci víceosým namáháním, není znalost deformační křivky z tahové zkoušky pro simulaci procesu tváření dostačující. Pro získání informace o chování materiálu při víceosém namáhání je prováděna hydrostatická zkouška vypínáním. Princip zkoušky je uveden v teoretické části práce.

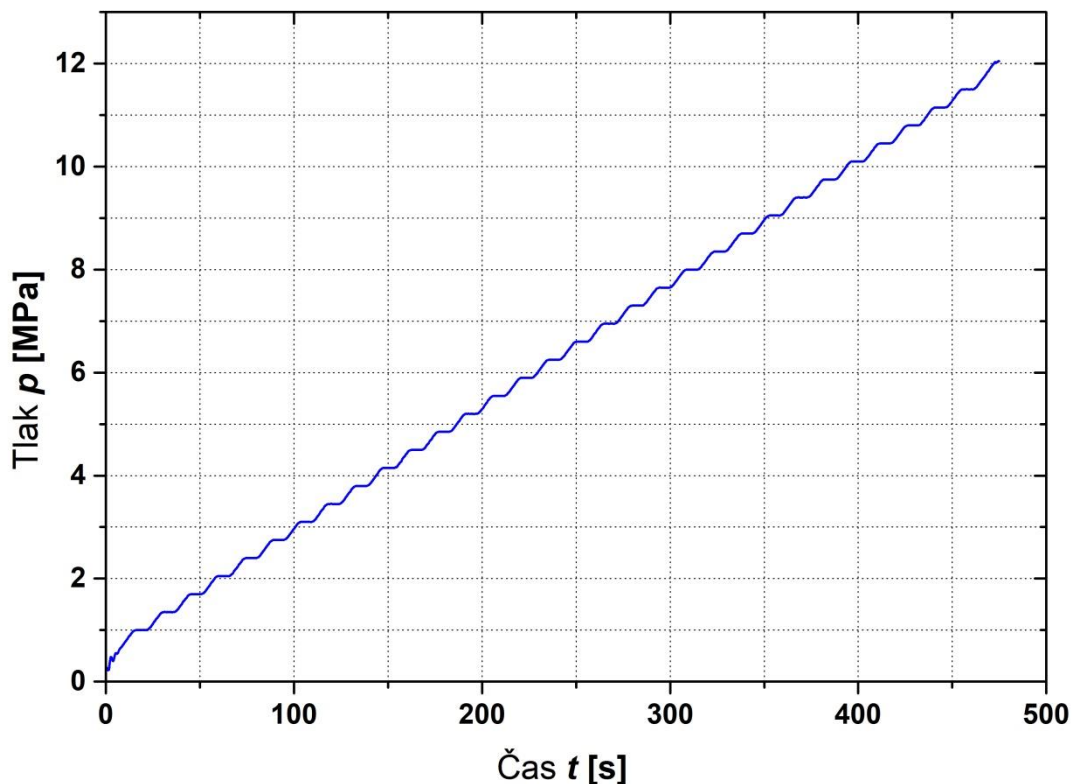
Pro zjištění křivky zpevnění při biaxiálním testu je třeba zjišťovat závislost deformace testovaného vzorku na hydrostatickém tlaku kapaliny. Pro měření deformace byla zvolena bezkontaktní fotogrammetrická metoda pomocí systému MercuryRT od firmy Sobriety. Schéma měření je zobrazeno na obr. 33.



Obr. 33: Princip měření při zkoušce hydrostatickým vypínáním [25]

3.3.1 Měření mechanických vlastností při biaxiálním zatížení

Zkušební přípravek pro zkoušku hydrostatickým vypínáním byl umístěn na hydraulickém lise CBA 300/63. Pro zamezení úniku kapaliny při testu byla volena velikost přidržovací síly 2000 kN. Jak vyplývá z předchozích prací a prováděných výzkumů, dochází při zatěžování vzorku k relaxaci napětí [25]. Z tohoto důvodu nebyl při testování materiálu zvyšován tlak kapaliny kontinuálně, ale postupně v intervalech s prodlevou 5 s. Hodnota nárůstu tlaku byla volena 0,35 MPa. Průběh zvyšování tlaku kapaliny v závislosti na čase je znázorněn na obr. 34. Přesná hodnota požadovaného tlaku v kapalině byla zajišťována přesným hydraulickým servoventilem s PID regulací. Dosažitelná přesnost požadovaného tlaku je 0,002 MPa. Systém vyvození a řízení tlaku v kapalině je řešen samostatným hydraulickým agregátem pracujícím nezávisle na hydraulickém okruhu lisu. Sledovaný děj byl snímán frekvencí 2 Hz pomocí dvou synchronních digitálních kamer. Pro každou dvojici snímků byla současně zaznamenávána i velikost tlaku kapaliny.



Obr. 34: Průběh zatěžování vzorku tlakem kapaliny [zdroj: vlastní]

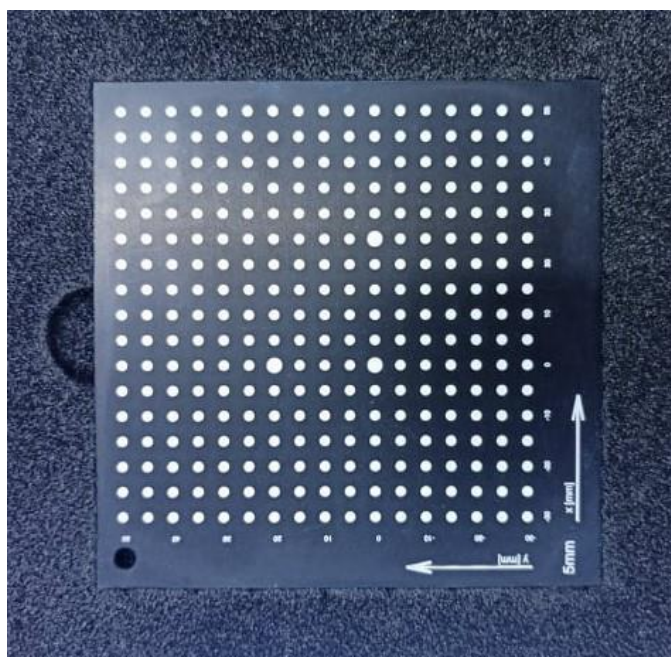
Uspořádání měřicího pracoviště je patrné z obr. 35, kde je vidět dvojice PC z nichž jeden je používán pro fotogrammetrickou analýzu deformace a druhý zajišťuje ovládání hydraulického agregátu vyvozuujícího tlak v kapalině.



Obr. 35: Uspořádání měřicího pracoviště [zdroj: vlastní]

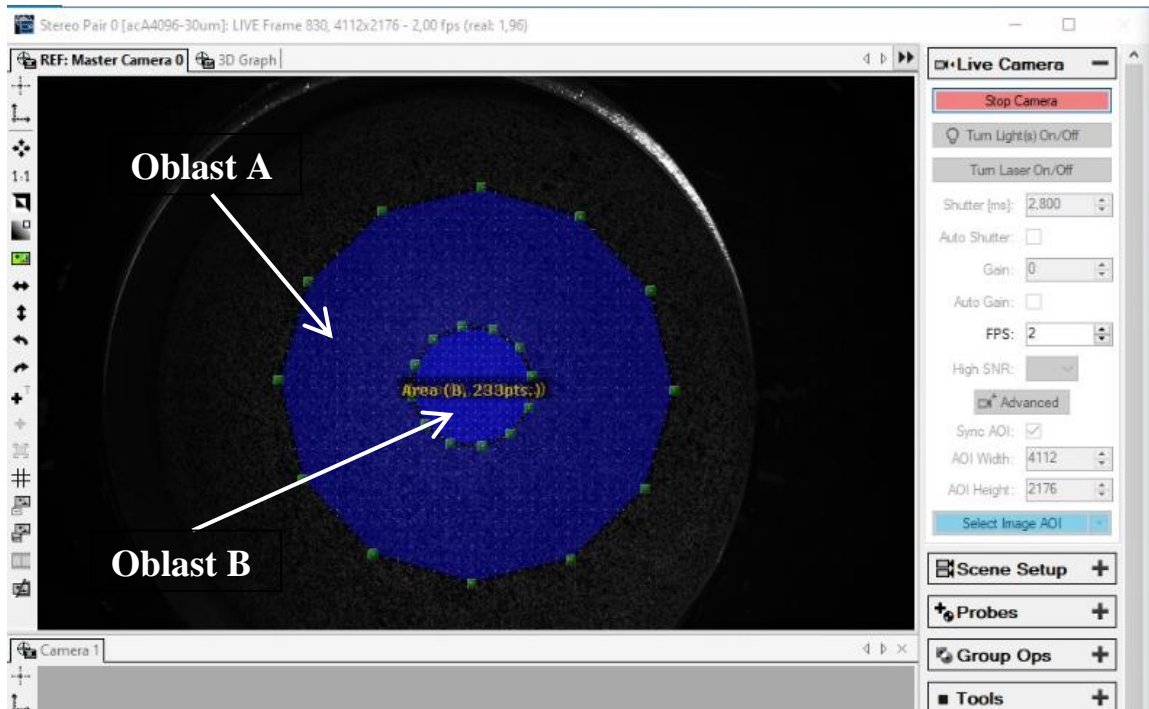
V první fázi přípravy měřicího systému je nutné nastavit clony objektivů a zaostřit optický systém na vzorek. Systém pracuje s pevnou ohniskovou vzdáleností a kvalitní nastavení světelných podmínek v kombinaci se zaostřením je základním předpokladem pro přesnou analýzu deformace. Po tomto nastavení bylo třeba zkalibrovat bezkontaktní optický systém. Pro tyto účely je nutné zvolit tzv. kalibrační objem, který určuje operační prostor, ve kterém je systém schopný měřit. S ohledem na rozměry měřeného vzorku byla volena kalibrační destička s roztečí bodů 5 mm. Destička je zobrazena na obr. 36. Vzdálenost kamer od měřeného objektu (450 mm) a jejich rozteč (220 mm) vytváří po

kalibraci měřený objem cca 120 mm x 120 mm x 100 mm (délka x šířka x hloubka). Proces kalibrace spočívá v prostorovém snímání kalibrační destičky pod různými úhly natočení vzhledem ke kamerám. Po kalibraci systém automaticky vyhodnocuje kvalitu kalibrace a výstupem je kalibrační protokol s uvedením chyby měření. V tomto případě byla chyba měření 0,54 Px.



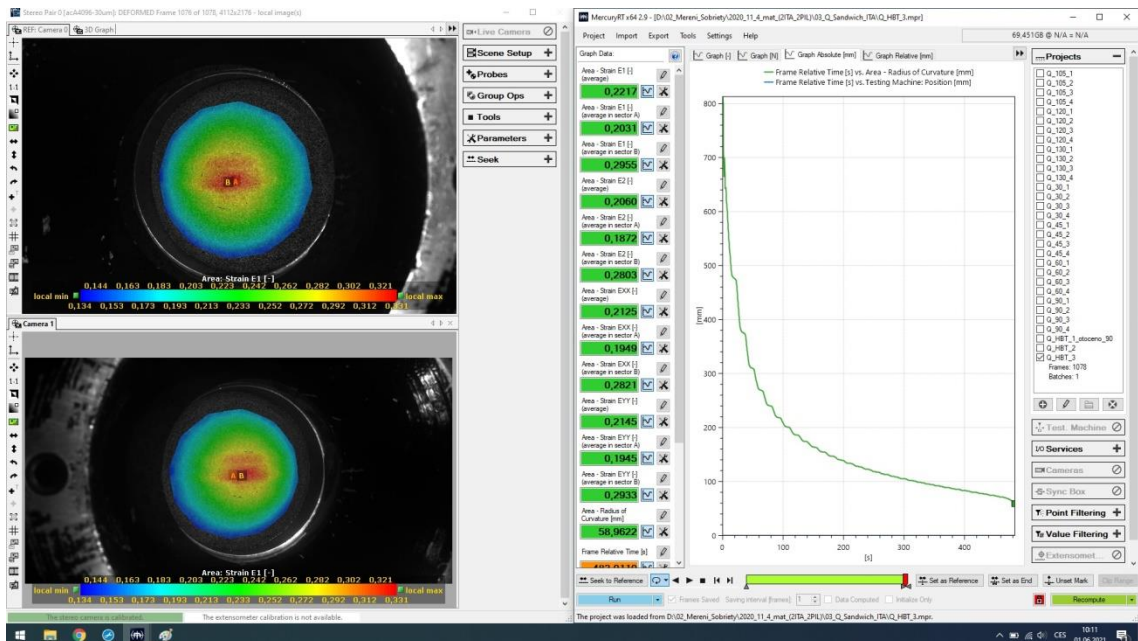
Obr. 36: Kalibrační destička [zdroj: vlastní]

Z bezkontaktní analýzy deformace pomocí systému Sobriety je pro zjištění křivky zpevnění testovaného materiálu nutné zjistit velikosti hlavní a vedlejší deformace (φ_1 , φ_2) a poloměru zakřivení testovaného vzorku R . Pro výpočet poloměru zakřivení plochy je v systému MercuryRT definována funkce „BestFit“, která naměřenými daty prokládá požadovaný prostorový tvar, v tomto případě kouli. Pro tyto účely byly v měřené oblasti definovány dvě plochy, v kterých následně systém vypočítává požadované hodnoty. Příklad definice analyzované oblasti je vidět na obr. 37. Oblast s větší analyzovanou plochou je využívána pro zjištění poloměru zakřivení R (plocha označena písmenem A). Oblast označená písmenem B slouží pro výpočet deformací φ_1 a φ_2 , z kterých je následně vypočítána aktuální tloušťka materiálu (pomocí φ_3).



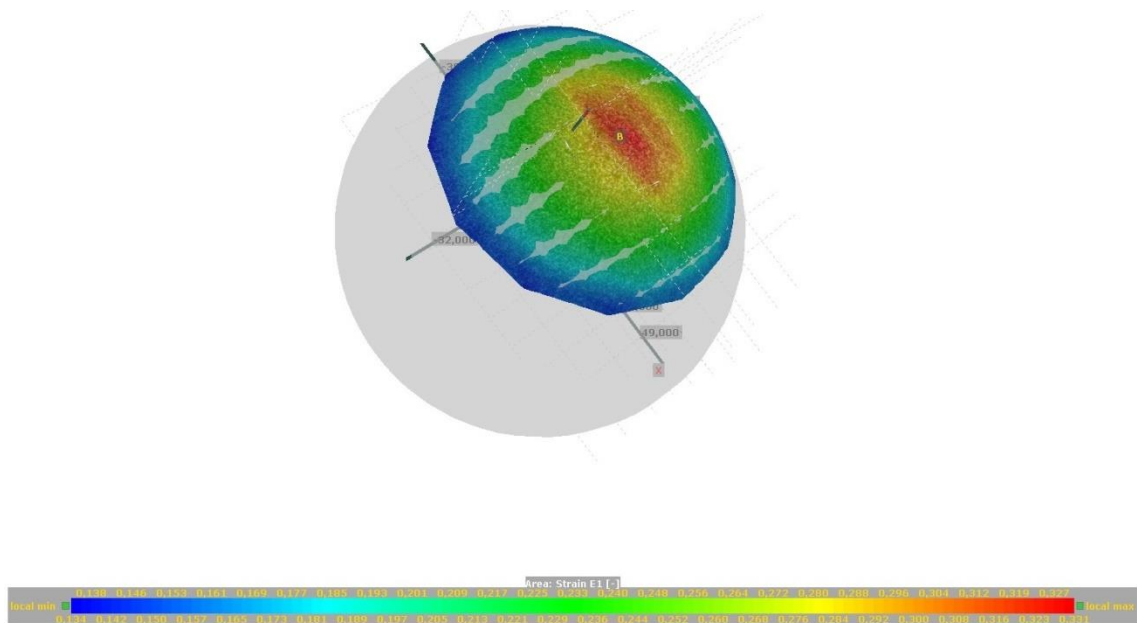
Obr. 37: Příklad definice analyzované oblasti [zdroj: vlastní]

Příklad výpočtu deformace a průběhu časové změny poloměru zakřivení R je zobrazen na obr. 38.



Obr. 38: Příklad výpočtu deformace [zdroj: vlastní]

Příklad výpočtu poloměru zakřivení pomocí funkce „BestFit“ je patrný z obr. 39.



Obr. 39: Příklad výpočtu poloměru zakřivení R pomocí funkce „BestFit“ [zdroj: vlastní]

3.3.2 Aproximace deformační křivky – hydrostatické vypínání

Z naměřených hodnot deformace (φ_1 , φ_2), poloměru zakřivení R a znalosti tlaku p v kapalině p snímaného synchronně s ukládanými snímky je možné vypočítat křivku zpevnění testovaného materiálu při biaxiálním zatížení. Pro tento výpočet byly použity vztahy č. (19), (20) a (21) zmiňované v teoretické části této práce.

$$\sigma_{HBT} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot t} \quad (19)$$

Kde značí:

σ_{HBT}	- napětí v materiálu během Bulge testu	[MPa]
p	- tlak kapaliny	[MPa]
R	- zakřivení vzorku	[mm]
t	- aktuální tloušťka materiálu	[mm]

$$\sigma_i = \sigma_{HBT} - p/2 \quad (20)$$

Kde značí:

σ_i	- intenzita napětí	[MPa]
------------	--------------------	-------

$$\varphi_i = \frac{2\sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{\varphi_1^2 + \varphi_1\varphi_2 + \varphi_2^2} = -\varphi_3 = -\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (21)$$

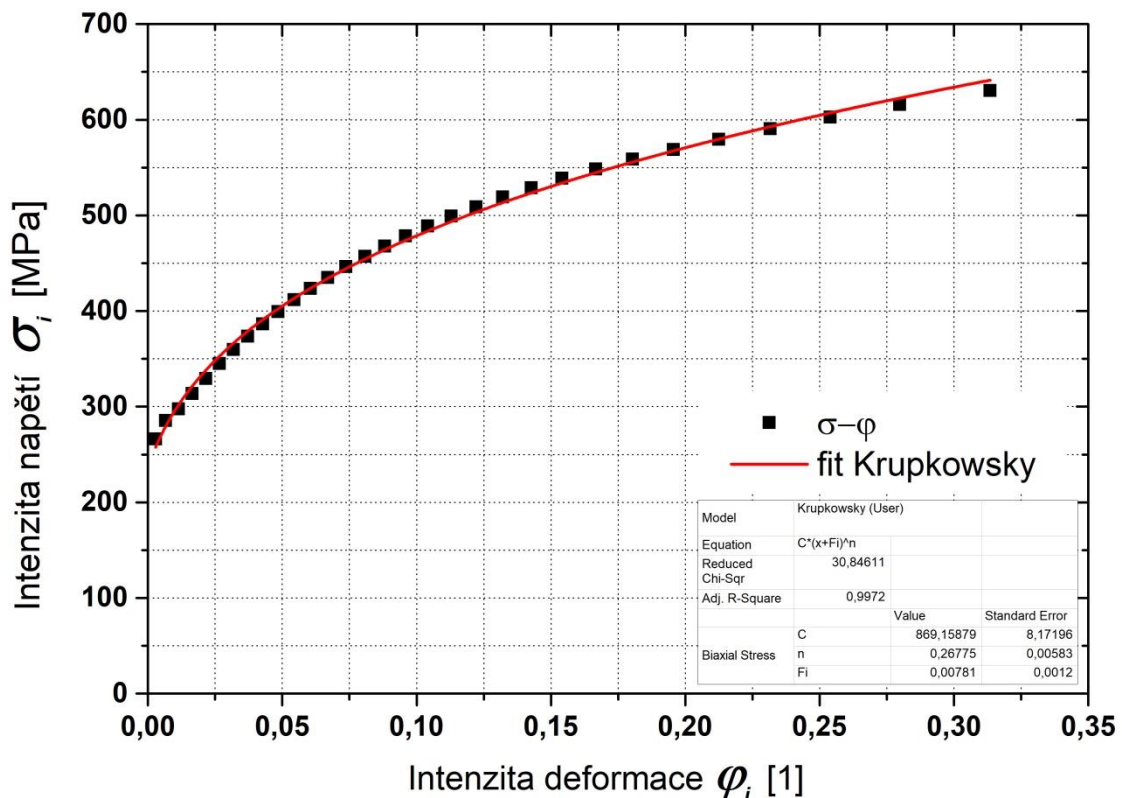
Kde značí:

$$\varphi_i \quad - \text{intenzita přetvoření} \quad [1] \quad (1)$$

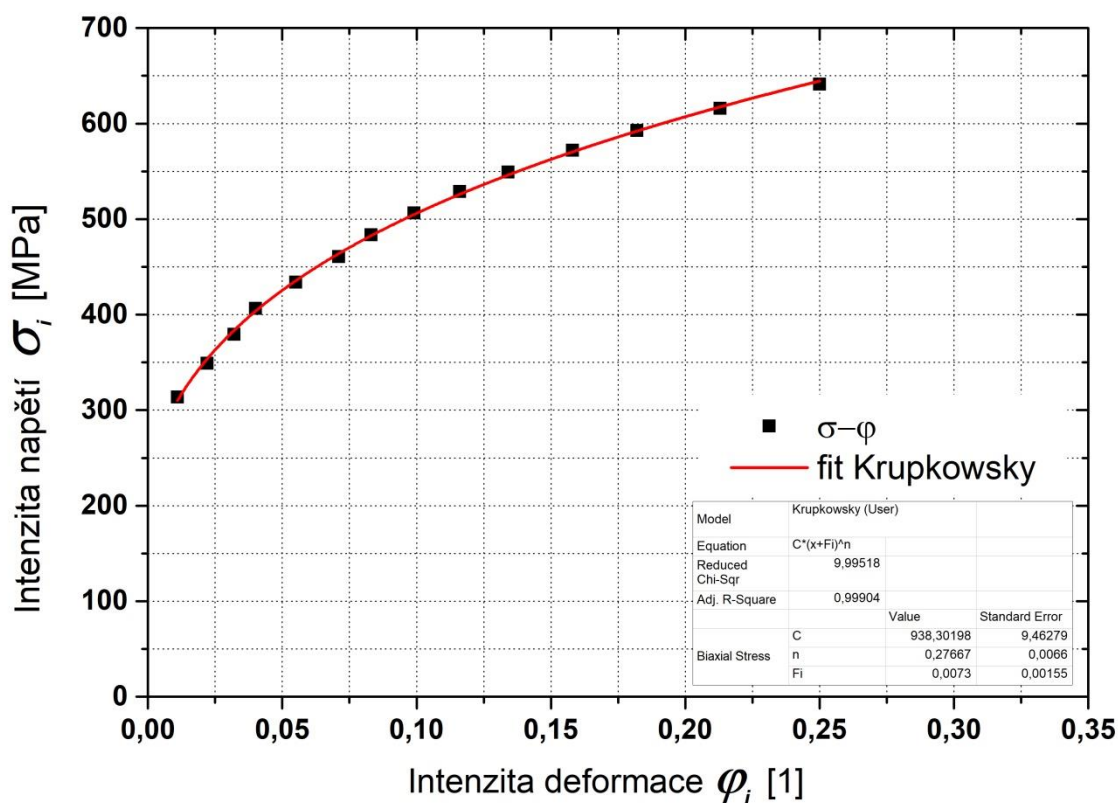
Vztah pro výpočet aktuální tloušťky zkoušeného vzorku byl vyjádřen z výše uvedených rovnic. Výsledný tvar je uveden jako rovnice (22).

$$t = t_0 * e^{\varphi_3} \quad (22)$$

Podobně jako u předchozích experimentů bylo testováno vždy pět vzorků pro oba materiály. Křivka zpevnění zjištěná výše uvedeným způsobem byla aproximována vztahem podle Swift-Kropkowského. Aproximace byla provedena v sw OriginPro 9. Příklad výpočtu aproximačních konstant pro materiál Sandwich je uveden na obr. 40. Příklad výpočtu pro HC 300LAD je zobrazen na obr. 41.



Obr. 40: Příklad výpočtu aproximačních konstant mat. Sandwich [zdroj: vlastní]



Obr. 41: Příklad výpočtu aproximačních konstant mat. HC 300LAD [zdroj: vlastní]

Vypočtené aproximační konstanty pro materiály Sandwich a HC 300LAD jsou zaznamenány v tab. 9. Uvedeny jsou střední hodnoty sledovaných charakteristik (výběrové průměry) a směrodatné odchytky výběru získané vždy z měření pěti vzorků.

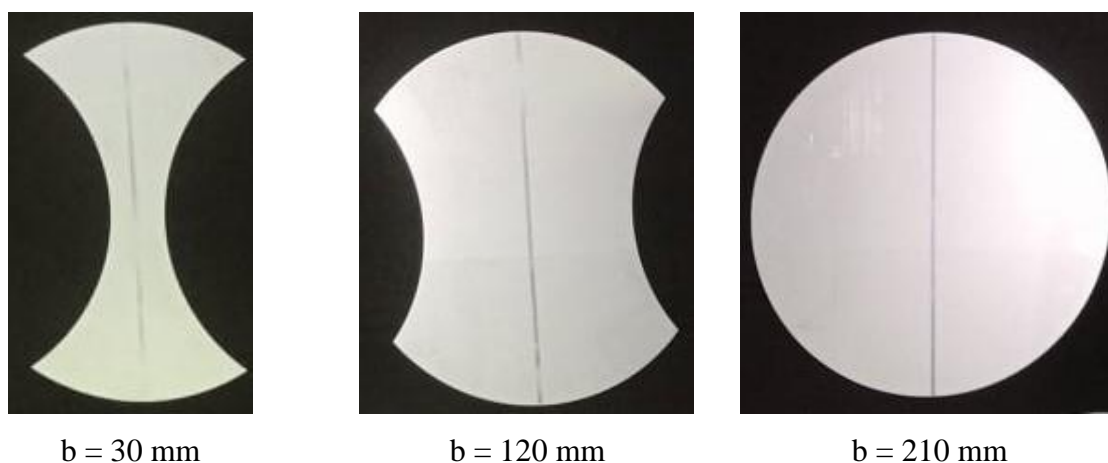
Tab. 9: Tabulka aproximačních konstant

Materiál	C [MPa]	n [1]	φ_0 [1]
Sandwich	865,1 ± 4,1	0,267 ± 0,001	0,0076 ± 0,0001
HC 300LAD	941,0 ± 2,7	0,272 ± 0,004	0,0062 ± 0,0011

3.4 Vypínání pevným polokulovým tažníkem – Nakazima test

3.4.1 Příprava vzorků

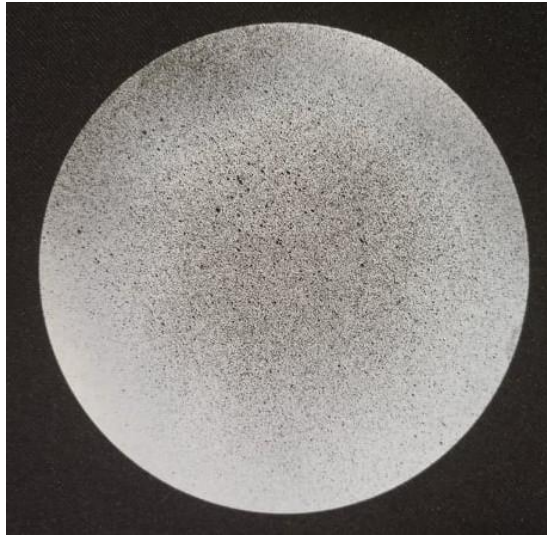
Pro zjištění diagramu mezních přetvoření (FLD) je nutné zhotovit tvarové přístřihy. U těchto vzorků je důležitý směr válcování, kdy hlavní deformace musí být kolmá na směr válcování a to vzhledem k tomu, že většina ocelových materiálů má nejmenší tažnost ve směru kolmém na směr válcování. Takto je zjišťována nejnižší hodnota FLD. Před vlastním zhotovováním vzorků bylo nutné vyznačit směr válcování na polotovaru (pás plechu o šířce 220 mm a délce 1000 mm). Z pásu plechu bylo vystřiženo 5x11 kusů kruhových vzorků o průměru 210 mm. Z těchto přístřihů byly následně vystřiženy tvarové vzorky s různou šířkou středové oblasti. Šířka této oblasti je určující pro charakter deformace a určuje polohu bodů v FLD. Vzorek s nejmenší šířkou 30 mm odpovídá stavu napjatosti a deformace při jednoosém tahu (levý krajní bod v FLD). Plný kruhový přístřih odpovídá pravému krajnímu bodu v FLD (biaxiální vypínání). Vzorek o šířce 120 mm odpovídá minimální naměřené hodnotě deformace ϕ_1 . Příklad tvarových vzorků je vidět na obr. 42.



Obr. 42: Příklad tvarů vzorků [zdroj: vlastní]

Před nanesením tzv. patternu, který je nutný pro bezkontaktní analýzu deformace, bylo nutné vzorky odmastit. Pattern je nanášen nástřikem bílé a černé matové barvy ve spreji. Vzhledem k tomu, že barva musí vykazovat elastické vlastnosti a deformovat se spolu s tvářeným vzorkem, bylo nanášení patternu prováděno bezprostředně před vlastním

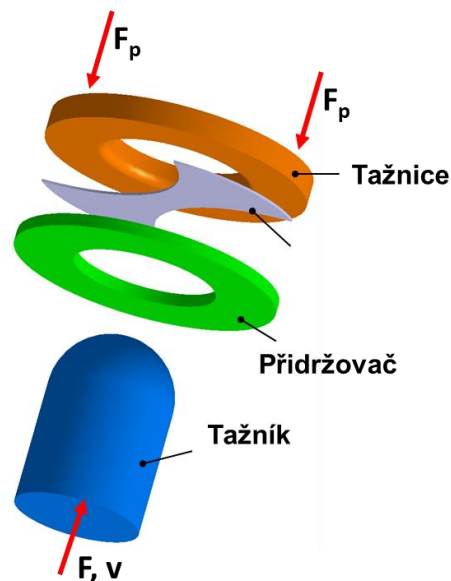
měřením, aby nedošlo k nežádoucímu vytvrdnutí barvy. Příklad vzorku připraveného pro měření je na obr. 43.



Obr. 43: Vzorek připravený pro měření [zdroj: vlastní]

3.4.2 Vlastní měření

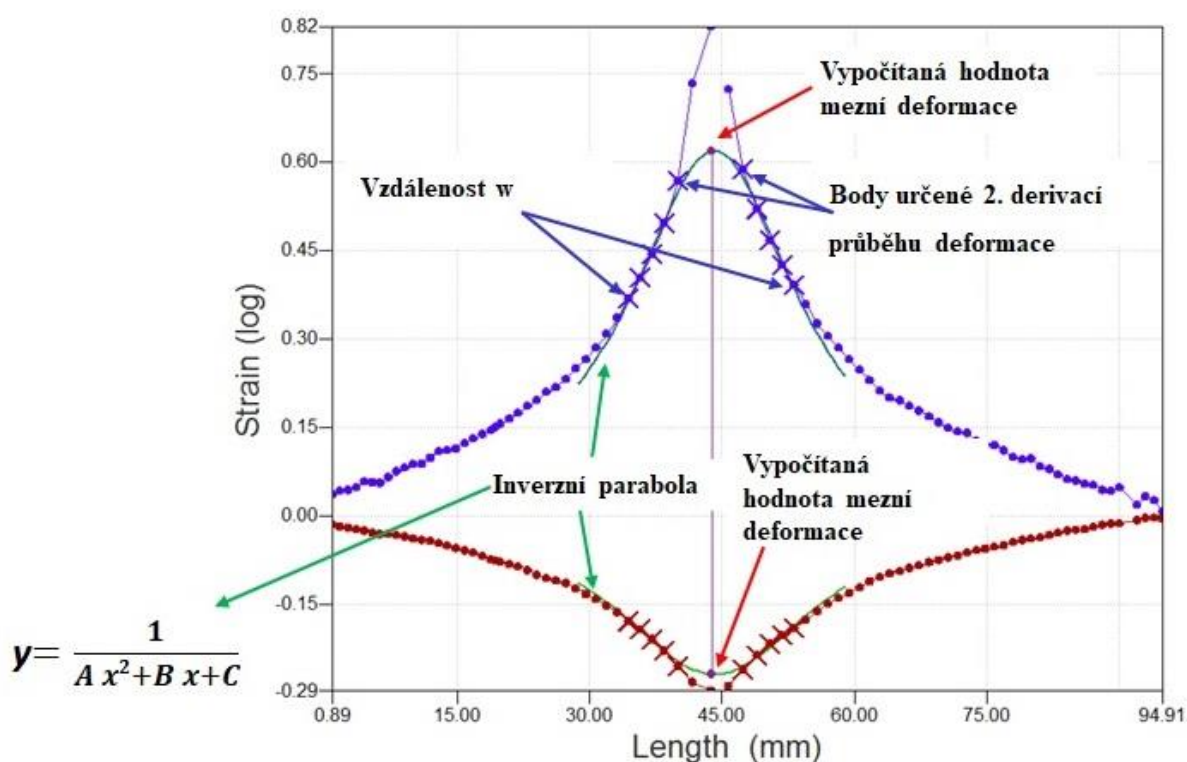
Provedení a vyhodnocení testu bylo v souladu s normou ISO/DIS 12004-2. Pro testy bylo voleno 11 deformačních stop, jejichž počet byl nad rámec minimálního počtu uváděného v normě. Rychlost posuvu tažníku byla nastavena na hodnotu 1,5 mm/s. Přidržovací síla byla 1500 kN. Schéma přípravku pro měření FLD je zobrazeno na obr. 44



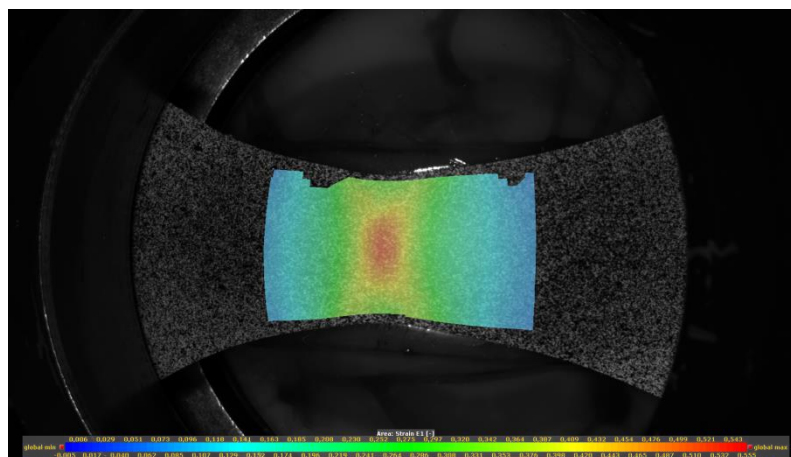
Obr. 44: Schéma přípravku pro měření FLD

Na rozdíl od zkoušky hydrostatickým vypínáním, kde je vzorek deformován bez ovlivnění třením, je u Nakazima testu nutné vhodným způsobem tření eliminovat. Nejčastějším způsobem je využití maziva v kombinaci s PE folií. Tato kombinace zajišťuje, že trhlina vzniká v nejvyšším místě zkoušeného vzorku.

Nastavení systému bylo popsáno výše v kapitole zabývající se hydrostatickým vypínáním. Dle výše uvedené normy je okamžik iniciace trhliny nutné snímat frekvencí 12 Hz. Tuto frekvenci však není nutné používat po celou dobu zkoušky a proto byla z důvodu úspory úložného místa na HDD volena proměnná frekvence snímání sledovaného děje. Kritérium pro změnu frekvence snímání je hloubka tažení (resp. čas zkoušky). Frekvence snímání byla zvýšena v okamžiku dosažení 80 % celkového času. Zkouška byla ukončena v okamžiku vzniku masivní trhliny na vzorku. Pro určení mezního stavu je brán poslední snímek před vznikem trhliny. V souladu s normou ISO/DIS 12004-2, ve které je popsán způsob určování mezních stavů deformace, systém MercuryRT automaticky vyhodnocuje výsledky měření. Příklad výpočtu mezní deformace je zobrazen na obr. 45. Příklad rozložení deformace je uveden na obr. 46.

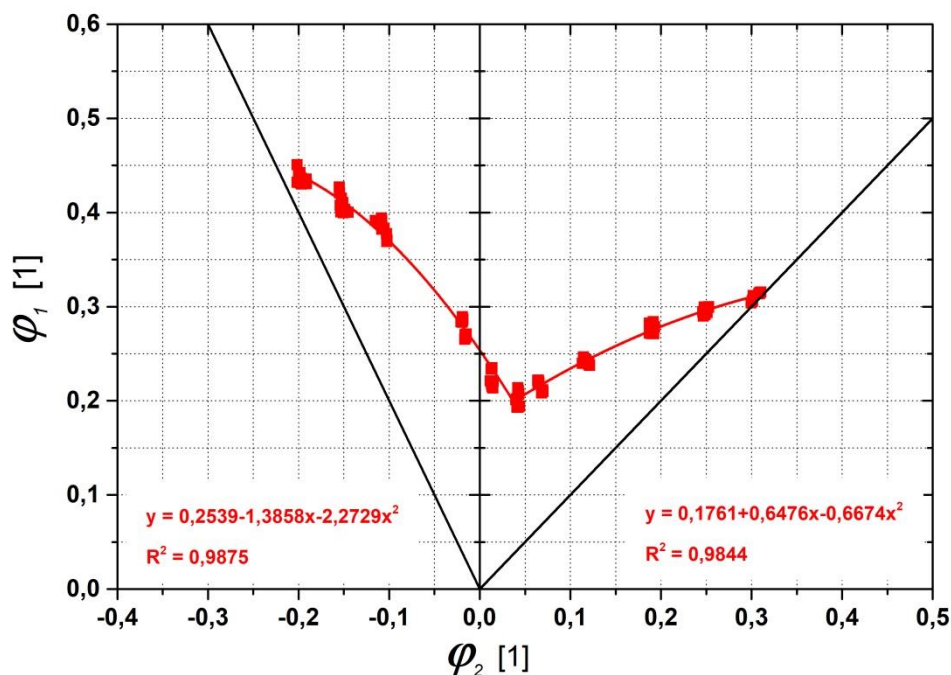


Obr. 45: Příklad výpočtu mezní deformace [zdroj: vlastní]



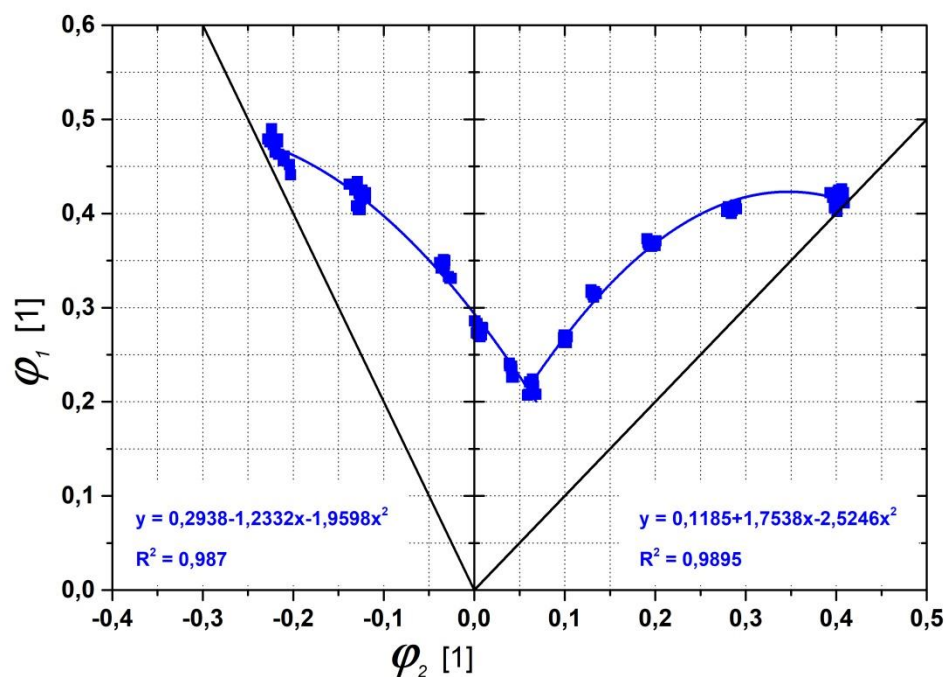
Obr. 46: Příklad vypočítané deformace vzorku $b = 30\text{mm}$ [zdroj: vlastní]

Všechny takto naměřené a vyhodnocené body byly zaneseny do grafu závislosti φ_1 na φ_2 . Vzhledem k tomu, že diagram mezních přetvoření je základní materiálová charakteristika používaná pro popis deformačního chování materiálu, je výhodné tuto závislost popsat matematickým vztahem. Pro matematickou aproximaci se FLD diagram rozděluje na dvě samostatné části, označované jako tzv. levá a pravá větev. Dosavadní praktické zkušenosti ukázaly, že nejvýhodnější matematickou funkcí pro aproximaci je polynom 2. stupně. Na obr. 47 je zobrazen diagram mezních přetvoření pro testovaný materiál Sandwich. V levé a pravé části diagramu jsou zároveň uvedeny aproximační vztahy.



Obr. 47: Diagram mezních přetvoření mat. Sandwich [zdroj: vlastní]

Diagram mezních přetvoření pro materiál HC 300LAD je zobrazen na obr. 48.



Obr. 48: Diagram mezních přetvoření mat. HC 300LAD [zdroj: vlastní]

Pro lepší přehlednost byly průměrné hodnoty deformací pro jednotlivé měřené deformační stopy se směrodatnými odchylkami zaznamenány v tab. 10 a tab. 11.

Tab. 10: Tabulka deformací pro materiál Sandwich

Stopa	φ_1 [1]	φ_2 [1]
1	0,4366 ± 0,0065	-0,1973 ± 0,0036
2	0,4094 ± 0,0092	-0,1517 ± 0,0029
3	0,3838 ± 0,0078	-0,1073 ± 0,0036
4	0,2772 ± 0,0090	-0,0175 ± 0,0019
5	0,2220 ± 0,0073	0,0134 ± 0,0008
6	0,2009 ± 0,0072	0,0420 ± 0,0011
7	0,2178 ± 0,0048	0,0658 ± 0,0020
8	0,2412 ± 0,0025	0,1178 ± 0,0026
9	0,2763 ± 0,0043	0,1902 ± 0,0020
10	0,2961 ± 0,0034	0,2499 ± 0,0022
11	0,3113 ± 0,0043	0,3055 ± 0,0042

Tab. 11: Tabulka deformací pro materiál HC 300LAD

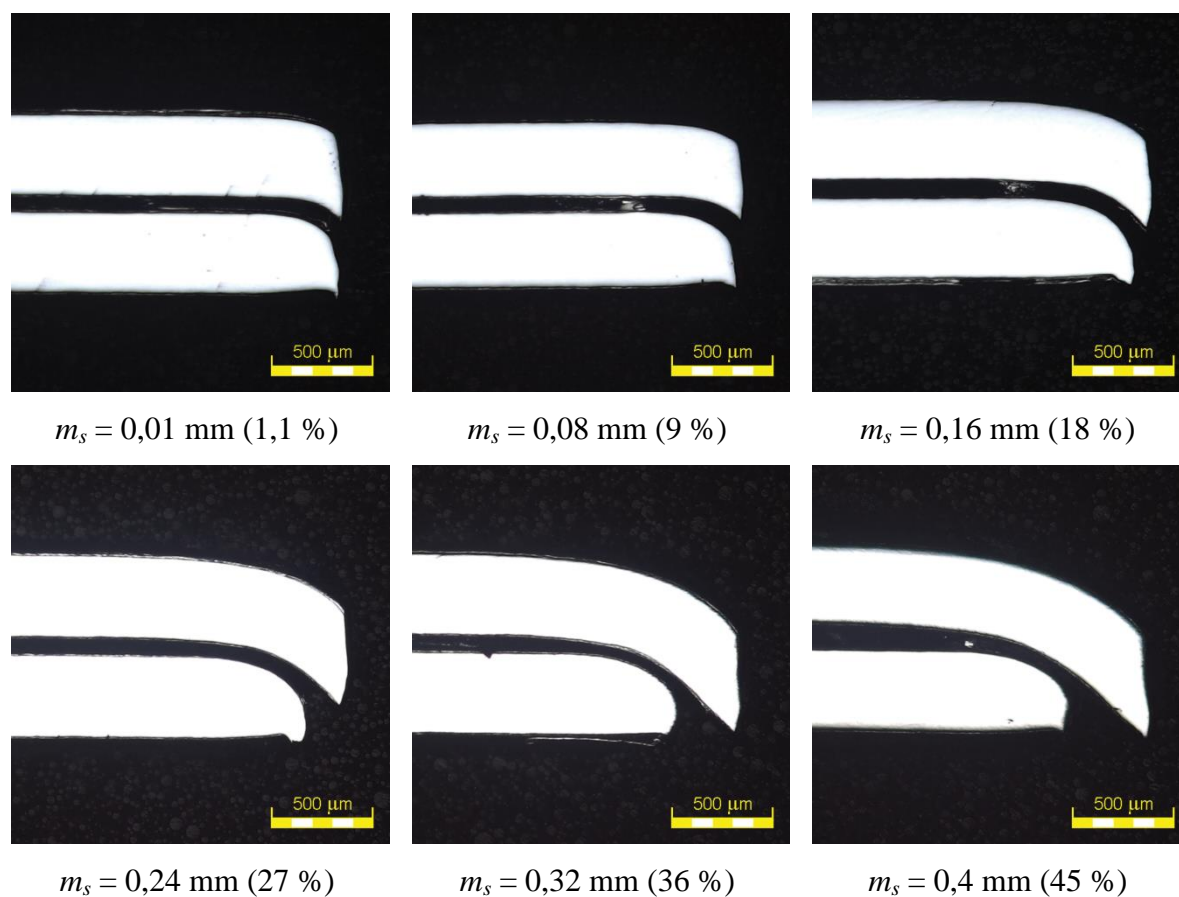
Stopa	φ_1 [1]	φ_2 [1]
1	0,4676 ± 0,0132	-0,2165 ± 0,0078
2	0,4187 ± 0,0093	-0,1271 ± 0,0048
3	0,3426 ± 0,0068	-0,03226 ± 0,0038
4	0,2765 ± 0,0057	0,0053 ± 0,0030
5	0,2337 ± 0,0054	0,0410 ± 0,0015
6	0,2157 ± 0,0063	0,0637 ± 0,0028
7	0,2668 ± 0,0027	0,1001 ± 0,0016
8	0,3151 ± 0,0025	0,1315 ± 0,0019
9	0,3686 ± 0,0025	0,1953 ± 0,0036
10	0,4042 ± 0,0027	0,2840 ± 0,0034
11	0,4169 ± 0,0069	0,4031 ± 0,0046

3.5 Porovnání tvaru střížné hrany

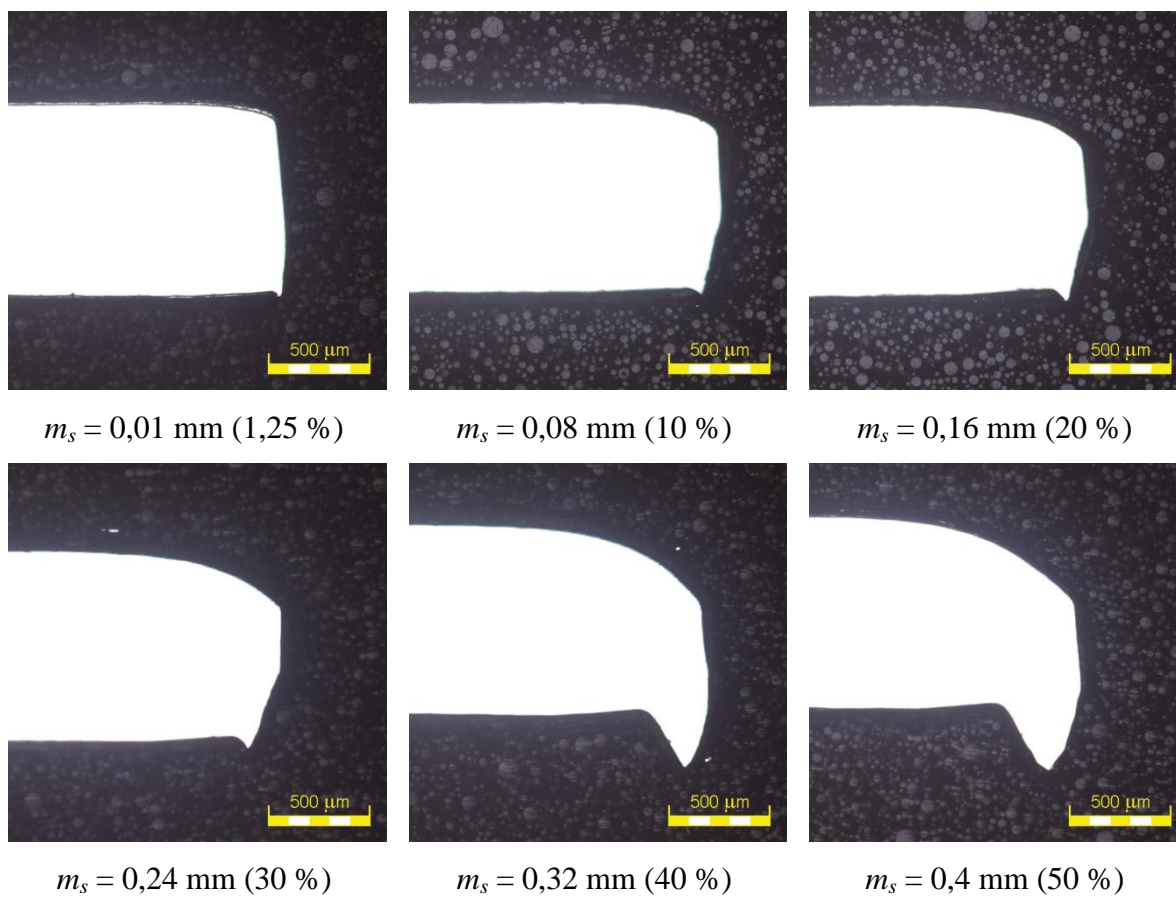
V automobilovém průmyslu jsou velmi často kladeny nároky na jakost střížných ploch z důvodu např. lakování nebo spojování přístřihů. Kvalita střížné hrany výrazně ovlivňuje i následné plastické vlastnosti při lisování. Praktickým problémem při výrobě velkoplošných výlisků je absolutní velikost střížné hrany. V případech, kdy rozměry střížníků dosahují velikosti i několika metrů, není možné dodržet doporučené velikosti střížných mezer (přibližně 5 – 10 % tloušťky stříhaného materiálu). V rámci řešení diplomové práce byla také prováděna analýza tvaru střížné plochy pro oba testované materiály při různých podmínkách stříhání. S ohledem na výše uvedené byla střížná mezera volena v rozsahu 0,01 mm – 0,4 mm, čemuž odpovídá velikost střížné mezery $m_s = 1,25 - 50\%$ u materiálu HC 300LAD, resp. $m_s = 1,1 - 45\%$ u materiálu Sandwich. Stříhány byly kruhové vzorky o průměru 35 mm s různou střížnou mezerou. Rozměr střížnice byl 35 mm a rozměr střížné mezery se měnil výměnou střížníku s odpovídajícím průměrem. Pro zachycení tvaru střížných hran byly zhotoveny metalografické výbrusy.

Tvary střížných ploch materiálu Sandwich jsou zobrazeny v tab. 12, pro materiál HC 300LAD v tab. 13.

Tab. 12: Porovnání střížných ploch *mat. Sandwich*



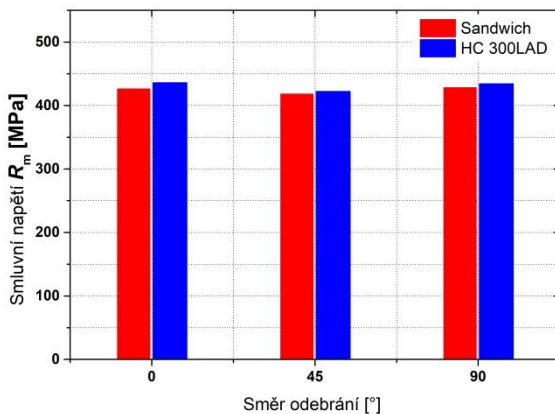
Tab. 13: Porovnání střížných ploch mat. HC 300LAD



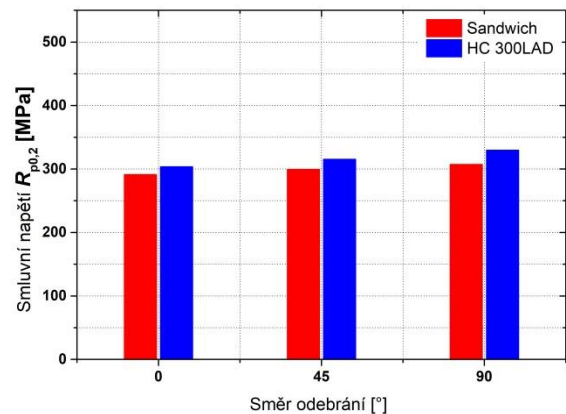
4 DISKUZE VÝSLEDKŮ

4.1 Statická zkouška tahem

Z naměřených hodnot mechanických vlastností obou testovaných materiálů byly sestrojeny sloupcové porovnávací grafy. Na obr. 49 a na obr. 50 jsou porovnány hodnoty smluvních napětí (smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a mez pevnosti R_m) ve směrech 0° , 45° a 90° .

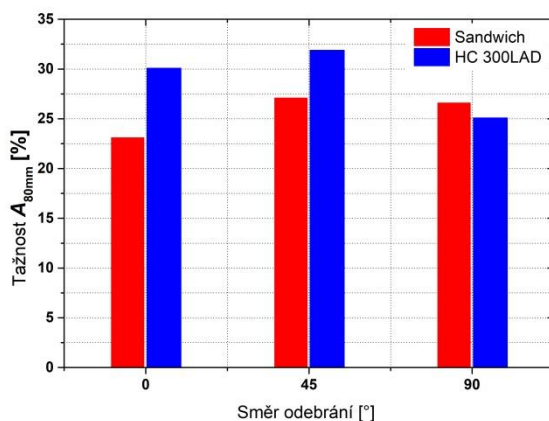


Obr. 49: Porovnání smluvního napětí R_m
 [zdroj: vlastní]

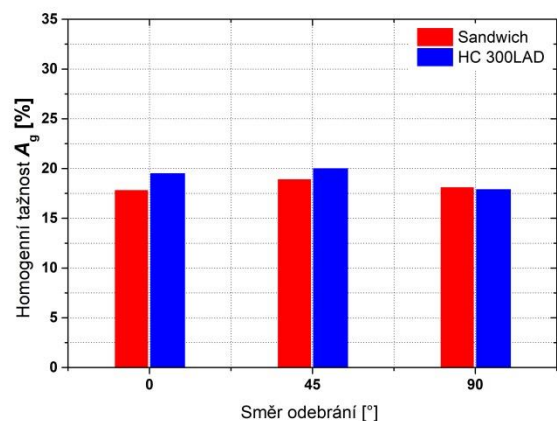


Obr. 50: Porovnání smluvního napětí $R_{p0,2}$
 [zdroj: vlastní]

Na obr. 51 a na obr. 52 jsou v grafu zaneseny pro porovnání hodnoty tažnosti a homogenní tažnosti pro směry 0° , 45° a 90° .

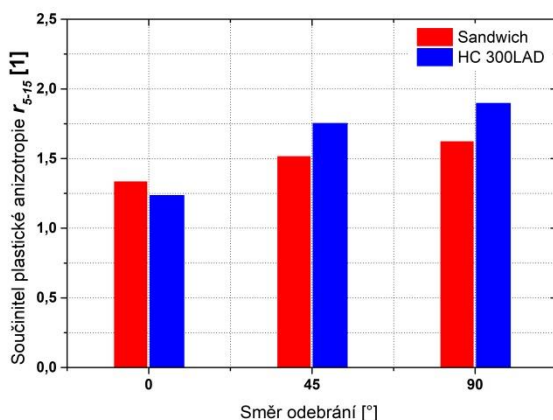


Obr. 51: Porovnání tažnosti A_{80mm} [zdroj: vlastní]

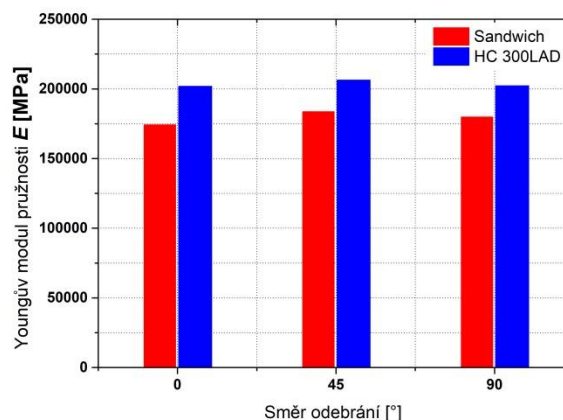


Obr. 52: Porovnání homogenní tažnosti A_g
 [zdroj: vlastní]

Na obr. 53 a na obr. 54 jsou v grafu zaneseny pro porovnání hodnoty součinitele plastické anizotropie a Youngova modulu pružnosti pro směry 0°, 45° a 90°.



Obr. 53: Porovnání součinitele plastické anizotropie r_{5-15} [zdroj: vlastní]



Obr. 54: Porovnání Youngova modulu pružnosti E [zdroj: vlastní]

Pro kvantifikaci rozdílů obou porovnávaných materiálů byly vypočítány průměrné hodnoty mechanických vlastností a odvozených ukazatelů tváritelnosti. Průměrné vlastnosti byly vypočítány dle vztahu (23).

$$X_s = \frac{1}{4} * (X_0 + 2 * X_{45} + X_{90}) \quad (23)$$

Kde značí:

- X_s hledaná průměrná vlastnost
- $X_{0,45,90}$ vlastnosti v jednotlivých směrech odebrání vzorků

V tab. 14 jsou uvedeny průměrné vlastnosti obou testovaných materiálů a zároveň vyjádřen procentuální rozdíl. Základ pro porovnání je materiál HC 300LAD. V tab. 15 jsou zapsány průměrné hodnoty ukazatelů tváritelnosti obou materiálů a jejich porovnání.

Tab. 14: Tabulka průměrných hodnot mechanických vlastností při jednoosém zatěžování

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]	r_{5-15} [1]	E [MPa]
HC 300LAD	316,3	429	19,3	29,7	1,660	204345
Sandwich	299,7	422,9	18,4	26,0	1,497	180412
Rozdíl [%]	-5,3	-1,4	-4,6	-12,6	-9,8	-11,7

Tab. 15: Tabulka odvozených ukazatelů tvářitelnosti

Materiál	UH [1]	ZP [MPa]	KUT [1]
HC 300LAD	0,737	28,85	0,219
Sandwich	0,709	28,36	0,184
Rozdíl [%]	-3,9	-1,7	-15,8

Z přeložených grafů a srovnávacích tabulek je patrné, že oba testované materiály vykazují minimální rozdíly naměřených hodnot mechanických vlastností. Největší rozdíl je vidět u tažnosti, kdy materiál Sandwich vykazuje o 12,6 % nižší tažnost než srovnávací materiál HC 300LAD. Tento fakt si lze vysvětlit sníženou kohezí na rozhraní ocelového plechu a plastového jádra.

Nižší hodnotu Youngova modulu pružnosti u materiálu Sandwich lze přičíst podílu tloušťky folie uprostřed materiálu Sandwich (0,1 mm), který se významným způsobem nepodílí na přenosu síly při zkoušce tahem. Pokud by při výpočtu průřezových ploch materiálu Sandwich byl počítán pouze průřez ocelových plechů, byl by Youngův modul pružnosti prakticky totožný se srovnávacím materiálem HC 300LAD. Tento přístup ale nelze uplatnit, jelikož při reálném lisování je třeba na sendvičové materiály pohlížet jako na celek.

Z provedených aproximací dle norem ASTM E 646 – 78 a EN 10130 + Al: 2000 je vidět, že aproximace dle EN 10130 + Al: 2000 není pro daný typ materiálu Sandwich vhodná. Tzv. offsetová deformace φ_0 definující posunutí křivky vychází záporná, což z praktického hlediska postrádá smysl. Ukazuje se, že aproximace naměřených dat v co největším intervalu hodnot, tak jak to umožňuje norma ASTM E 646 – 78, je daleko výhodnější. Srovnání průměrných aproximačních konstant vypočtených dle vztahu (23) je uvedeno v tab. 16, kde již nebyly uváděny aproximační konstanty získané dle normy EN 10130 + Al: 2000.

Tab. 16: Tabulka průměrných aproximačních konstant při jednoosém zatěžování

Materiál	C [MPa]	n [1]	φ_0 [1]
HC 300LAD	724,3	0,2116	0,0177
Sandwich	715,7	0,2021	0,0057
Rozdíl [%]	-1,2	-4,5	-68,0

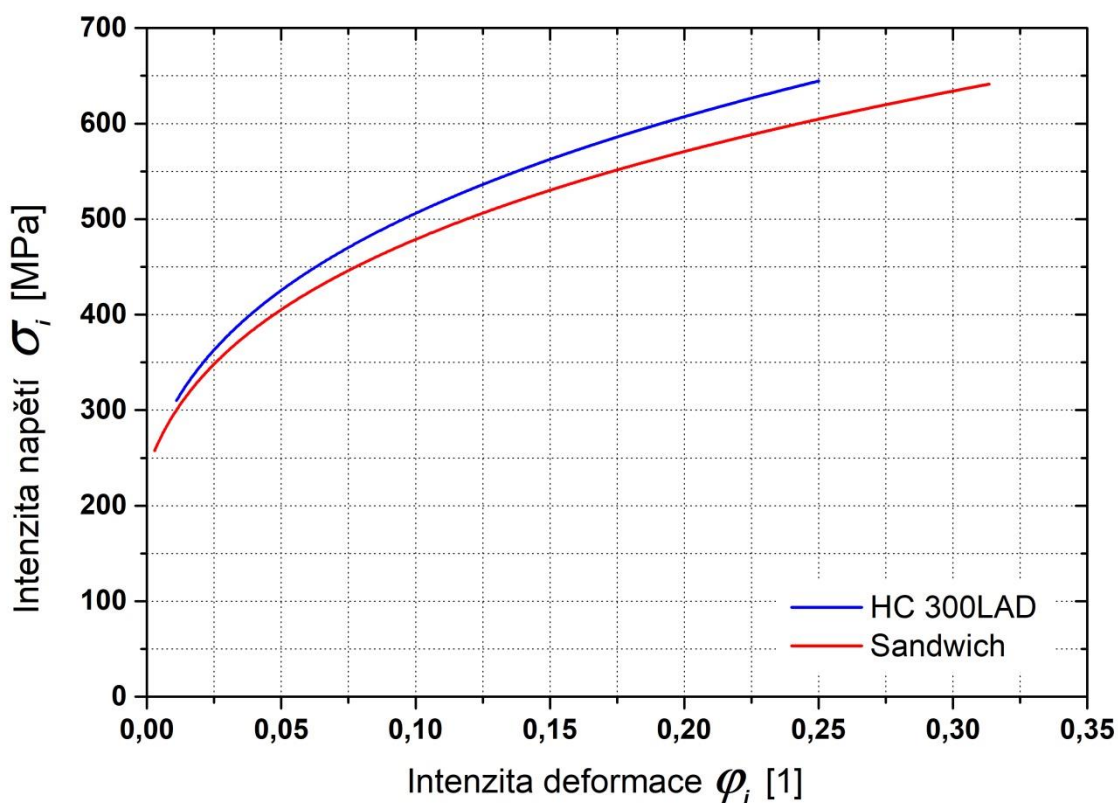
Z výše uvedené tabulky je patrné, že oba materiály vykazují minimální rozdíly v aproximačních konstantách C a n . Hodnota konstanty C (modul monotónního zpevnění) je měřítkem deformačního odporu a hodnota konstanty n udává velikost deformačního zpevnění. Obě tyto konstanty charakterizují křivku zpevnění. U obou materiálů lze tedy říci, že vykazují prakticky totožné deformační chování v oblasti plastických deformací. Velký procentuální rozdíl u offsetové deformace (posunutí deformační křivky φ_0) je dán malou absolutní hodnotou daných konstant. Tato konstanta nemění tvar křivky, ale dává informaci o chování materiálu v oblasti malých pružně plastických deformací. U materiálu Sandwich je tato hodnota pravděpodobně ovlivněna nižším Youngovým modulem pružnosti E v porovnání s materiálem HC 300LAD.

4.2 Zkouška hydrostatickým vypínáním – Bulge test

Naměřené hodnoty aproximačních konstant při biaxiálním zatížení byly porovnány v tab. 17. Jak je patrné, na rozdíl od statické zkoušky tahem, kde jsou minimální rozdíly v křivce zpevnění, je při biaxiálním zatěžování vidět větší zpevnění materiálu HC 300LAD v porovnání s materiálem Sandwich. Pro vzájemné porovnání obou křivek zpevnění byl sestaven graf, který je zobrazen na obr. 55.

Tab. 17: Tabulka průměrných hodnot aproximačních konstant při biaxiálním zatížení

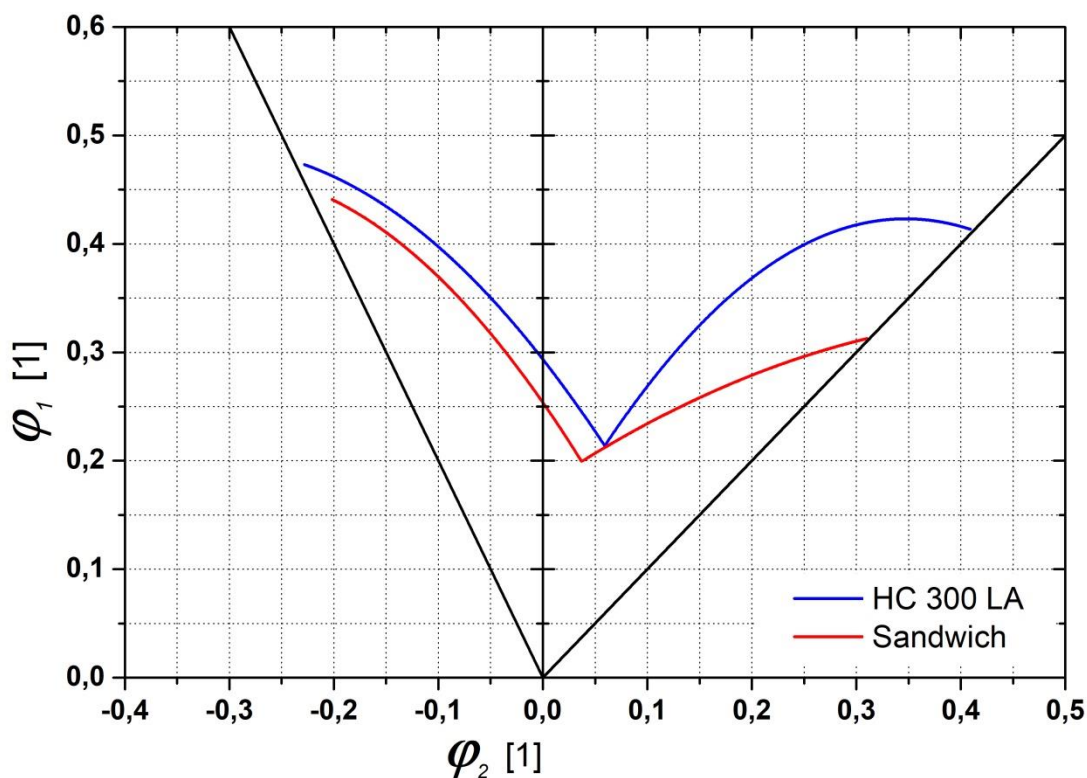
Materiál	C [MPa]	n [1]	φ_0 [1]
HC 300LAD	941,0	0,272	0,0062
Sandwich	865,1	0,267	0,0076
Rozdíl [%]	-8,0	-1,8	+22,5



Obr. 55: Porovnání křivek zpevnění při biaxiálním zatížení [zdroj: vlastní]

4.3 Vypínání pevným polokulovým tažníkem – Nakazima test

Pro oba testované materiály byly z naměřených hodnot sestrojeny diagramy mezních přetvoření (FLD). Jejich porovnání je zobrazeno v grafu na obr. 56. Je vidět, že v tzv. levé větvi diagramu jsou obě křivky vůči sobě posunuté o hodnotu přibližně $\phi_1 = 0,04$. Pro lisování je velmi důležitá minimální hodnota deformace v průsečíku levé a pravé větve FLD diagramu. V tomto místě je rozdíl $\Delta\phi_1 = -0,0148$ (-6,9 %), jak je vidět v tab. 18, kde jsou uvedeny i další dva charakteristické body diagramu. Jedním z těchto bodů je stopa odpovídající jednoosému tahu (vzorek $b = 30$ mm), druhým z nich je stopa odpovídající biaxiálnímu zatížení (vzorek $b = 210$ mm). V pravé větvi FLD diagramu je patrný značný rozdíl ve velikosti i tvaru křivek mezních přetvoření pro oba testované materiály. Materiál Sandwich vykazuje nižší plastické vlastnosti a odolnost proti tvorbě plastického lomu v porovnání s materiálem HC 300LAD.



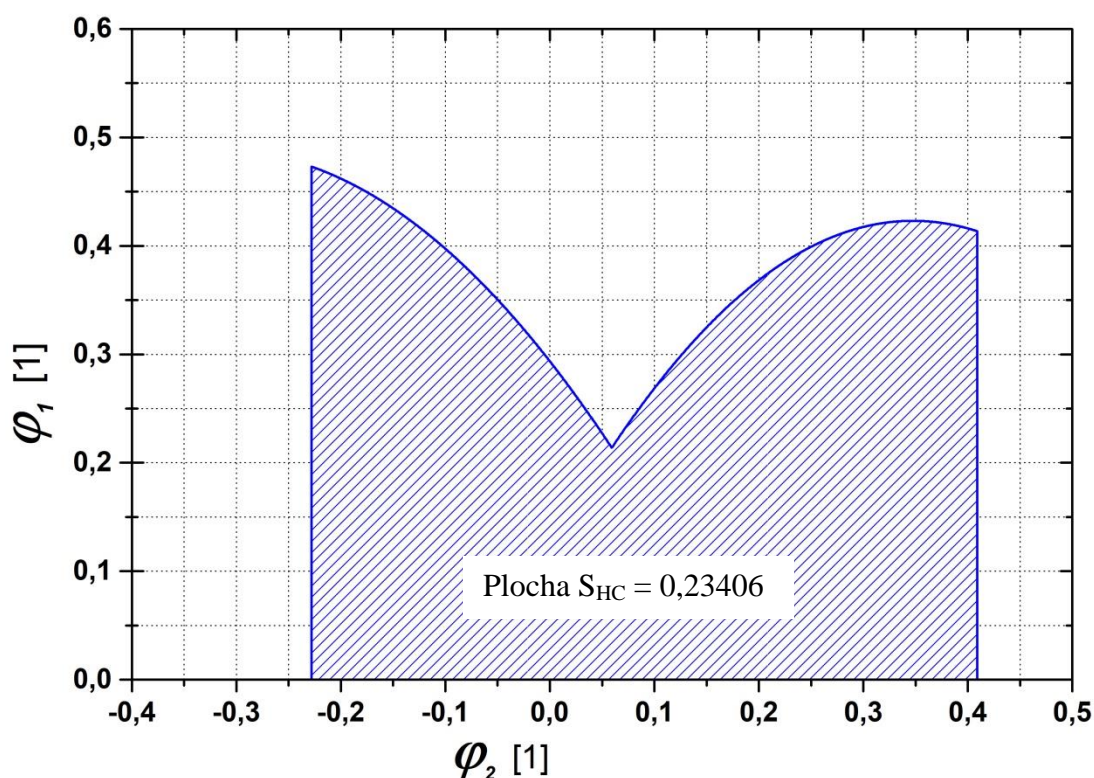
Obr. 56: Porovnání diagramů mezních přetvoření [zdroj: vlastní]

V tab. 18 jsou porovnány charakteristické body křivek obou materiálů.

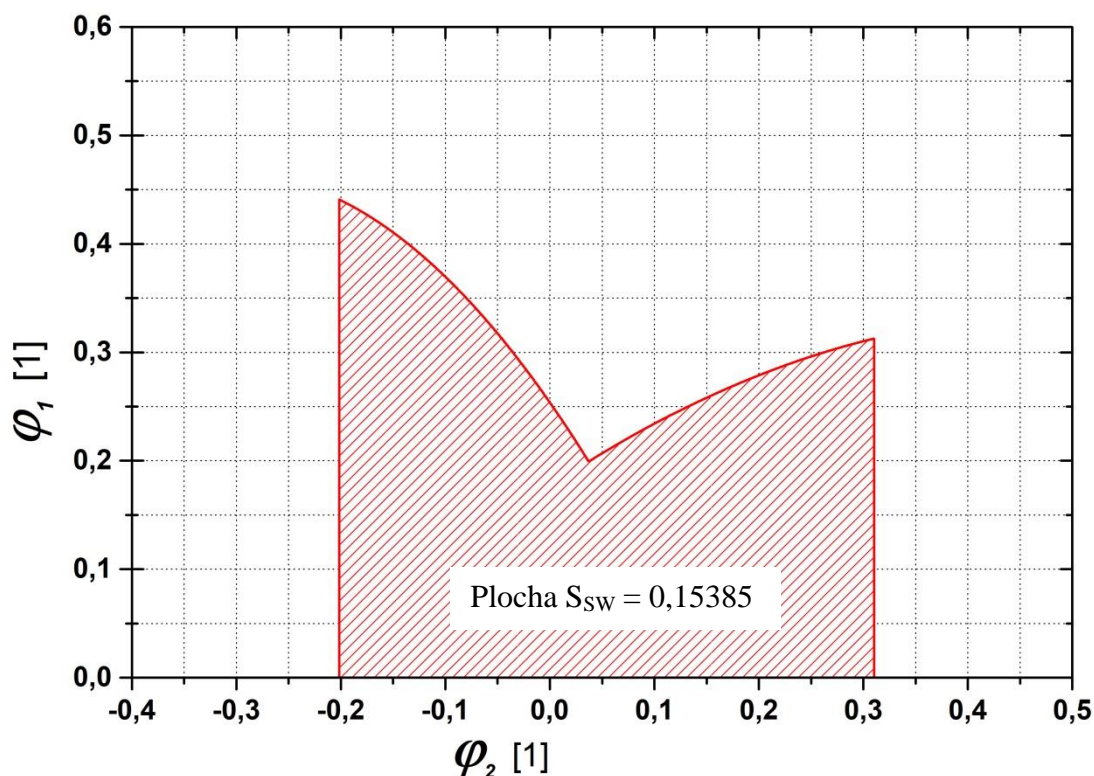
Tab. 18: Tabulka deformací v charakteristických bodech diagramu

Stopa	Materiál	φ_1 [1]	$\Delta\varphi_1$ [1]	$\Delta\varphi_1$ [%]
b = 30 mm	Sandwich	0,4366	-0,0310	-6,6
	HC 300LAD	0,4676		
b = 120 mm	Sandwich	0,2009	-0,0148	-6,9
	HC 300LAD	0,2157		
b = 210 mm	Sandwich	0,3113	-0,1056	-25,3
	HC 300LAD	0,4169		

Pro možnost kvantifikace plastických vlastností obou testovaných materiálů byla vypočítána v sw OriginPro 9 plocha pod křivkami FLD, kterou lze považovat za měřítko tváritelnosti. Výpočet obou ploch je vidět na obr. 57 a na obr. 58. Po vypočtení procentuálního rozdílu ploch pod křivkami obou materiálů bylo zjištěno, že materiál Sandwich má o 34 % menší oblast využitelnou pro tváření. Tento relativně velký rozdíl je dán převážně značným rozdílem v pravé části FLD diagramu. Z tohoto pohledu není materiál Sandwich vhodný pro tváření biaxiálním zatížením.



Obr. 57: Výpočet plochy pod křivkou FLD pro materiál HC 300LAD [zdroj: vlastní]



Obr. 58: Výpočet plochy pod křivkou FLD pro materiál Sandwich [zdroj: vlastní]

4.4 Porovnání tvaru střížné hrany

Při porovnání tvaru střížných hran je patrné, že materiál Sandwich vykazuje vyšší míru vtahování do střížné mezery. Dochází tak ke vzniku většího zaoblení střížné hrany na náběžné straně a větší oblasti utržení ve spodní části střížné hrany. Toto je způsobeno nehomogitou stříhaného materiálu, kdy dochází k nerovnoměrnému stříhání vrchního a spodního ocelového plechu. Vrchní náběžná strana je deformována výrazně více než spodní strana, která je odtrhávána důsledkem tahových napětí. Stojí za zmínku, že při stříhání materiálu Sandwich nedocházelo k výraznému stlačování plastové fólie ve střední pasáži materiálu Sandwich. Z metalografických výbrusů je patrné, že stříhaná hrana materiálu Sandwich bude pravděpodobně náchylná na vznik trhlin při následném tváření.

5 ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se v souladu se zadáním zabývala možnostmi využití sendvičových materiálů při stavbě karoserie automobilu. Zvláštní důraz byl kladen na tvářitelnost materiálu CR270Y340T-LA (v diplomové práci označován jako Sandwich) ve srovnání s běžně používaným mikrolegovaným materiálem HC 300LAD. V teoretické části jsou popsány zkoušky pro vyhodnocování mechanických vlastností materiálů a dále pak základní typy materiálů používaných v konstrukci karoserie automobilu.

Z provedených testů a naměřených hodnot mechanických vlastností a charakteristik je patrné, že materiál Sandwich je vlastnostmi srovnatelný s běžně používaným mikrolegovaným materiálem HC 300LAD. Mechanické hodnoty materiálu Sandwich vykazovaly pokles hodnot v porovnání s materiálem HC 300LAD v řádu jednotek procent. Problematické se ukazuje využití materiálu Sandwich pro aplikace tváření, kde dochází k namáhání biaxiálním zatížením. Tento fakt je patrný z tvaru FLD diagramu, kde je v pravé větvi vidět značný rozdíl v deformační schopnosti obou testovaných materiálů. Možnou příčinou tohoto rozdílu je vliv koheze na rozhraní kov-plast v jádru sendvičového materiálu. Pro další výzkum deformačního chování sendvičových materiálů by bylo vhodné provést analýzu možného porušení na této hranici v závislosti na velikosti deformace. Jednou z možných metod navrhované analýzy je nedestruktivní CT metoda. V levé části FLD diagramu nebyly zaznamenány zásadní technicky významné rozdíly v deformačním chování obou testovaných materiálů. S ohledem na to, že většina konvenčních výlisků je vyráběna posuvem materiálu do tažnice (levá, popř. střední oblast FLD diagramu), není pro tyto aplikace použití sendvičového materiálu omezující.

Analýza střížné hrany prokázala vyšší míru deformace u materiálu Sandwich v porovnání s materiálem HC 300LAD. Existuje tedy reálné riziko šíření zárodků trhlin vzniklých při stříhání během následného tváření. Z pohledu dalšího výzkumu by bylo vhodné provést pro potvrzení této domněnky test např. rozšiřováním otvoru. Z časových důvodů a značného rozsahu předkládané práce tento test již nebylo možné realizovat.

I přes výše uvedené nedostatky je materiál Sandwich vhodný pro tváření technologiemi tažení a může být alternativou ke konvenčním materiálům, kde jsou zvýšené požadavky na snížení hladiny akustického hluku - např. střechy automobilů, kapoty atd.

LITERATURA

- [1] ČSN EN ISO 6892-1 (420310) *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010
- [2] 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.
- [3] *Trhacka.cz - DEFORM 02 - univerzální deformační zkušební zařízení, trhačka* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <http://www.trhacka.cz/>
- [4] MARTINÁK, Milan a Jindřich KLŮNA. *Kontrola a měření: Učebnice pro 3. ročník stř. prům. škol strojnických*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 978-80-03-00103-3.
- [5] BUNGE, H.-J, D BANABIC a Klaus PÖHLANDT. *Formability of metallic materials: plastic anisotropy, formability testing, forming limits*. Berlin; London: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-08750-9.
- [6] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvářitelnost kovových materiálů*. 2009.
- [7] ČSN EN ISO 20482 (420406) *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [8] PÖHLANDT, Klaus. *Materials testing for the metal forming industry*. Berlin u.a: Springer, 1989. ISBN 978-3-540-50651-5.
- [9] *Karosérie osobního automobilu Ing. Petr Šimon Škoda Auto a.s - PDF Stažení zdarma* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html>
- [10] DAVIES, Geoff. *Materials for automobile bodies*. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 978-0-7506-5692-4.
- [11] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ, Karel NOVOTNÝ, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, a FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-214-2340-4.
- [12] ING. DOUBEK, Pavel. *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace*. Liberec, nedatováno. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [13] BC. NĚNIČKA, Filip. *TAŽENÍ PLECHU A JEHO VERIFIKACE POČÍTAČOVOU SIMULACÍ*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [14] HORÁK, Lukáš. *Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS*. Liberec, nedatováno. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.

- [15] *PEVNOSTNÍ MATERIÁLY V KAROSÉRII - PDF Stažení zdarma* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14385059-Pevnostni-materialy-v-karoserii.html>
- [16] ING. LUŇÁČEK, Martin. *Stabilita procesu tváření v závislosti na technologii přípravy polotovaru*. B.m., nedatováno. b.n.
- [17] GRAAASSEL. O., KRUIJGER, L., FROMMEYER, G., a MEYER, L. W. *High strength Fe Mn (Al, Si) TRIP/TWIP steels development - properties – application. International Journal of Plasticity*16. 2000.
- [18] BARAN, Lukáš. *Vliv stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu*. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [19] HORČIČKA, Bc Pavel. *Strukturní stabilita svarových spojů antikoročních ocelí*. Pardubice, 2011. Univerzita Pardubice.
- [20] *Kovová pěna* [online]. 2019 [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kovov%C3%A1_p%C4%Bna&oldid=17338989
- [21] *Železo nikelová kovová pena* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <http://sk.tobenergy.com/battery-material-consumables/iron-nickel-metal-foam.html>
- [22] *Noiseless Steel, Noiseless Metal, Noise damping, Damping Structure-born Sound - Paragon Manufacturing* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.noisedamp.com/>
- [23] Automotive business unit. *thyssenkrupp* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/company/business-units/automotive/>
- [24] *How Noiseless steel (Vibration-damping Steel | Quiet steel) work--F.H. TECHNOLOGY B.V.* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <http://www.fhtech.nl/case/showimg.php?lang=en&id=51>
- [25] MIZERA, David. *Relaxace napětí materiálu při provádění zkoušky hydrostatickým vypínáním*. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Protokol statická zkouška tahem, mat. HC 300LAD, směr odebrání vzorku 0°

Příloha 2: Protokol statická zkouška tahem, mat. HC 300LAD, směr odebrání vzorku 45°

Příloha 3: Protokol statická zkouška tahem, mat. HC 300LAD, směr odebrání vzorku 90°

Příloha 4: Protokol statická zkouška tahem, mat. Sandwich, směr odebrání vzorku 0°

Příloha 5: Protokol statická zkouška tahem, mat. Sandwich, směr odebrání vzorku 45°

Příloha 6: Protokol statická zkouška tahem, mat. Sandwich, směr odebrání vzorku 90°

P1: Protokol statická zkouška tahem, mat. HC 300LAD, směr odebrání vzorku 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

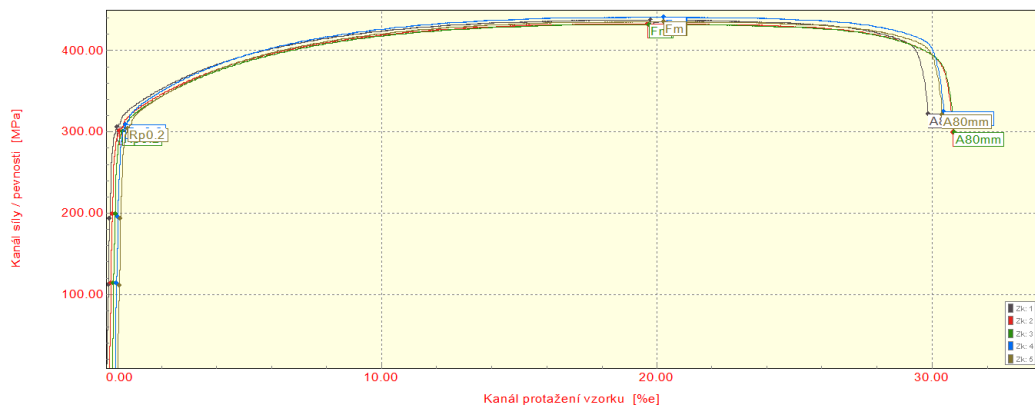
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX300LAD +Z100 MBO (dle EN 10346)
 Rozměry vzorku : [0,8 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. Martin Solfronk
 Datum provedení testu : 22.11.2020
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
1	305.80	437.67	19.49	29.66	1.2406	200145
2	300.81	433.37	19.31	30.49	1.2200	203475
3	300.22	432.51	19.27	30.43	1.2496	202456
4	308.46	441.61	19.66	29.92	1.2307	203457
5	304.45	435.92	19.57	29.78	1.2411	200741

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	303.95	436.21	19.46	30.05	1.2364	202055
Směrodatná odchylka	3.46	3.64	0.17	0.38	0.0114	1543
Minimální hodnota	300.22	432.51	19.27	29.66	1.2200	200145
Maximální hodnota	308.46	441.61	19.66	30.49	1.2496	203475



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

P2: Protokol statická zkouška tahem, mat. HC 300LAD, směr odebrání vzorku 45°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

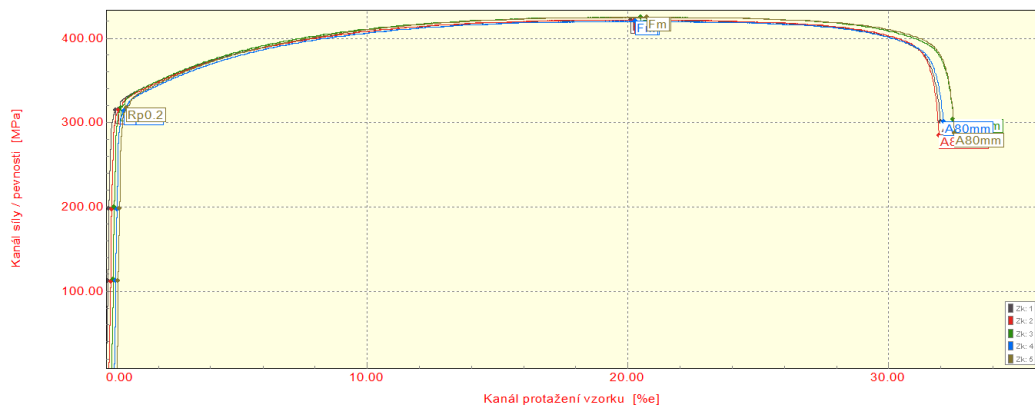
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX300LAD +Z100 MBO (dle EN 10346)
 Rozměry vzorku : [0,8 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 45°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. Martin Solfronk
 Datum provedení testu : 22.11.2020
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
1	314.76	421.26	19.89	31.83	1.7591	204896
2	314.65	421.50	19.94	31.68	1.7463	207223
3	317.57	425.05	20.07	32.12	1.7608	205541
4	313.91	420.00	19.77	31.64	1.7358	208062
5	317.09	424.87	20.12	31.96	1.7634	206774

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	315.60	422.54	19.96	31.85	1.7531	206499
Směrodatná odchylka	1.62	2.29	0.14	0.20	0.0117	1278
Minimální hodnota	313.91	420.00	19.77	31.64	1.7358	204896
Maximální hodnota	317.57	425.05	20.12	32.12	1.7634	208062



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

P3: Protokol statická zkouška tahem, mat. HC 300LAD, směr odebrání vzorku 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

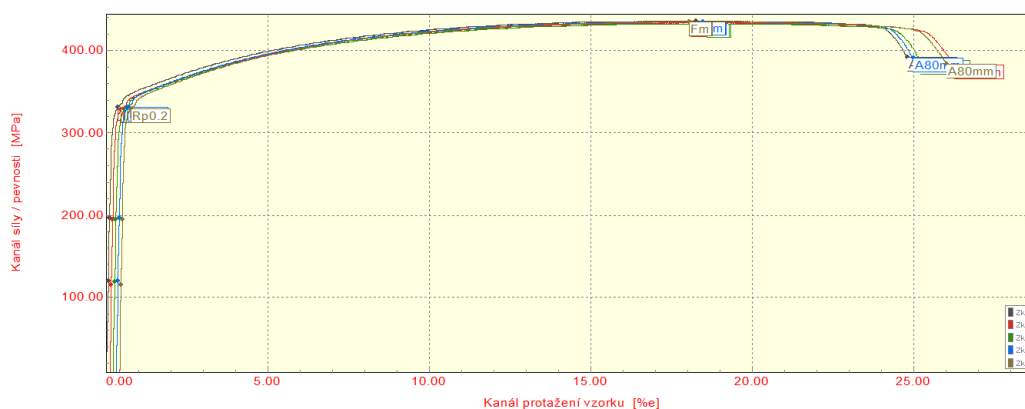
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : HX300LAD +Z100 MBO (dle EN 10346)
Rozměry vzorku : [0,8 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
Vypracoval : Bc. Martin Solfronk
Datum provedení testu : 22.11.2020
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
1	331.75	436.16	18.04	24.61	1.9100	201623
2	328.47	433.99	17.78	25.96	1.8963	202551
3	328.90	432.67	18.19	24.81	1.9042	203751
4	331.21	435.29	17.95	24.49	1.8874	201632
5	329.50	434.86	17.42	25.44	1.8904	202069

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	329.96	434.59	17.87	25.06	1.8977	202325
Směrodatná odchylka	1.44	1.33	0.29	0.62	0.0094	884
Minimální hodnota	328.47	432.67	17.42	24.49	1.8874	201623
Maximální hodnota	331.75	436.16	18.19	25.96	1.9100	203751



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

P4: Protokol statická zkouška tahem, mat. Sandwich, směr odebrání vzorku 0°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

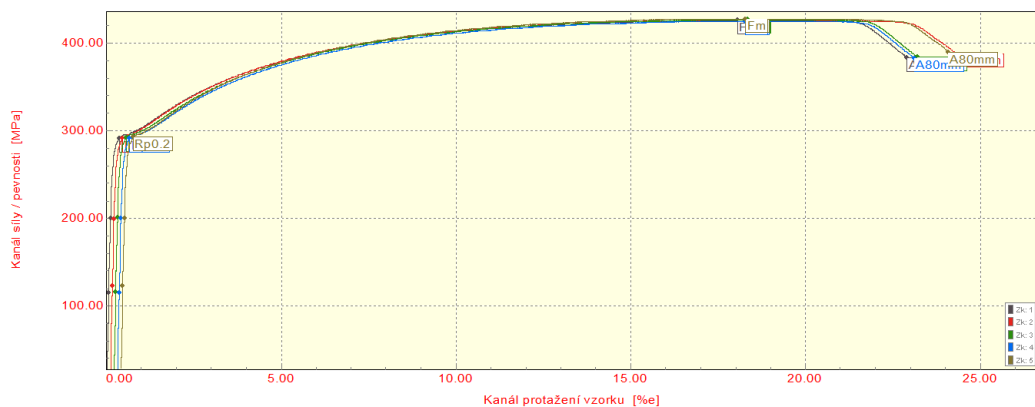
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR270Y340T-LA –EG47/47-E-R-O (dle VW 50065)
 Rozměry vzorku : [0,9 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 0°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. Martin Solfronk
 Datum provedení testu : 22.11.2020
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
1	291.64	426.00	17.81	22.69	1.3362	173320
2	291.15	426.59	18.00	23.93	1.3412	174141
3	292.19	426.86	17.88	22.78	1.3245	173153
4	291.18	425.15	17.74	22.60	1.3498	173489
5	292.49	427.87	17.63	23.45	1.3214	177314

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	291.73	426.49	17.81	23.09	1.3346	174283
Směrodatná odchylka	0.60	1.01	0.14	0.58	0.0118	1735
Minimální hodnota	291.15	425.15	17.63	22.60	1.3214	173153
Maximální hodnota	292.49	427.87	18.00	23.93	1.3498	177314



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

P5: Protokol statická zkouška tahem, mat. Sandwich, směr odebrání vzorku 45°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

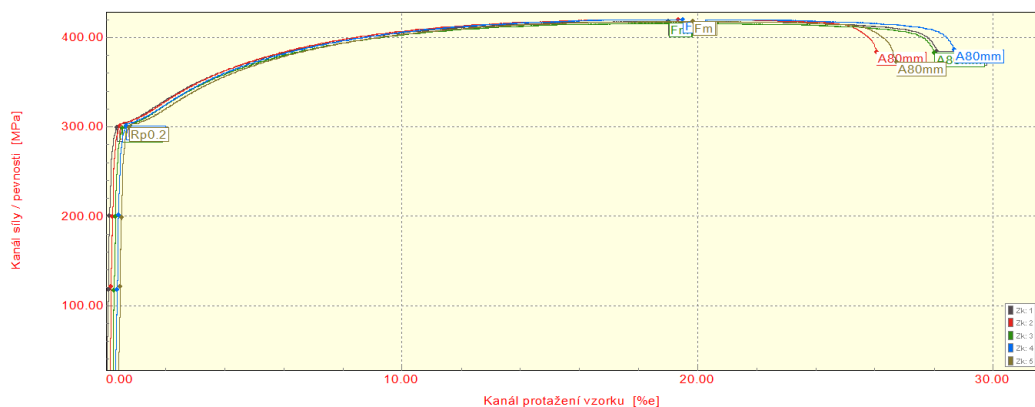
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR270Y340T-LA –EG47/47-E-R-O (dle VW 50065)
 Rozměry vzorku : [0,9 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 45°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. Martin Solfronk
 Datum provedení testu : 22.11.2020
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
1	299.30	417.92	18.79	27.88	1.5141	182293
2	301.17	419.95	19.03	25.75	1.5203	187035
3	297.85	415.81	18.60	27.60	1.5196	182756
4	300.45	420.01	18.97	28.16	1.5217	181829
5	299.36	417.85	19.23	26.14	1.5006	184678

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	299.63	418.31	18.92	27.11	1.5153	183718
Směrodatná odchylka	1.27	1.75	0.24	1.09	0.0087	2148
Minimální hodnota	297.85	415.81	18.60	25.75	1.5006	181829
Maximální hodnota	301.17	420.01	19.23	28.16	1.5217	187035



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

P6: Protokol statická zkouška tahem, mat. Sandwich, směr odebrání vzorku 90°

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

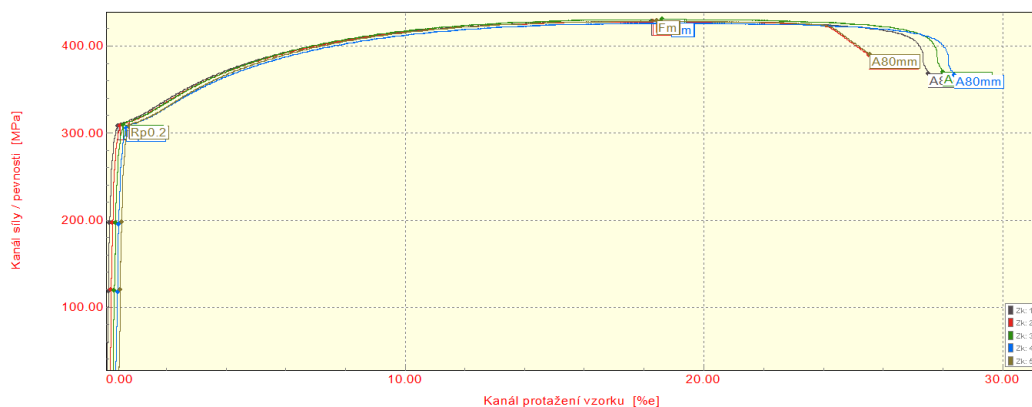
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : CR270Y340T-LA –EG47/47-E-R-O (dle VW 50065)
 Rozměry vzorku : [0,9 x 20] mm
 Směr odebrání vzorku : 90°
 Teplota : RT
 Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
 Vypracoval : Bc. Martin Solfronk
 Datum provedení testu : 22.11.2020
 Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
1	307.72	428.46	18.00	27.32	1.6271	179400
2	307.54	428.25	17.98	25.21	1.6204	181893
3	309.21	430.58	18.18	27.59	1.6311	178987
4	305.66	426.32	18.37	27.87	1.6198	175945
5	308.13	428.67	17.79	24.96	1.6112	183418

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %	R	E MPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	307.65	428.46	18.06	26.59	1.6219	179928
Směrodatná odchylka	1.29	1.51	0.22	1.39	0.0076	2875
Minimální hodnota	305.66	426.32	17.79	24.96	1.6112	175945
Maximální hodnota	309.21	430.58	18.37	27.87	1.6311	183418



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