

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**KOSTRUNEK
LUKÁŠ**

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kostrunek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **476074**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza rozptylu mechanických vlastností různých šarží materiálu CR5

Název diplomové práce anglicky:

Analyse of variance of mechanical properties of different batches of CR5 material

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je naměřit kompletní materiálové karty pro numerickou simulaci plošného tváření materiálu CR5.

- 1) Seznámení s problematikou robustnosti numerické simulace
- 2) Návrh metodiky testování
- 3) Provedení a vyhodnocení experimentu
- 4) Příprava dat pro tvorbu materiálové karty numerické simulace
- 5) Porovnání vlivu rozptylu mechanických vlastností zkoumaných šarží
- 5) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 12004-2
ČSN EN ISO 6892-1
Sheet Metal Forming Processes and Die Design, Vukota Bojanovic
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Novák ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. František Tatiček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **11.08.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Vít Novák
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou rozptylu vlastností materiálu CR5 s ohledem na tvářitelnost. V teoretické části se věnuje rozboru důležitých pojmů nutných pro porozumění problematice tváření materiálu, faktorů ovlivňujících chování materiálu podléhajícího deformaci a způsobů měření mechanických vlastností materiálů. V praktické části je představen návrh experimentu a jeho realizace v podobě provedení zkoušek tahem a zkoušek dle Nakajimy pro zjištění klíčových materiálových charakteristik nutných pro popis chování materiálu CR5. Ve vyhodnocení experimentu jsou výsledky jednotlivých šarží porovnány mezi sebou. Výsledkem experimentu je porovnání mechanických vlastností jednotlivých šarží, vytvoření datové banky obsahující údaje o všech provedených měřeních a data použitelná pro vytvoření materiálové karty do simulačního softwaru.

Klíčová slova:

Tváření, zkouška tahem, křivky mezních deformací, simulace, rychlost deformace

Abstract

This thesis deals with the issue of variance of mechanical properties of CR5 material. In the theoretical part, it deals with the analysis of important concepts necessary for understanding the issue of material forming, factors influencing the behavior of material subjected to deformation and methods of measuring the mechanical properties of materials. In the practical part the proposal of the experiment is presented and its realization in the form of carrying out tensile tests and Nakajima tests are presented to determine the key material characteristics necessary for describing the behavior of CR5 material. In the evaluation of the experiment, individual results are compared with each other. The result of the experiment is comparison of mechanical properties of individual batches, creation of a data bank containing data on all performed measurements and data usable for creating a material card into simulation software.

Keywords:

Sheet metal forming, tension test, forming limit curve, simulation, strain rate

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma **Analýza rozptylu mechanických vlastností různých šarží materiálu CR5** vypracoval samostatně pod vedením Ing. Víta Nováka a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Praze dne

.....

Poděkování

Tímto děkuji panu Ing. Vítovi Novákovi za odborné vedení při provádění experimentu, stejně jako při psaní diplomové práce. Dále také děkuji panu Ing. Františkovi Tatíčkovu Ph.D. za ochotu a pomoc při řešení projektu. Velký dík také patří rodině a přítelkyni za to, že při mně s trpělivostí celou tu dobu stáli.

Obsah

2	Úvod	8
1.	Deformace materiálu	9
2.1	Exponent deformačního zpevnění	10
2.2	Součinitel plastické Anizotropie.....	11
2.3	Rychlost deformace	12
2.4	Materiálové modely plasticity	13
2.4.1	Materiálový model plasticity Vegter.....	14
2.4.2	Corus Vegter Lite	15
2.	Křivky mezních přetvoření.....	18
2.5	Digitální korelace obrazu.....	19
2.5.1	2D DIC	19
2.5.2	3D DIC	21
2.6	Zkouška tahem.....	22
2.7	Zkouška dle Nakajimy	24
3	Návrh experimentu	26
3.1	Příprava vzorků pro zkoušku tahem	27
3.1.1	Odmaštění vzorků	27
3.1.2	Aplikace nátěrového systému.....	28
3.2	Příprava vzorků pro FLD.....	28
3.2.1	Odmaštění vzorků	28
3.2.2	Aplikace nátěrového systému.....	29
3.2.3	Tribologický systém.....	30
3.2.4	Zkušební zařízení	31
3.2.5	Měřicí zařízení.....	32
3.2.6	Kalibrace	33
4	Průběh měření	35
4.1	Mechanické vlastnosti materiálu CR5	38
4.2	Vyhodnocení experimentu zkoušky tahem.....	38
4.3	Vyhodnocení experimentu zkoušky dle Nakajimy.....	53
4.4	Chemické složení.....	62
5	Závěrečné zhodnocení.....	64
	Seznam použité literatury	66
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	69
	Seznam grafů.....	70

Seznam Zkratek

Δr	-	Stupeň plošné anizotropie
A_g	%	Homogenní plastická tažnost při maximálním zatížení
A_{gt}	%	Celková tažnost při maximálním zatížení
BCC	-	Body centered cube – prostorově středěná mřížka
C	[MPa	Materiálová pevnostní konstanta
E	MPa	Youngův modul
$\dot{\epsilon}$	s^{-1}	Rychlost deformace
FCC	-	Face centered cube – plošně středěná mřížka
FLC	-	Forming Limit Curve – Křivka mezních deformací
FLD	-	Forming limit diagram – Diagram mezních deformací
n	-	Exponent deformačního zpevnění
r	-	Součinitel plastické anizotropie
ReH, ReL	MPa	Horní, dolní mez kluzu
R_m	MPa	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
ϵ, φ	-	Smluvní skutečná deformace

Úvod

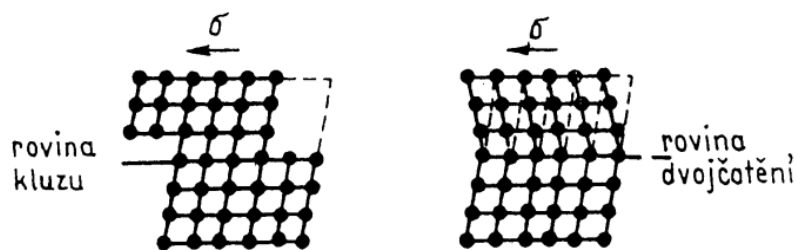
Automobilový průmysl je odvětví, které stojí před výzvou v podobě stále rostoucích požadavků na bezpečnost, ekologičnost a udržitelnost. Z toho důvodu je inovace materiálů klíčovou úlohou pro dosažení zadaných cílů. Automobilový průmysl je zde již přes sto let a obzvlášť v posledních letech je kladen důraz na zlepšení vlastností funkčních i pohledových částí karoserie s využitím různých výrobních technologií či nových materiálů. Konstrukce, výroba a montáž takových aplikací by byla nesmírně nákladná, kdyby v procesu výroby nebyly využívány simulace. Ty umožňují predikovat chování materiálu během procesu výroby, odhalit chyby či nedokonalosti v průběhu přípravy a napravit je ještě předtím, než se projeví v lisovacím procesu při výrobě dílů. Dále urychlují vývoj a testování reálných aplikací a snižují celkové finanční nároky.

Avšak pro splnění původního požadavku, a sice přesnější numerické simulace procesu tváření, je třeba při simulačním testování disponovat správnou datovou kartou obsahující co nejpřesnější informace týkající se technologických vlastností ovlivňujícími výsledek numerické simulace. Na základě těchto předpokladů vznikl požadavek na porovnání vlastností různých šarží materiálu CR5, ze kterého jsou vyráběny výlisky hlubokým tažením. Při použití materiálu od různých výrobců se v průběhu lisovacího procesu mohou objevovat odchylky způsobené rozdílnými vlastnostmi materiálu. Pro zhodnocení rozdílnosti různých šarží byl vytvořen experiment, jehož cílem je získání nejpesimističtější varianty mechanických vlastností. Skrze technologické zkoušky byly vytvořeny soubory dat obsahující porovnání jednotlivých šarží a data pro simulační software. S přesnými hodnotami mechanických vlastností materiálu bude možné využívat maximálního potenciálu pro dosažení nejekonomičtějšího využití pásu polotovaru.

1. Deformace materiálu

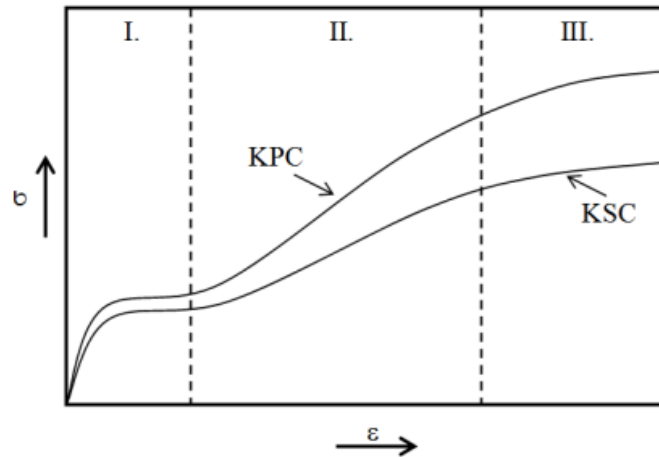
Plastická deformace je základem pro proces tváření. Principem plastické deformace je kluz či dvojčatění. Při plastické deformaci dochází k pohybu dislokací, jejichž počet se při plastické deformaci zvětšuje. [1]

Při tváření materiálu dochází k houstnutí dislokací uvnitř materiálu, již přítomné a nově vznikající překážky začínají interagovat a vzájemně si překáží. Tento efekt vytváří odpor proti dalšímu fyzickému přetvoření a dochází tak ke zpevnění materiálu. Postupující deformace se tak děje za stále rostoucího napětí. Plastická deformace je v ocelích umožněna soudržností atomů v mřížce, pravidelností jejich uspořádání. Mechanismy realizace plastické deformace jsou dva: kluzem a dvojčatěním, viz. obr. 1. [1], [2]



Obrázek 1: Mechanismy deformace [2]

Při tváření za studena dochází ve většině případů ke kluzu. Jedná se o postupný pohyb dislokací po kluzných rovinách vlivem vnějšího nadkritického smykového napětí až na hranici krystalového zrna. Pro tento mechanismus je potřeba alespoň 5 nezávislých kluzových systémů, což materiály s mřížkou BCC (prostorově centrovaná) a FCC (plošně centrovaná) splňují. K dvojčatění dochází výhradně při vyšších rychlostech deformace, kdy vlivem deformací vzniklých vakancí, intersticiál, mikrotrhlin atd. dochází k částečnému přesunu atomů o část meziatomové vzdálenosti. Při postupném zpevňování materiálu dochází až k jeho postupnému vyčerpání plasticity. Na následujícím obrázku č. 2 vidíme křivky zpevnění pro plošně a prostorově centrovanou mřížku. [1], [2], [3]



Obrázek 2: Zpevnění materiálu s mřížkou plošně a prostorově středěnou [2]

Deformační zpevnění je umožněno tvářením pod teplotou rekrystalizace, kdy nedochází k uzdravovacím procesům. [4]

1.1 Exponent deformačního zpevnění „n“

Pro určení zpevňujících vlastností materiálu při působení vnějšího napětí je potřeba provést zkoušku tahem dle ČSN EN ISO 6892-1 a vyhodnotit exponent deformačního zpevnění dle ČSN EN ISO 10275, který určuje míru zpevňování materiálu při vystavení jednoosému tahu. Pro tváření za studena je jeho hodnota vždy menší než 1 a významně ovlivňuje tvářitelnost materiálu. Jeho hodnotu ovlivňuje množství doprovodných prvků, velikosti zrna a dalších parametrů. Velikost hodnoty exponentu deformačního zpevnění rozděluje materiály do tří kategorií: [5], [6]

- < 0,215 špatná tvářitelnost
- 0,215 - 0,25 dobrá tvářitelnost
- > 0,25 výborná tvářitelnost

Matematicky je exponent vyjádřen z rovnice popisující závislost intenzity skutečných napětí na intenzitě skutečných deformací:

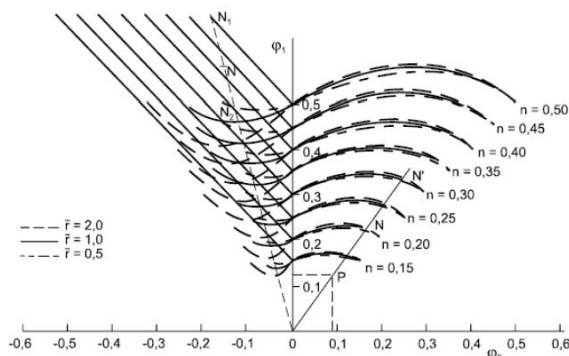
$$\sigma_i = C \cdot \varphi_i^n$$

kde:

- σ_i – skutečné napětí [MPa]
- C – materiálová pevnostní konstanta [MPa]
- φ – skutečná deformace [-]

- n - exponent deformačního zpevnění [-]

Velikost hodnoty exponentu ovlivňuje polohu křivek limitních deformací, s jeho růstem dochází ke zvyšování oblasti bezpečné deformace, jak vidíme na obr. 3. [4], [5], [6]



Obrázek 3: Vliv " n " exponentu deformačního zpevnění na polohu křivek mezní deformace [8]

1.2 Součinitel plastické anizotropie „ r “

Při vnějším deformačním působení např. válcováním dochází k prodlužování zrn při zachování jejich objemu. Nejedná se tedy o nepříznivý „růst“ zrna, nýbrž o jeho prostorové přetvoření. Při přetvoření materiálu dochází v hlavních směrech deformace ke vzniku řádkovitých útvarů. Jedná se o jeden z parametrů ovlivňující nehomogenitu materiálu. Dalšími jsou například vměstky, rozdílná velikost zrn či segregace prvků. Důsledkem je rozdílná směrová závislost mechanických vlastností materiálu v souřadném systému. Pro ploché výlisky rozdělujeme anizotropii na dva typy:

Plošná – popisuje změnu vlastností v rovině plechu, tedy mezi směrem válcování a směrem kolmým na něj, kdy nejlepších hodnot dosahujeme ve směru válcování a nejhorších v kolmém.

Normálová – obdobně popisuje změnu mechanických vlastností, avšak ve směru kolmém na rovinu plechu. Vyjádřena je jako poměr plastických deformací ve směru šířky φ_2 a tloušťky φ_3 . [9], [10]

Součinitele plastické anizotropie je definován:

$$r = \frac{\varphi^b}{\varphi^s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{L_k b_k}{L_0 b_0}}$$

Kde:

r - součinitel plastické anizotropie

φ_b, φ_s – logaritmické deformace ve směru šířky a tloušťky

L_0, b_0, s_0 – počáteční délka, šířka a tloušťka zkoušené části zkušební tyče

L_k, b_k, s_k – konečná délka, šířka a tloušťka zkoušené části zkušební tyče

Hodnoty váženého průměru součinitele plastické anizotropie získáme ze vztahu:

$$\bar{r} = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90})$$

Kde:

r_0, r_{45} a r_{90} - hodnoty součinitele plastické anizotropie ve směrech $0^\circ, 45^\circ$ a 90° vůči směru válcování plechu.

Hodnota součinitele plastické anizotropie nám určuje v praxi tváritelnost materiálu. Rozdělení je následující:

$\bar{r} > 1,6$	vynikající
$\bar{r} = 1,25 \div 1,6$	dobrá
$\bar{r} = 1,0 \div 1,25$	uspokojivá
$\bar{r} < 1,25$	nízká
$\bar{r} < 0,7$	velmi špatná

Hodnotu stupně plošné anizotropie Δr pro vyjádření sklonu ke tvorbě cípů získáme ze vztahu:

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 - 2r_{45} + r_{90})$$

Součinitel plastické anizotropie získáme v souladu s normou ČSN EN ISO 10113. [9]

1.3 Rychlost deformace

Cílem práce je vytvořit porovnání jednotlivých šarží materiálu CR5, dále je ale také potřeba postupovat držet krok s inovačními metodami ve výrobě. Různé výrobky mohou být ve výrobě vystaveny různým rychlostem lisování, resp. taktu linky. Při použití rychlejšího cyklu lisovacího zařízení uvažujeme zpevnění materiálu za cenu snížení zásoby plasticity. [11], [12]

Rychlost deformace je v případě měření zkoušky tahem ovlivněna rychlostí pohybu čelistí. V praxi však také záleží na geometrii lisovací formy a tedy i způsobu vzniku deformace. Jedná se tedy o změnu deformace v čase danou vzorcem:

$$\varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

$$d\varepsilon = d\left(\ln \frac{l_1}{l_0}\right)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\left(\ln \frac{l_1}{l_0}\right)}{dt}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{l_0} * \frac{dl_1}{dt}$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l_0}$$

V praxi se však rychlost deformace nepřisuzuje pouze k rychlosti pracovního cyklu, protože na rychlost deformace má vliv i způsob deformace, geometrie lisovací formy a další parametry. [13], [14], [15]

1.4 Materiálové modely plasticity

Při postupném zatížení materiálu vnějším napětím dochází v materiálu nejprve k elastické deformaci řídicí se Hookovým zákonem. Při odstranění napětí v této fázi dojde k úplnému odstranění deformace a navrácení do původního stavu. Při překročení elastických limitů dochází k trvalému deformačnímu přetvoření a deformace se již neřídí Hookovým zákonem. V oboru pevnosti a pružnosti jsme se věnovali výpočtům uvažujícím izotropní chování materiálu. Jak z předešlého textu víme, v případě našeho experimentu, kdy je analyzovaným vzorkem plošný výlisek, je ale třeba počítat s významnou anizotropií materiálu. V případě izotropních materiálů se nejčastěji používají jako materiálové modely plasticity energetická podmínka H.M.H. (Huber, Mises, Hencky) předpokládající tok materiálu při dosažení energetické hodnoty vyjadřující překročení kritické hodnoty. Další z podmínek hojně uplatňovanou na izotropní materiály je Trescova podmínka plasticity předpokládající překročení hodnoty K reprezentující maximální smykové napětí. Obě rovnice a jejich porovnání si můžeme prohlédnout níže, viz obr. 4: [3], [4], [16], [17]

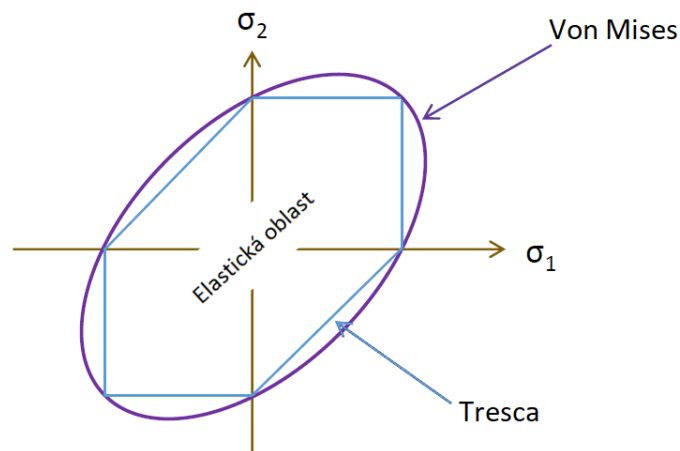
Energetická podmínka H.M.H.

$$K = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Trescova podmínka plasticity:

$$K = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Porovnání podmínek plasticity pro izotropní materiály:



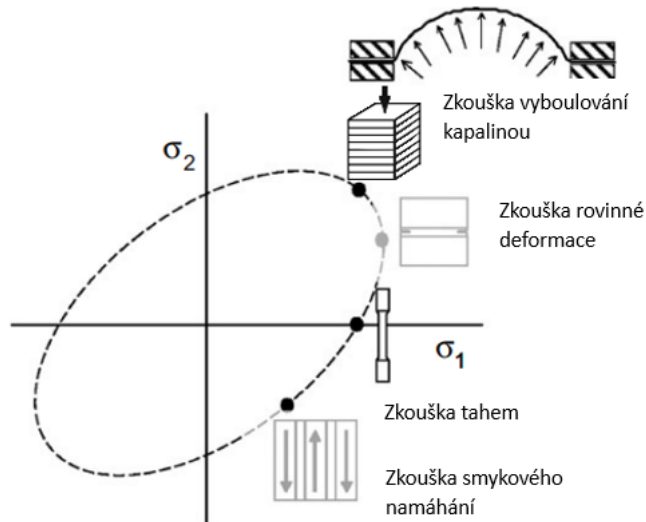
Obrázek 4: Porovnání modelů plasticity H.M.H a dle Trescy [16]

1.4.1 Materiálový model plasticity Vegter

Tyto materiálové modely plasticity avšak nejsou schopny popsat chování materiálů s dostatečnou přesností. Pro simulace anizotropických materiálů se používají materiálové modely podle Hilla, Barlat a Vegtera. Pro náš experiment budeme používat model Cortus Vegter. K jeho vytvoření je potřeba vytvořit soubor referenčních bodů pomocí normovaných zkoušek. Pro jednotlivé referenční body kritéria je potřeba provést:

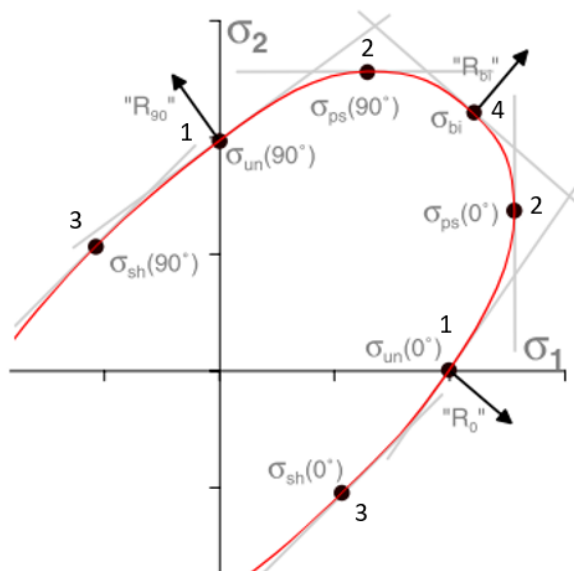
- 1) Zkoušku tahem - 0° a 90° - jednoosé namáhání
- 2) Zkoušku rovinné deformace - 0° a 90° - rovinná deformace
- 3) Zkoušku smykového namáhání - 0° a 90° - čisté smykové namáhání
- 4) Zkoušku vyboulování kapalinou - - rovnoměrné dvouosé namáhání

Jednotlivé referenční body jsou zaneseny do grafu plochy plasticity σ_1 - σ_2 , a následně je pomocí Bezierovy křivky vytvořen matematický popis materiálového modelu. Jednotlivé zkoušky a polohy bodů z nich získaných vidíme na obr. č. 5. [16]



Obrázek 5: Názorné schéma zkoušek pro vytvoření materiálového modelu Vegter [16]

Kromě hodnot napětí v těchto bodech se také zohledňují deformační vektory pro konstrukci tečen křivky. Vytvořením parametrické křivky získáme data ohledně elastických schopnostech materiálu v různých poměrech deformací. Parametrickou náročnost modelu plasticity Vegter vidíme na obrázku č. 6. Vidíme, že pro vytvoření křivky je zapotřebí poměrně značné množství bodů vycházejících z různých technologických zkoušek. Pro zjednodušení tvorby modelů plasticity byl vyvinut materiálový model plasticity Vegter-Lite. [16], [17]

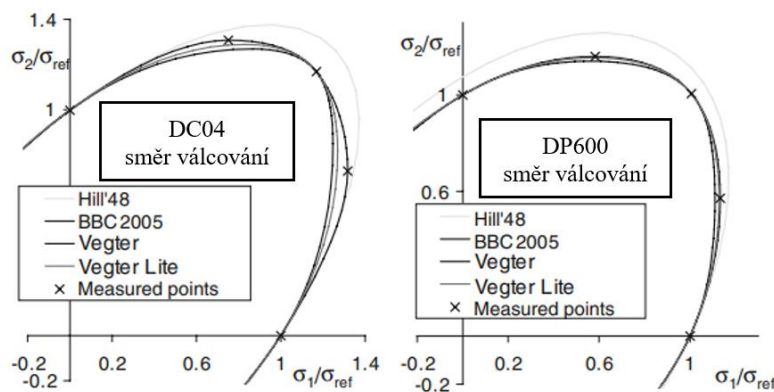


Obrázek 6: Tvorba modelu plasticity ze získaných parametrů [9]

1.4.2 Corus Vegter Lite

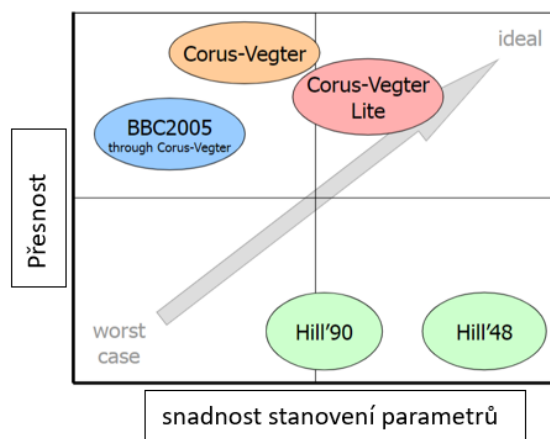
Výhodou materiálového modelu Corus Vegter je jeho vysoká přesnost, avšak skýtá nedostatek v počtu vyžadovaných měření a náročnosti na počet vykonaných zkoušek. Z toho

důvodu byla vytvořena jednodušší varianta Corus Vegter Lite, pro kterou dosažení přesnosti uspokojivých výsledků vyžaduje provedení pouze zkoušky tahem a zkoušky vyboulení kapalinou (bulge test). Model Vegter Lite pracuje s méně parametry a snižuje jejich počet z 18 na 7. Také snižuje počet referenčních bodů. Pro získání referenčních bodů je zapotřebí udělat zkoušku tahem ve 3 úhlech rotace vůči směru válcování - 0°, 45° a 90°. Při konstrukci křivky je namísto Bezierovy interpolace 2. řádu použita NURB interpolace 2. řádu. Jediným rozdílem je uvedení váhového faktoru ovlivňujícího polohu křivky mezi referenčními body. Výsledkem je tedy materiálový model vyžadující méně provedených zkoušek s menším počtem referenčních bodů, nicméně tuto úsporu kompenzuje nižší přesnost a složitější práce s více komplexní NURB křivkou. Rozdíl při vytvoření materiálových modelů pro totožný materiál si můžeme prohlédnout na obrázku č. 7 níže. [17], [18]



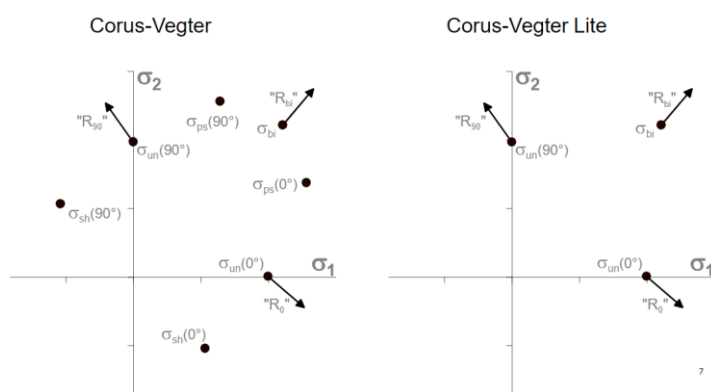
Obrázek 7: Porovnání materiálových modelů materiálů [16]

Obecně je Lite verzi Vegter modelu přisuzována větší přesnost, než při použití již zastaralého Hillova kritéria, je potřeba menší množství referenčních bodů než při použití Vegterova kritéria a jejich identifikace je lehčí. Na obrázku č. 8 níže je grafické porovnání přesnosti a získatelnosti parametrů pro tvorbu jednotlivých materiálových modelů. [17], [18]



Obrázek 8: Schéma náročnosti a přesnosti stanovení materiálových modelů [17]

Zásadním rozdílem oproti původnímu materiálovému modelu Vegter je výrazně nižší počet parametrů pro získání jeho popisu. Rozdíl vidíme na obrázku č. 9.

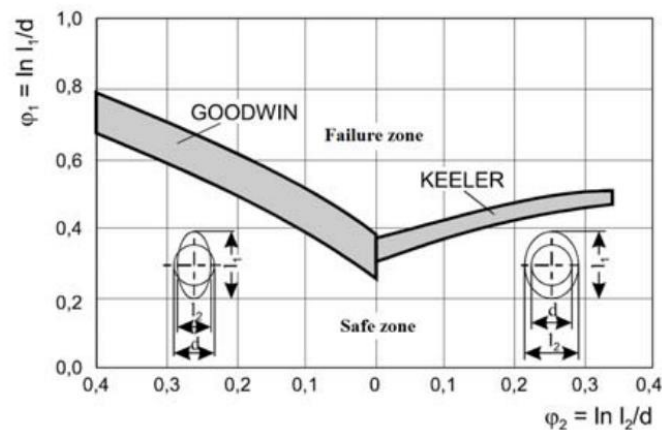


Obrázek 9: Porovnání modelů plasticity Vegter a Vegter-Lite [16]

Z obr. č. 9 je patrné, že náročnost získání parametrů je ve verzi Vegter-lite výrazně nižší vzhledem k nárokům na získání parametrů. I proto je vzhledem k téměř totožné přesnosti upřednostňovanou verzí.

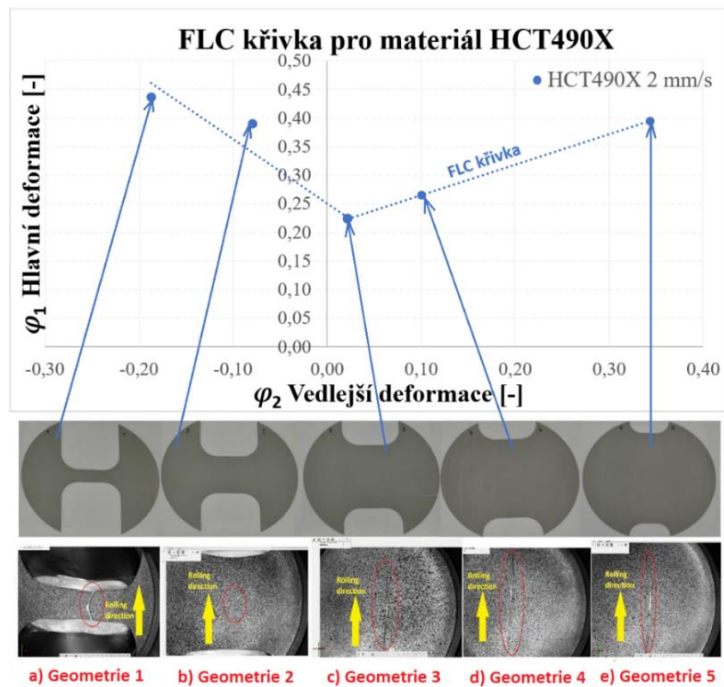
2. Křivky mezních přetvoření

Pro orientaci v technologických vlastnostech materiálu používáme diagram mezních deformací. K jeho zobrazení se využívá Keeler-Goodwinův diagram, viz obr. 10. Ten je tvořen osami s popisem hlavní a vedlejší deformace, v diagramu je vyznačena oblast limitních deformací. Křivka se stanovuje experimentálně pomocí zkoušky dle Nakajimy nebo Marciniaka. V obou případech je k jejímu vytvoření třeba alespoň 5 vzorků, které disponují různou geometrií, čímž je dosaženo rozdílných poměrů hlavních a vedlejších deformací. Diagram popisuje hranici bezpečných a nebezpečných deformací materiálu, kde vzniká riziko porušení materiálu. V části pod křivkou se nachází oblast bezpečné deformace, nad křivkou dojde během tváření k destrukci materiálu. Následným provedením zkoušky a zaznamenáním hodnot před deformací získáme limitní mechanické vlastnosti materiálu pro konkrétní typ poměru deformací. Při proložení jednotlivých bodů dojde k vytvoření křivky. Kvůli anizotropním vlastnostem materiálu je potřeba se v diagramu pohybovat pod křivkou s příslušnou rezervou. [3], [7]



Obrázek 10: Keeler-Goodwinův diagram [3]

Vzhledem k povaze zkoušky má šířka dříku zásadní vliv na poměr hlavních a vedlejších deformací. Z toho důvodu je důležité věnovat zvýšenou pozornost návrhu šířky dříku, viz obr. č. 11, a jednotlivým poměrům mezi nimi.



Obrázek 11: Vliv šířky dráhu na polohu křivky mezních deformací

Jak již bylo zmíněno, na polohu křivky má vliv součinitel plastické anizotropie i deformační exponent zpevnění. Polohu křivky ovlivňuje i rychlost, s jakou vzorek zatěžujeme.

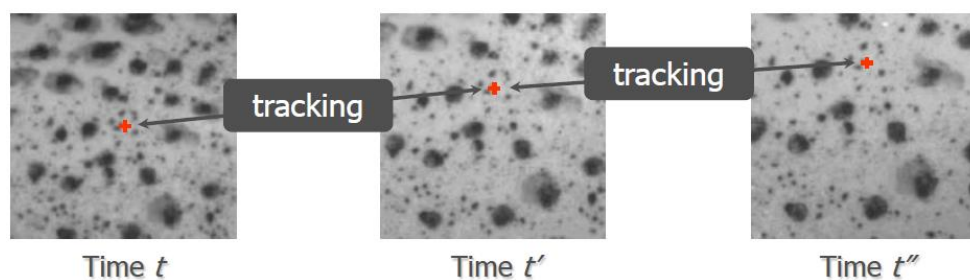
1.5 Digitální korelace obrazu

Pro zaznamenávání dat bude využit systém fungující na principu digitální korelace obrazu (DIC). Ta funguje na principu vytváření souboru snímků, které zaznamenávají měřený povrch. Ten je opatřen snímacím nátěrovým systémem, který vytváří vhodné podmínky pro sledování jednotlivých bodů. V softwaru je následně vytvořen záznam posunu všech změřených bodů a je možné vyhodnotit plastické chování materiálu při deformaci. DIC lze realizovat ve 2D nebo ve 3D podle potřeby měření. [19]

1.5.1 2D DIC

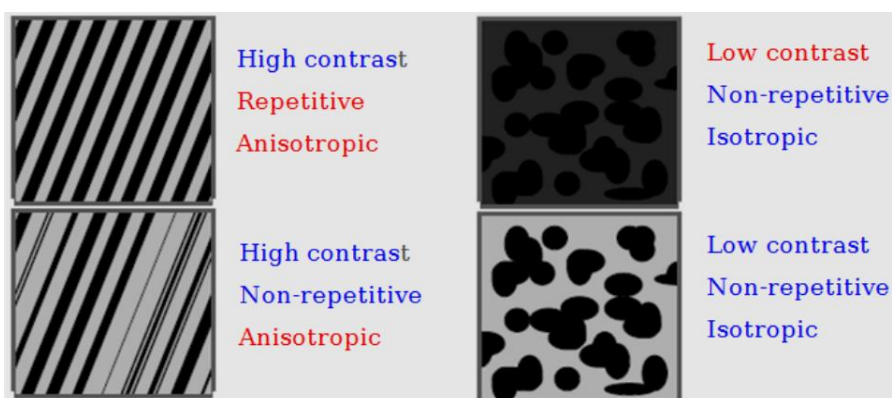
Pro DIC je potřeba zachovat pohyb v ose kamery nulový. Vzorek se nesmí přibližovat ani oddalovat, aby byla zachována kontinuita velikosti snímaných bodů. Důvodem je vztah mezi potenciální izotropní deformací, která za určitých podmínek může nabývat rozměrů stejných jako při přiblížení ke kameře. [19] [20]

Povrch vzorku je pokryt náhodným vzorem, který je snímán. Jednotlivé body jsou zaznamenávány a je sledován jejich pohyb při deformaci, jak vidíme na obr. č. 12.



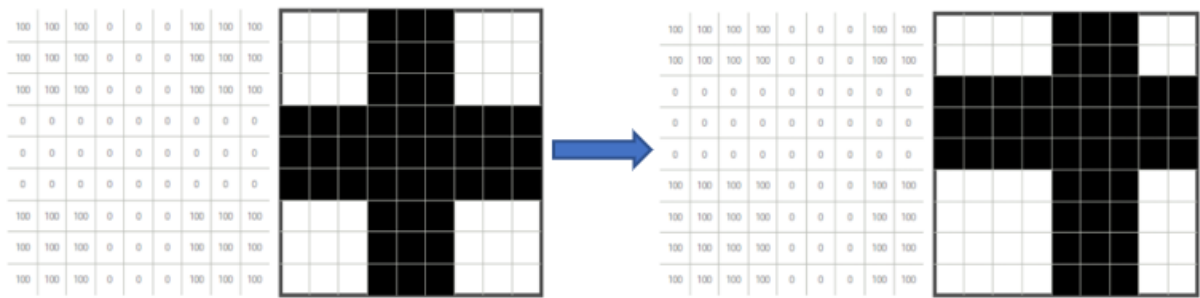
Obrázek 12: Sledování pohybu bodu při deformaci [21]

Ve skutečnosti nedochází ke sledování jednoho bodu, ale množství bodů v určitém okolí. Tím je zamezeno záměně jednotlivých sledovaných objektů. Takovýto útvar nazýváme subset. Velikostí subsetů a jejich překryvem ovlivňujeme přesnost měření. Zvolením správného nastavení subsetů dojde k vytvoření správného množství unikátních subsetů. Unikátnost okolí subsetu je dána kvalitou povrchu, který snímáme. Aby bylo snímání úspěšné, je potřeba, aby byl povrch nerepetitivní, kontrastní a isotropický. V našem případě toho docílíme vytvořením náhodného vzoru sprejem, existují však i jiné metody. Srovnání typů povrchu viz. obr. 13. [20], [21]



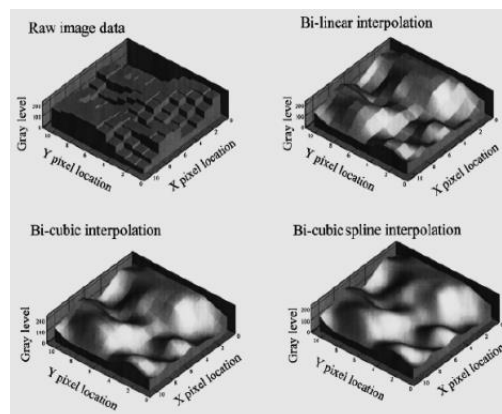
Obrázek 13: Typy snímaného povrchu [21]

Při vytvoření jednotlivých subsetů je jednotlivým pixelům přiřazena číselná hodnota na stupnici šedi. Následně jsou při porovnání jednotlivých snímků vyhledávány jednotlivé subsety a je vypočítán jejich relativní pohyb, viz obr. č. 14. Při standardním postupu jsou zaznamenány všechny možné lokace subsetu a na základě dat vypočítána korelační funkce pro získání optima. Standardně je využíváno metody nejmenších čtverců (SSD), která nám při nejmenším rozdílu vyjádří největší podobnost. V ideálním případě je hodnota $SSD = 0$. [21]



Obrázek 14: Číselné vyjádření změny polohy bodu [22]

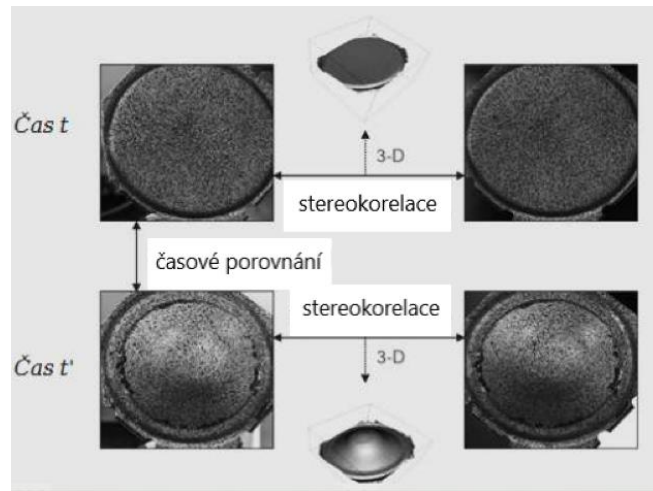
V praxi však dochází k mnoha situacím, které ovlivňují změny v naneseném vzoru a zkreslují tak měření. Jedná se o změny světelných podmínek vlivem deformace povrchu, změna snímaného vzoru vlivem deformace materiálu. Přiřazování číselné hodnoty v závislosti na stupni šedi je tedy proměnlivé a hodnota metody nejmenších čtverců nikdy nedosahuje hodnoty 0. Pro zvýšení robustnosti metody je třeba rekonstruovat spojitost jednotlivých hodnot subsetu pomocí interpolace standardně využívaní b-spline metodu. Vidíme na obr. č. 15. [22]



Obrázek 15: Možnosti interpolace získaných dat [22]

1.5.2 3D DIC

Pro pozorování změn deformace v prostoru je využíváno 3D korelace obrazu. Dvě CCD kamery v definované vzdálenosti od sebe pozorují snímaný vzorek. V čase dochází ke změně deformace, která je zaznamenána a následně porovnána. Dochází ke dvěma korelacím – 1. stereokorelační porovnání, 2. časové porovnání. Schéma je zobrazeno na obr. č. 16.[23]

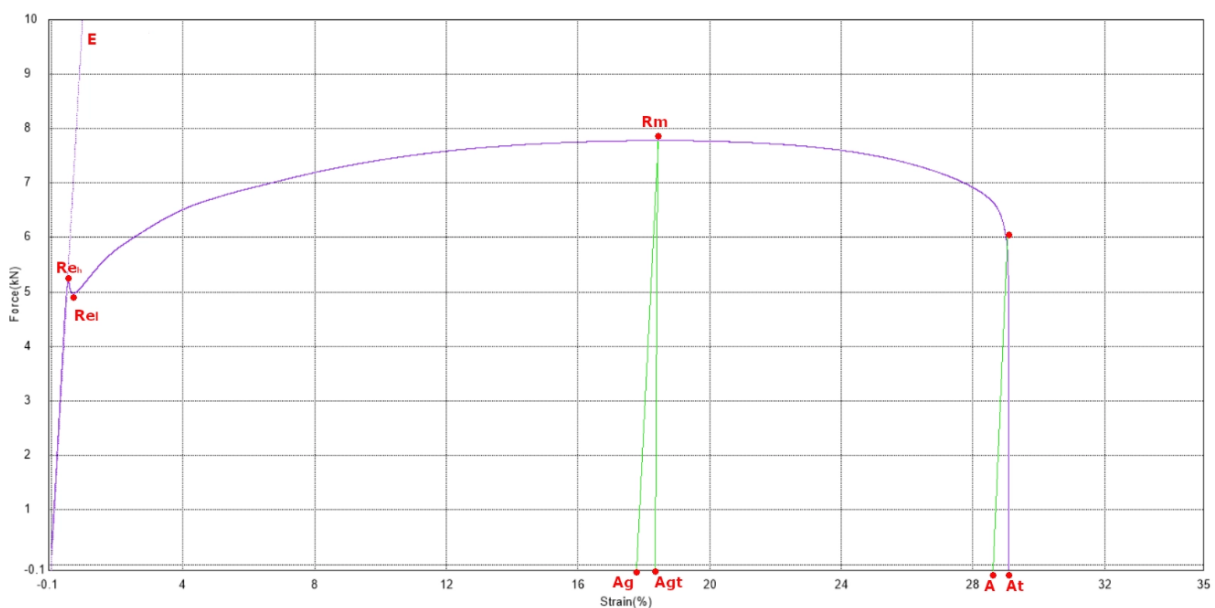


Obrázek 16: Schéma korelačních procesů při 3D DIC [23]

K získání struktury dochází vytvořením dvou snímků v čase – stereotriangulace. Předpokladem pro správné fungování je kalibrace systému a jeho neměnnost v průběhu měření. Tato metoda poskytuje cenné informace během pozorování zkoušky, avšak vůči povaze nátěru nelze uplatnit během měření v lisovacích formách. [23]

1.6 Zkouška tahem

Jedna ze základních zkoušek tvářitelnosti je zkouška tahem dle ČSN EN ISO 6892-1. Zkouška uvažuje homogenní průřez materiálu a konstantní rychlost zatěžování. Při zkoušce dochází k prodlužování materiálu, přechod z elastické do plastické deformace a následné porušení materiálu. Graf zkoušky tahem si můžeme prohlédnout na následujícím obrázku č. 17. [3], [24]



Obrázek 17: Modelový diagram zkoušky tahem [24]

Ze zkoušky tahem jsme schopni zjistit množství informací ohledně mechanických vlastností materiálu. Výsledkem zkoušky je graf a soubor výsledků s jednotlivými hodnotami.

R_{eH} - Mez kluzu - Horní mez elastické deformace, kdy nastává nevratná deformace. Jedná se o hodnotu, do které se materiál chová elasticky.

R_{eL} – Dolní mez kluzu – Nejnižší naměřené napětí v Ludersově oblasti, kde dochází ke smrštění materiálu a ke kmitání síly.

E – modul pružnosti – Jedná se o vypočítanou, nikoliv měřenou, hodnotu a poukazuje na směrnici přímky popisující elastické zatěžování materiálu. Její hodnota je závislá na poměrné deformaci a napětí.

$R_{p0.2}$ – smluvní mez kluzu - V případě materiálu bez významné meze kluzu se hodnota meze kluzu na smluvním grafu určuje podle napětí při prodloužení 0,2 %.

R_m – mez pevnosti – Při překročení Ludersovy oblasti dochází ke zpevnování materiálu a tedy i zvětšování napětí. S větším přetvořením materiálu dochází ke zvětšování odporu vůči tváření, až v určitý moment nastane maximální zpevnění materiálu a vyčerpání tažnosti materiálu. V tento moment nastává mez pevnosti, prodloužování nadále pokračuje, ale napětí klesá. Dochází k vytvoření krčku a poklesu napětí až do přetržení vzorku. Jedná se o hranici mezi homogenní a nehomogenní deformací.

A_g – homogenní tažnost – Jedná se o poměr prodloužení vůči původní délce při dosažení meze pevnosti. Je důležité brát v potaz, že tato hodnota neobsahuje složku elastické deformace a nenachází se v grafu přímo pod mezí pevnosti. Tam najdeme hodnotu A_{gt} , tedy prodloužení na mezi pevnosti s elastickou složkou.

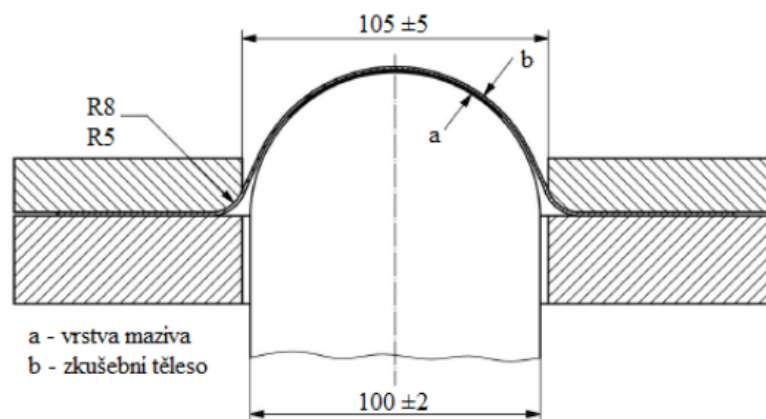
A – prodloužení při lomu – Obdobně jako prodloužení na mezi pevnosti se jedná o podíl mezi současnou a původní délkou vzorku bez elastické složky, hodnotu s elastickou složkou nazýváme A_t .

V případě tváření jsou pro nás důležité hodnoty ovlivňující tvářecí proces a jejich vzájemný vztah. Pro hluboké tažení je pro nás výhodná kombinace nízké meze kluzu a vysoké meze pevnosti. Dochází tak k vytvoření poměrně širokého pásma zásoby plasticity, které nám dává prostor pro tváření a zpevnování materiálu. Vysoká mez kluzu zajišťuje materiálu odolnost proti deformaci při vyšších napětích, což znamená větší odpor materiálu vůči tváření. Naopak nízká mez pevnosti zamezuje dostatečné protváření materiálu do požadovaného tvaru.

Dále je důležitým faktorem tažnost materiálu A_g , která určuje, jak moc se daný materiál prodlužuje, a tedy i jeho vhodnost pro hluboké tažení. [25], [26], [27]

1.7 Zkouška dle Nakajimy

Pro vytvoření diagramu FLD se musí provést zkouška dle Nakajimy dle ČSN EN ISO 12004-2. Ta se provádí vtláčováním polokulatého tažníku průměru 100 mm skrze dřík vzorku, který má různé rozměry (šířku dříku) v závislosti na požadovaném poměru hlavní a vedlejší deformace. Tím pak získáme body, jimiž následně proložíme křivku mezních deformací. Schéma zkoušky vidíme na obrázku č. 18 níže. [28], [29]



Obrázek 18: Schéma zkoušky dle Nakajimy [28]

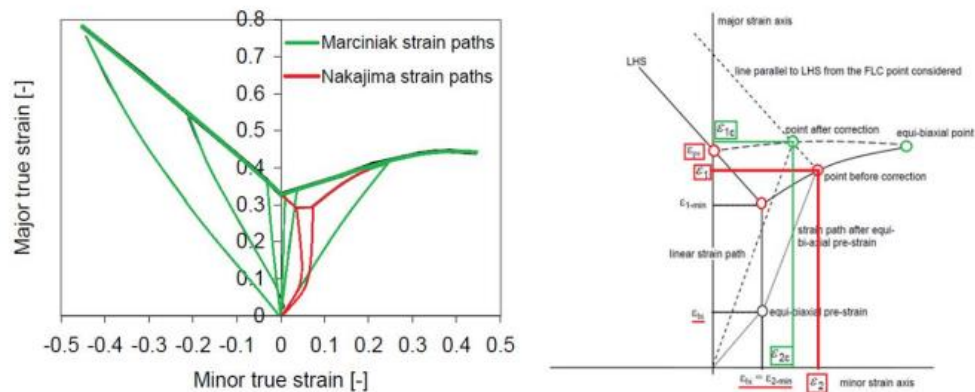
Tato křivka rozděluje oblast bezpečné deformace pod křivkou a oblast porušení materiálu nad křivkou. Při tažení materiálu dojde v oblasti deformace k vyčerpání zásoby plasticity a k porušení vzorku. Poslední zaznamenané napětí se stává referenčním bodem v grafu. [30]

Konkrétní rozměry jednotlivých geometrií jsou popsány v kapitole „Příprava vzorků pro FLD“. Vzhledem k rozdílné deformační cestě vůči zkoušce dle Marciniaka, kdy deformační cesta dle Nakajimy je posunuta směrem dolů a doprava, je oblast bezpečné deformace zmenšena, a tak je zapotřebí zajistit korekci. Korekcí dojde k posunutí nejnižšího bodu na hlavní osu a přepočítání bodu napravo takovým způsobem, aby deformační cesta byla stejně dlouhá. Přepočítání korekce se dělá podle následujícího vzorce:

$$\beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{2-min}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{2-min}}; \theta = \frac{\varepsilon_{2-min}}{\varepsilon_{1-min} - \varepsilon_{ps}}$$

$$\varepsilon_{1c} = \frac{\varepsilon_2 - \theta \varepsilon_1}{\beta - \theta}; \varepsilon_{2c} = \beta \varepsilon_{1c}$$

Grafické znázornění korekce a porovnání délky deformačních cest si můžeme prohlédnout na následujícím snímku. [31], [32]



Obrázek 19: Porovnání deformační cesty při zkoušce dle Marciniaka a dle Nakajimy, (vlevo) s detailem vpravo [18]

Při měření je třeba zachovat tribologický systém po celou dobu měření pro dosažení soustavných výsledků. Pro tribologický systém se využívá soubor maziv tvořící plastické mazivo, PTFE pásy, mazací olej a PE pásy. Tribologický systém je na tažník aplikován z důvodu dodržení normy, kdy při jeho absenci dochází ke vzniku trhliny mimo pásmo 15 % šířky trhliny. [33]

2 Návrh experimentu

Pro vytvoření materiálové karty v programu Autoform je třeba naměřit a vyhodnotit křivky zpevnění, materiálové modely plasticity a křivky mezních deformací pro materiál CR5. V teoretické části práce byly představeny nezbytné předpoklady a znalosti potřebné pro navržení a provedení experimentu. V následující části bude představen popis jednotlivých částí experimentu s vysvětlením ohledně volby a použití jednotlivých metod.

Pro získání křivek zpevnění a materiálových modelů plasticity bude naměřeno odpovídající množství zkoušek tahem. Parametry pro tvorbu materiálových dat budou různé šarže materiálu, orientace válcování, polohy na svitku a rychlost pohybu čelistí. Těmito zvolenými parametry tak budeme simulovat reálné podmínky lisovacích procesů, kdy nedochází k deformacím pouze ve vyhovujících případech. Vytvořením souboru křivek zpevnění a následným porovnáním jejich polohy bude možné vyvodit vliv jednotlivých parametrů. Dále bude pomocí meze kluzu a součinitele plastické anizotropie určen model plasticity Vegter 2017 a jeho následné porovnání s ostatními šaržemi.

Záznam dat bude obstarávat optický měřicí systém ARAMIS, který data získává prostřednictvím systému trhacího stroje LabTest Model 5.100SP1. Skrze systém ARAMIS je možné získat popis deformace v průběhu času a disponovat zpětně celkovým průběhem deformačního procesu. Na základě toho dokážeme určit moment porušení materiálu.

Pro vytvoření požadovaného souboru FLC křivek bude navrženo pět geometrií, což je dle požadavků normy ČSN EN ISO 12004-2 minimum pro vytvoření FLC křivky. Jednotlivé geometrie se liší šířkou dřívku, což mění poměr hlavních a vedlejších deformací. Dále bude provedeno měření při různých rychlostech pohybu příčnicku, čímž se budeme snažit přiblížit reálným aplikacím při vyšších taktách lisovacích linek. Pro naše potřeby jsme zvolili 2 rychlosti, a to 2 mm/s a 17 mm/s. Dalším parametrem tohoto experimentu je poloha vzorku na svitku. Pro potřeby analýzy tohoto parametru byly vzorky odebrány ze začátku, středu a konce svitku.

Pro docílení stabilních výsledků a věrohodnosti měření bude každé měření opakováno alespoň třikrát, což v praxi znamená provedení a vyhodnocení minimálně 90 měření pro jednu šarži FLC křivek. Součástí experimentu je 5 šarží materiálu od různých výrobců.

Výstupem měření bude soubor navazujících dat tvořící jednotlivé křivky zpevnění, materiálové modely plasticity a FLC křivky materiálu CR5. Předpokladem experimentu je změna polohy křivek v závislosti na rychlosti pohybu příčnicku, polohy ve svitku a na typu

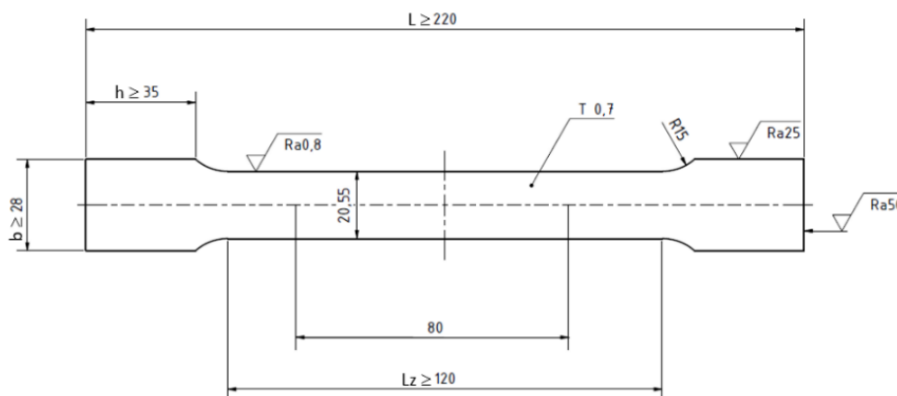
dodavatele. Pro získání dat bude použit univerzální stroj pro vyhodnocení tvářítnosti Zwick/Roell BUP600.

Po získání všech potřebných dat bude vytvořena tabulka hodnot rozdělená podle příslušných šarží, polohy ve svitku a rychlostí příčnicku. Budou vytvořeny jednotlivé FLC křivky a dojde k vyhodnocení a závěrečnému zhodnocení vlivu jednotlivých parametrů.

Zkoumaných bude 5 šarží materiálu od různých výrobců označených A až E.

2.1 Příprava vzorků pro zkoušku tahem

Pro získání jednotlivých mechanických hodnot je třeba provést zkoušku tahem a z ní vyhodnotit data pro stanovení křivek zpevnění a modelu plasticity. V následujícím textu si představíme podrobný popis získávání a přípravy vzorků. Nejdříve dojde k odebrání části přístříhu pásu plechu v různých pozicích na svitku, tedy na začátku, ve středu a na konci svitku. Rozměry vzorku si můžeme prohlédnout na obrázku č. 20.



Obrázek 20: Rozměry měřeného vzorku

Důvodem je porovnání rozptylu mechanických vlastností v délce svitku. Z odebraných přístříhů jsou následně odebrány vzorky pro zkoušku tahem pod vybranými úhly vzhledem ke směru válcování. Při porovnání jednotlivých vzorků vůči sobě můžeme později porovnat nestejnou mechanických vlastností v závislosti na orientaci vůči válcování. Následně budou vzorky rozřazeny do jednotlivých šarží a parametrizovány tak, aby v každém měření byl dostatečný počet vzorků pro vyhodnocení jednotlivých parametrů.

2.1.1 Odmaštění vzorků

Měřené vzorky budou snímány optickým měřicím systémem, který bude pozorovat povrch vzorku, na kterém bude nanesen nátěrový systém umožňující snímání. Pro dosažení jeho

dostatečné soudržnosti a přilnavosti k povrchu vzorku je zapotřebí vzorek důkladně odmastit. Proces odmaštění bude následovat podle postupu níže:

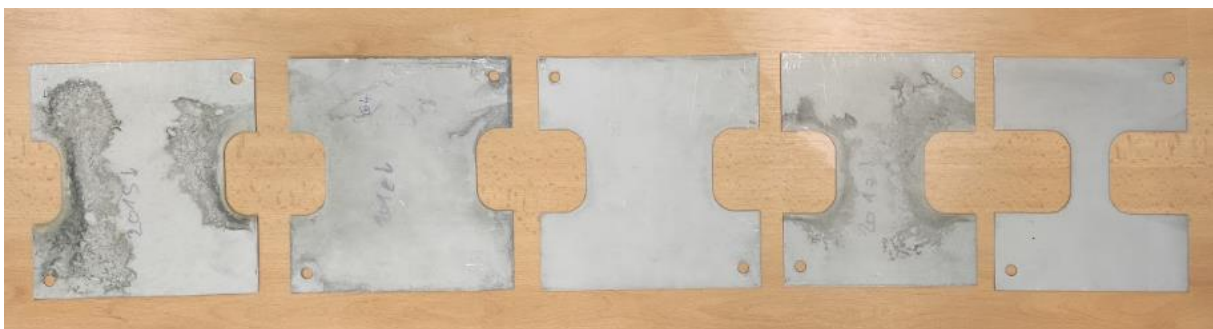
- Oplach v horké vodě s Jarem
- Vysušení
- Aplikace odmašťovače Eternal
- Oplach horkou vodou a vysušení
- Aplikace Izopropylalkoholu

2.1.2 Aplikace nátěrového systému

Pro vytvoření náhodného rastru na povrchu vzorku bude použito dvou sprejů, jednoho s podkladovou barvou a druhého s kladívkovou barvou vytvářející náhodný rozptyl, což je námi požadovaný stav pro umožnění snímání povrchu.

2.2 Příprava vzorků pro FLD

Pro získání jednotlivých bodů FLC křivky je potřeba získat rozdílné poměry hlavních a vedlejších deformací. Toho docílíme pomocí různé šířky dříku ve zkušebním vzorku. Čím více rozdílných geometrií, tj. čím více bodů FLC křivky, vytvoříme, tím plynulejší průběh bude křivka mít. Norma ČSN EN ISO 12004-2 předepisuje použití minimálně 5 geometrií, což bylo vyhodnoceno jako dostatečný počet pro získání a ověření výsledků. Jednotlivé geometrie mají zvolenou šířku dříku 20, 65, 105, 120 a 140 mm. Jejich vzhled si můžeme prohlédnout na obrázku č. 21. Plechy byly rozděleny podle polohy ve svitku, což je první parametr, který bylo potřeba brát v potaz. Z poskytnutých plechů byly na pákových nůžkách vystřiženy jednotlivé čtvercové přístřihy. Pro eliminaci zpevnění na okrajích po stříhání byly jednotlivé geometrie vyříznuty na elektrojiskrovém obráběcím zařízení.



Obrázek 21: Různé geometrie pro zkoušku dle Nakajimy

2.2.1 Odmaštění vzorků

Vzhledem k nutnosti aplikace nástřikového systému je potřeba docílit kvalitně odmaštěného povrchu. Takový povrch není náchylný k defektům při deformaci a absence

nečistot zajišťuje kvalitní přilnutí nástřikového systému i při hlubokém tažení vzorků. Pro získání odmaštěného povrchu byl použit následující postup:

- Oplach v horké vodě s Jarem
- Vysušení
- Aplikace odmašťovače Eternal
- Oplach horkou vodou a vysušení
- Aplikace Izopropylalkoholu

Zmíněný postup se ukázal jako dostatečný postup pro získání takového povrchu, který umožňuje kvalitní spojení povrchu a barvy, která vytváří snímací systém. Zvláště důkladnému čištění byla věnována pozornost zejména na plochách později opatřených barvou.

2.2.2 Aplikace nátěrového systému

Aby optický měřicí systém ARAMIS mohl správně sbírat informace o prostorovém stavu nátěrového systému, je třeba vytvořit dostatečně kontrastní vzor, který bude obsahovat dostatečné množství bodů o správné velikosti. Použité spreje jsou na obr. 22.

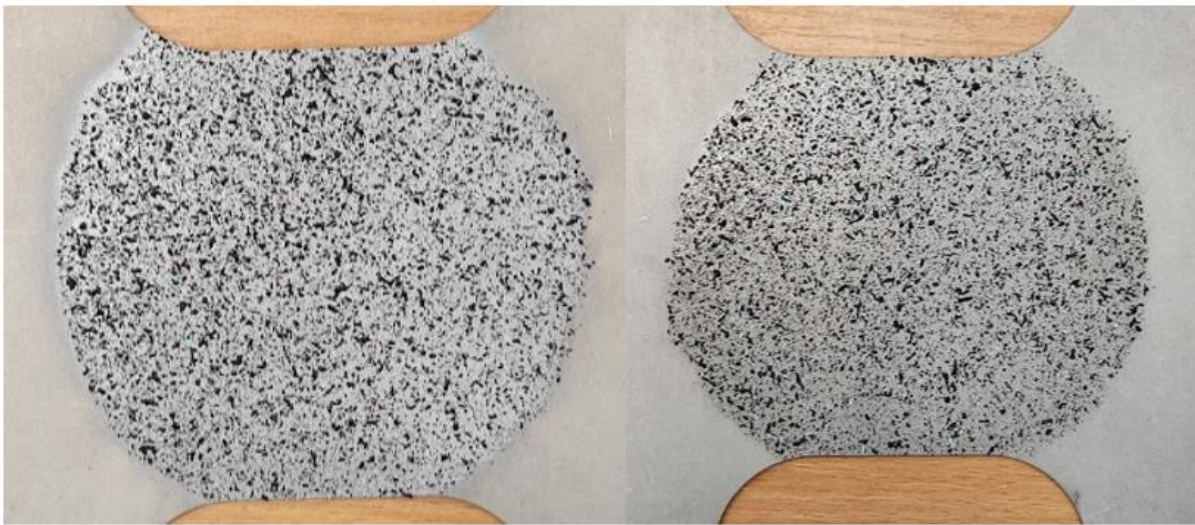


Obrázek 22: Použité spreje tvořící snímací nátěr

Při přípravě experimentu bylo hledáno nejvhodnější řešení, které nakonec sestává z podkladového základového nástřiku z polyuretanové barvy a následné aplikace speciální dvousložkové barvy vytvářející granitový efekt. Kombinaci nástřiků vidíme na obrázku č. 23.

Předchozí kombinace barev různých autolaků vykazovali nedostatečnou soudržnost a nevytvářeli konzistentní nebo dostatečně kontrastní povrch. Námí zvolený nátěrový systém je aplikován pomocí následujícího postupu:

- Odmaštění izopropylalkoholem
- Aplikace základové barvy
- Vysušení do zaschnutí vrchních vrstvy barvy
- Aplikace granitové barvy
- Vysušení do zaschnutí bílé složky



Obrázek 23: Porovnání nátěru se základovou barvou (vlevo) a bez základové barvy (vpravo)

Následující postup se ukázal jako nejvíce odolný při vysokých rychlostech tažení, kdy bylo zapotřebí disponovat nevytvrzeným nátěrovým systémem. V našem případě to znamenalo komplikaci v podobě nemožnosti předpřípravy nátěru a každý vzorek byl opatřen nátěrem těsně před měřením.

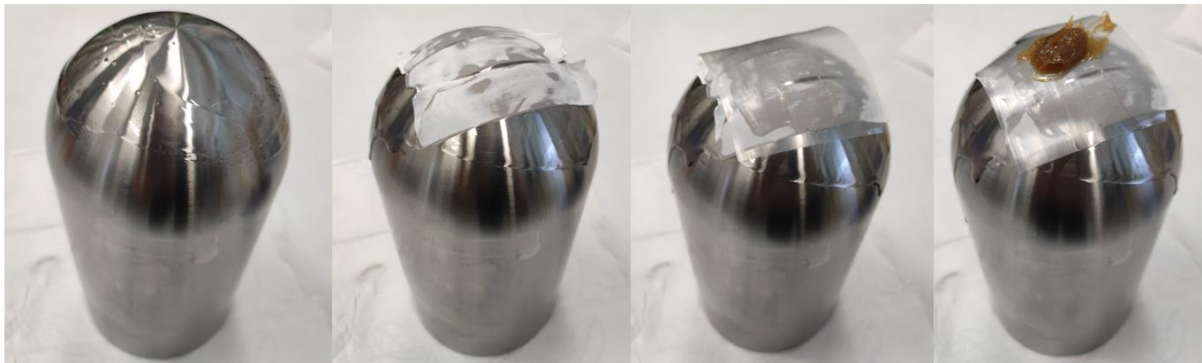
2.2.3 Tribologický systém

Pro eliminaci zavádějících výsledků je potřeba měřicí zařízení opatřit takovým tribologickým systémem, který minimalizuje vliv měřicího zařízení na výsledky zkoušky. Pro dosažení platného výsledku zkoušky je potřeba, aby k porušení došlo v pásmu širokém 15 % průměru tažníku od vrcholu vzorku, jinak je zkouška neplatná. Vliv na vytvoření trhliny tak hraje jak přidržovač, tak i samotný tažník. V případě přidržovače je potřeba vytvořit takový tlak, který zamezí prokluzování vzorku a zároveň nedojde k dostatečné deformaci vzorku. Při zkoušce dochází k tažení materiálu a kontaktu materiálu s hranou přidržovače. Ta je

zakulacena, aby nedošlo ke koncentraci napětí a vzniku trhliny v nevhodném místě, je ale třeba ji udržovat čistou a opatřenou mazivem.

Pro samotný tažník byl pro zamezení tvorby trhliny v nevhodném místě vytvořen systém mazacích a kluzných vrstev (tribologický systém), díky kterým byl zajištěn správný průběh tvářecího procesu a dosažení platného výsledku zkoušky. Tribologický systém aplikovaný při každém měření sestával z následujících částí:

- Strojní olej
- PTFE páska
- polyethylenová fólie
- Plastické mazivo



Obrázek 24: Postup aplikace jednotlivých částí tribologického systému

Takovýto systém po dokončení zkoušky vykazoval uspokojivé výsledky v podobě správné tvorby trhliny. Aplikace vrstev byla rovnoměrná, aby nedocházelo ke kontaktu vzorku a tažníku. Vliv tribologického systému na výsledky zkoušky jsou v experimentu zanedbány, neboť by bylo potřeba širšího rozhraní experimentu. Jednotlivé vrstvy tribo. systému zobrazeny na obr. č. 24.

2.2.4 Zkušební zařízení

Zařízení použité pro provedení zkoušky dle Nakajimy je již zmíněný univerzální stroj BUP600. Stroj disponuje řadou tažníků různých tvarů pro realizaci technologických zkoušek, jako je např. zkouška roztažením otvoru. Pro naše použití byl osazen půlkulatým tažníkem s průměrem 100 mm.



Obrázek 25: Zkušební zařízení BUP 600 vybavený systémem ARAMIS

Pomocí ovládacího rozhraní je možné nastavit rychlost pohybu tažníku a pokles síly pro ukončení měření. Pro naše účely jsme používali rychlosti 2 a 17 mm/s, pokles síly byl nastaven na 80 %. Vlastnosti stroje jsou popsány v tabulce 1.

Tabulka 1: Vlastnosti zkušebního zařízení BUP600 [34]

Jmenovité zatížení [kN]	600
Maximální zkušební rychlost [mm/s]	17
Přesnost polohy tažníku [mm]	0,1
Přesnost odečtu hodnoty [kN]	0,1
Přesnost rychlosti [mm/s]	0,1

2.2.5 Měřicí zařízení

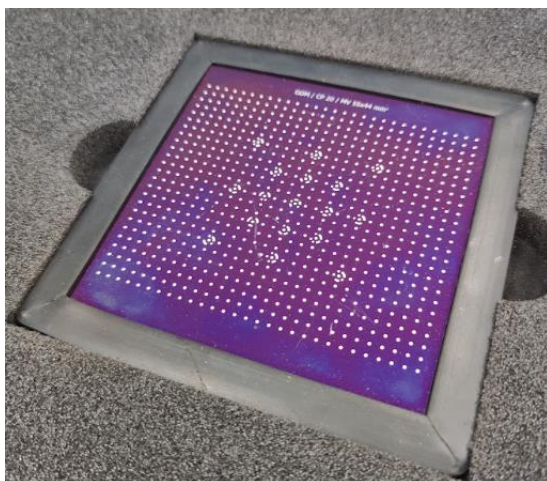
Pro snímání vzorku během zkoušky byl použit optický měřicí systém ARAMIS, viz obr. 26. Měřicí systém je vybaven dvěma CCD kamerami umístěnými v příslušném odstupu pod takovým úhlem, který vytváří ohnisko na povrchu vzorku při jeho uložení do zkušebního stroje. Měřicí systém je umístěn na rameni nad vzorkem v příslušné vzdálenosti. Klíčovým faktorem je také osvětlení vzorku, které, obzvláště při vyšších rychlostech zatěžování, hraje zásadní roli pro možnost vyhodnocení. Dva osvětlovací prvky osazené polarizačním filtrem nám umožňují vytvořit rovnoměrné světelné podmínky po celé ploše měřeného vzorku. Při vyšších rychlostech bylo zapotřebí dosvětlení vzorku pomocí přídavného reflektoru. [19]



Obrázek 26: Optický snímací systém ARAMIS

2.2.6 Kalibrace

Pro dosažení konzistentních výsledků je potřeba měřicí systém kalibrovat, jelikož časem může dojít k rozostření světla, kamery, či vlivem nevhodné manipulace se zkušebním či měřicím zařízením k desynchronizaci.



Obrázek 27: Kalibrační destička

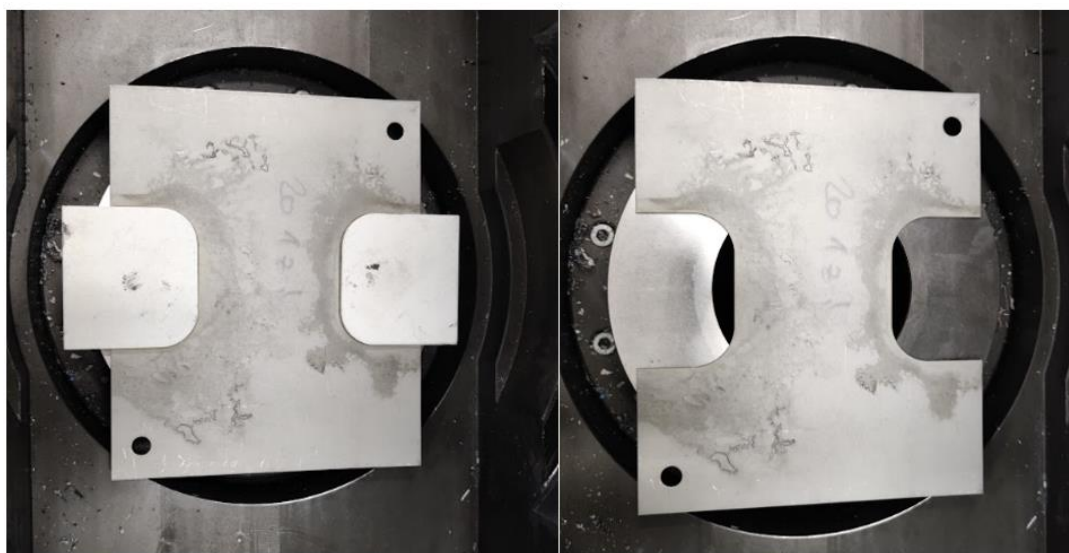
Kalibrace se provádí dle manuálu výrobce. V našem případě se jedná o nastavení správné vzdálenosti od vzorku, zarovnání ohniska kamer na střed vzorku, upravení světelných podmínek. Následně pomocí kalibrační destičky (viz. obr. 27) dochází ke snímání v různých

polohách otočení a náklonu. Každý krok systém sám vyhodnocuje a tak je kalibrace nezávislá na lidské chybě. Ve výsledném kalibračním protokolu, viz. příloha 1, je třeba se držet pod hodnotami maximálních odchylek. [35]

Z důvodu velkého množství dat, přehlednosti a důvěrných informací jsou naměřená data k dispozici na zahaslovaném CD ve vazbě diplomové práce. V případě potřeby je možné CD opatřit na Ústavu 12133 ČVUT Praha.

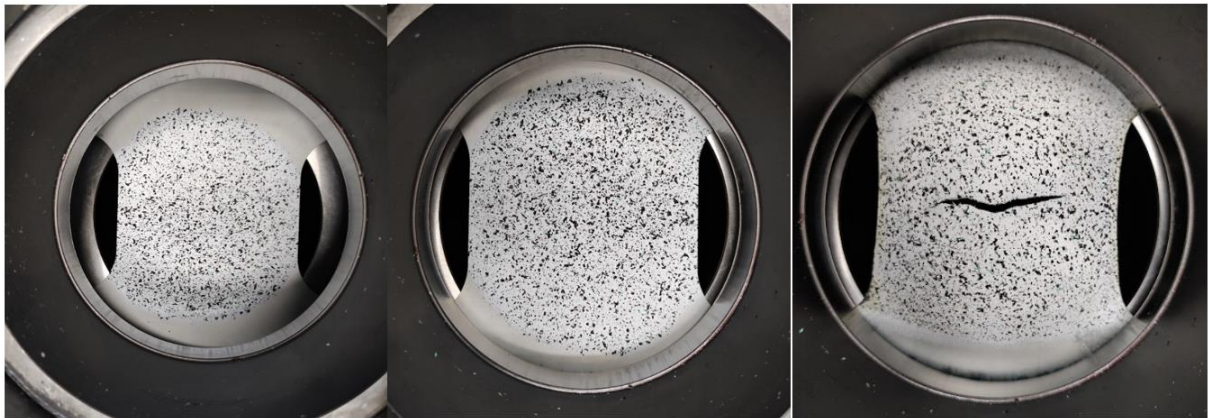
3 Průběh měření

Měření probíhalo následovně. Nejdříve byla zvolená geometrie řádně odmaštěna, načež byl na snímaný prostor nanesen nástřikový systém. Po zaschnutí systému v délce cca. 2 minut byl vzorek umístěn do zkušebního stroje na tažnici. Aby bylo dosaženo vycentrování vzorku, bylo použito 3D tisknutých přípravků, které byly vloženy vedle dřívku a které přesně kopírovali vnější tvar tažnice, tudíž se střed vzorku nacházel nad středem tažníku, jak vidíme na obr. 28.



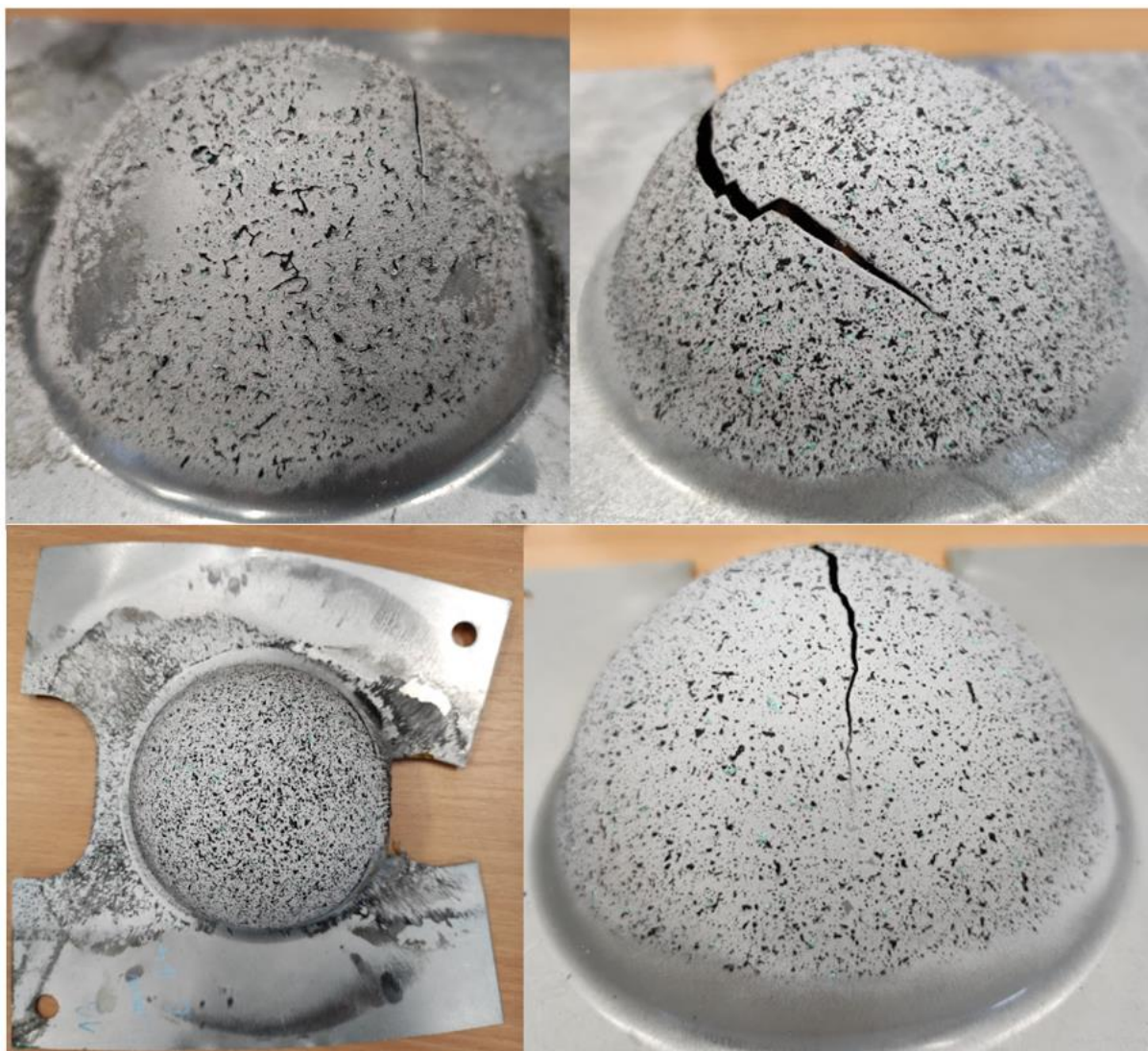
Obrázek 28: Příprava vzorku pro měření pomocí 3D tisknutého přípravku

Následně byl vzorek k tažnici přitlačen přidržovačem a měření bylo připravené k provedení. Následovala kontrola osvětlovacích prvků, správné nastavení přitlačné síly, rychlosti pohybu tažníku. Na počítači, na kterém jsme v programu ARAMIS vzorek sledovali byla potvrzena viditelnost vzorku a došlo na samotné měření, tedy deformaci vzorku do porušení. Dle rychlosti pohybu tažníku byl nastaven počet snímků takovým způsobem, aby dostačoval zpětnému plynulému sledování a správnému vyhodnocení průběhu zkoušky. Následovalo porušení vzorku, což vedlo k ukončení zkoušky měřícím strojem a bylo zastaveno sledování systému ARAMIS. Následovalo vyndání vzorku a vizuální a digitální kontrola vzorku pro platnost měření. V dalším kroku došlo k očištění zkušecího stroje a příprava na vložení dalšího vzorku. Ve stejné době také probíhalo vyhodnocení zkoušky na počítači, kde pomocí zvolených kritérií byly vytvořeny protokoly měření pro každý zkušební vzorek. Ty zahrnovaly hlavní a vedlejší deformaci v FLD diagramu, jedno měření tedy vytvořilo právě jeden bod na tomto diagramu.



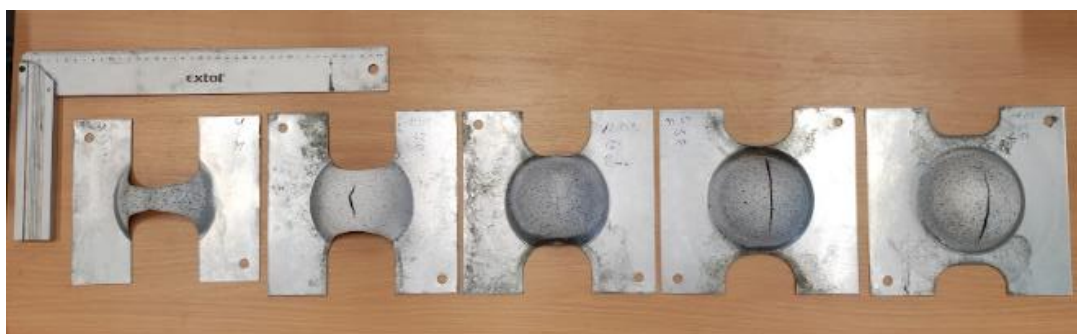
Obrázek 29: Postup měření vzorku. Zleva: vložení do stroje, dosednutí přídržovače, po provedení zkoušky

Pro správnost měření bylo třeba monitorovat a dodržovat podmínky měření. V našem případě bylo zapotřebí monitorovat stav nástřikového systému, počáteční místo šíření trhliny a správné upevnění vzorku mezi tažnicí a přídržovačem. V případě pozitivního výsledku vypadal průběh zkoušky viz obr. 29. I přes dodržování požadovaných parametrů zkoušky docházelo při měření jak k jednotlivým defektům, tak ke kombinaci stavů zneplatňujících zkoušku. Při měření při vysokých rychlostech docházelo k destrukci nátěrového systému, který v průběhu zkoušky přestával ulpívat na povrchu vzorku a docházelo tak k nečitelnosti povrchu kamerovým systémem. Dále docházelo k šíření trhliny mimo pásmo 15 mm od vrcholu vzorku, které dle normy zkoušku zneplatňuje. V ojedinělých případech při použití geometrie č.4 docházelo k prokluzování vzorku z přídržovače, čímž docházelo k nerovnoměrné deformaci a zkouška pozbyla platných kritérií. Tyto defekty si můžeme prohlédnout na následujícím obr. 30.



Obrázek 30: Možné výsledky zkoušky

V případě jednoho z výše zmíněných defektů bylo nutno zkoušku opakovat s identickým vzorkem do doby získání 3 platných měření pro každou geometrii. V případě splnění platnosti zkoušky byla vytvořena celá sada měření reprezentující jednu FLC křivku. Na obrázku č. 31 vidíme vzorky tvořící jednu křivku FLC.



Obrázek 31: Vzorky tvořící jednu křivku mezních deformací

3.1 Mechanické vlastnosti materiálu CR5

Materiál CR5 je hlubokotažná stabilizovaná ocel určená pro náročné aplikace výlisků. Označení CR souvisí s metodou výroby – Cold Rolled – tedy za studena válcovaná. Číselné označení za zkratkou CR označuje úroveň kvality a konzistentnosti. Na rozdíl od ocelí CR4 je ocel CR5 bez intersticiál, disponuje přísnějším intervalem chemického složení a lepší tvářitelností. Chemické složení materiálu vidíme v tabulce 2.

Tabulka 2: Chemické složení materiálu CR5 dle VW 50065: 2014-05

Označení	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]
CR5	≤ 0,02	≤ 0,50	≤ 0,30	≤ 0,020	≤ 0,020	≥ 0,010	≤ 0,30

Jedná se tedy o ocel s nízkým obsahem uhlíku a nízkými obsahy doprovodných prvků. Od ocelí stejného označení s nižším kvalitativním číslem se liší zejména nároky na nižší obsahy těchto prvků. V následující tabulce 3 jsou zapsány hodnoty mechanických vlastností.

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti CR5 dle VW 50065: 2014-05

Označení	Mez průtažnosti [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost			r		n _{10-20/Ag}
			A [%]	A ₅₀ [%]	A ₈₀ [%]	r _{90/20} [-]	r _{m/20} [-]	
CR5	110 - 170	260 - 330	-	≥42	≥41	≥2,1	≥1,8	≥0,22

Materiál CR5 dosahuje vhodných hodnot tažnosti pro hluboké tažení přesahující 40 %. Zjištění přesných hodnot křivek zpevnění a mezních deformací bude možné získat lepší přehled o možnostech materiálu a udržet krok s inovativním přístupem trhu na nároky materiálu.

3.2 Vyhodnocení experimentu zkoušky tahem

Naměřená data byla zaznamenána do softwaru MS Excel, kde bylo provedeno jejich vyhodnocení. Pro jednotlivé šarže jsme vytvořili tabulky a názorné grafy, ve kterých si můžeme prohlédnout vliv jednotlivých parametrů na mechanické vlastnosti materiálu. Šarže A bude modelovým příkladem vyhodnocení jednotlivých šarží, u dalších šarží se budeme věnovat hlavně vzájemnému porovnání a rozdílům, ke kterým v rámci nastavení parametrů dochází.

V následující tabulce č. 4,5 a 6 jsou zaznamenána naměřená data šarže A pro orientaci 0°. Tabulky jsou rozděleny podle orientace válcování a rychlosti zatěžování.

Tabulka 4: Naměřená data šarže A, orientace 0

Úhel válcování = 0°									
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A _g [%]	A [%]	A _{gt} [%]	n [-]	r [-]
2 [mm/min]/ 0,000238 [s ⁻¹]	1	203.239	131	276	33.98	57.93	34.11	0.241	1.946
	2	206.177	135	276	27.38	49.62	27.52	0.232	1.992
	3	219.580	140	277	36.36	61.86	36.48	0.238	2.019
	4	195.352	144	279	29.16	50.69	29.3	0.232	2.033
	Ø	206.087	137.500	277.000	31.720	55.025	31.853	0.236	1.998
	s	8.738	4.924	1.225	3.606	5.078	3.598	0.004	0.033
10 [mm/min]/ 0,0019 [s ⁻¹]	1	211.214	159	275	30.00	-	30.12	0.244	2.045
	2	205.858	135	266	26.08	-	26.19	0.235	2.029
	3	196.333	153	296	25.98	-	26.19	0.236	2.061
	4	197.676	159	283	26.73	-	26.87	0.237	2.042
	5	211.403	170	284	-	-	-	0.242	1.939
	6	214.996	174	282	-	-	-	0.233	1.984
	Ø	206.247	158.33	281.00	27.20	-	27.34	0.238	2.017
	s	7.068	12.618	9.129	1.643	-	1.627	0.004	0.042
50 [mm/min]/ 0,0059 [s ⁻¹]	1	216.662	185	293	22.47	43.31	22.60	0.228	2.033
	2	211.616	185	294	23.96	46.01	24.10	0.232	2.001
	3	195.749	184	292	17.44	55.75	17.59	0.240	2.032
	4	205.841	180	293	23.98	-	24.13	0.227	2.011
	5	216.621	187	302	25.60	-	25.73	-	-
	Ø	209.298	184.20	294.80	22.69	48.36	22.83	0.232	2.019
	s	7.858	2.315	3.655	2.806	5.343	2.801	0.005	0.014
100 [mm/min]/ 0,0119 [s ⁻¹]	1	199.530	188	294	22.18	52.00	22.32	-	-
	2	216.026	178	293	21.38	-	21.52	0.214	1.957
	3	198.903	195	292	23.10	-	23.24	0.219	2.063
	4	207.399	194	295	24.56	-	24.70	0.206	1.987
	5	203.473		293	21.48	42.28	21.65	0.224	2.010
	6	213.136	187	295	23.76	-	23.88	0.215	2.008
	Ø	206.411	188.40	293.67	22.74	47.14	22.89	0.216	2.005
	s	6.468	6.086	1.106	1.171	4.860	1.163	0.006	0.035
	1	207.983	196	301	21.08	25.20	21.23	0.237	1.940

200 [mm/min]/ 0,0238 [s ⁻¹]	2	206.033	204	302	20.32	-	20.47	0.225	1.948
	3	209.079	203	297	20.05	-	20.19	0.203	2.022
	4	197.730	203	299	23.27	-	23.43	0.226	2.062
	5	203.158	212	305	20.87	-	20.88	-	-
	Ø	204.797	203.60	300.80	21.12	25.20	21.24	0.223	1.993
	s	4.066	5.083	2.713	1.138	0.000	1.151	0.012	0.051
500 [mm/min]/ 0,0595 [s ⁻¹]	1	201.437	230	310	18.84	-	18.99	-	-
	2	218.502	225	304	21.66	-	21.80	-	-
	3	192.953	232	306	23.80	-	23.96	0.225	2.004
	4	190.117	206	300	21.71	-	21.87	-	-
	5	208.918	217	307	19.63	23.00	19.77	-	-
	6	210.446	218	315	22.45	-	22.73	-	-
	7	201.638	223	319	21.86	-	22.01	0.217	1.967
	8	212.073	221	321	25.28	-	25.56	0.220	1.966
	9	215.783	220	319	22.54	-	22.91	0.200	1.961
	Ø	205.763	221.33	311.22	21.97	23	22.18	0.216	1.975
	s	9.304	7.242	7.115	1.835	0	1.876	0.009	0.017
600 [mm/min]/ 0,0714 [s ⁻¹]	1	213.234	229	311	17.04	-	17.18	0.230	1.983
	2	205.609	238	307	18.37	-	18.51	0.227	1.998
	3	200.933	191	279	18.92	19.66	19.15	0.220	2.006
	4	193.222	204	286	20.66	-	20.81	0.243	2.001
	5	193.958	211	292	21.06	-	21.21	0.243	2.011
	6	203.467	227	299	19.10	-	19.24	0.243	2.010
	Ø	201.737	216.67	295.67	19.19	19,66	19.35	0.234	2.002
	s	6.878	16.152	11.250	1.356	0	1.358	0.009	0.009

Tabulka 5: Naměřená data šarže A, orientace 45

Úhel válcování = 45°									
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A _g [%]	A [%]	A _{gt} [%]	n [-]	r [-]
2 [mm/min]/ 0,000238 [s ⁻¹]	1	216.770	145	286	30.51	50.25	30.34	0.221	1.596
	2	214.763	160	283	27.7	46.09	27.83	0.217	1.564
	3	225.550	95	283	27.82	45.38	28.05	0.222	1.573
	Ø	219.028	133.333	284.000	28.677	47.240	28.740	0.220	1.578
	s	4.684	27.789	1.414	1.297	2.148	1.135	0.002	0.013
10 [mm/min]/ 0,0019 [s ⁻¹]	1	193.536	147	276	27.43	45.91	27.57	0.232	1.625
	2	199.659	81	279	25.15	46.40	25.31	0.232	1.577
	3	196.679	143	287	24.52	44.78	24.67	0.227	1.613
	4	202.355	172	297	25.28	-	25.43	0.218	1.570
	5	221.645	183	305	23.11	-	23.25	0.207	1.568
	Ø	202.775	145.20	288.80	25.10	45.70	25.25	0.223	1.591

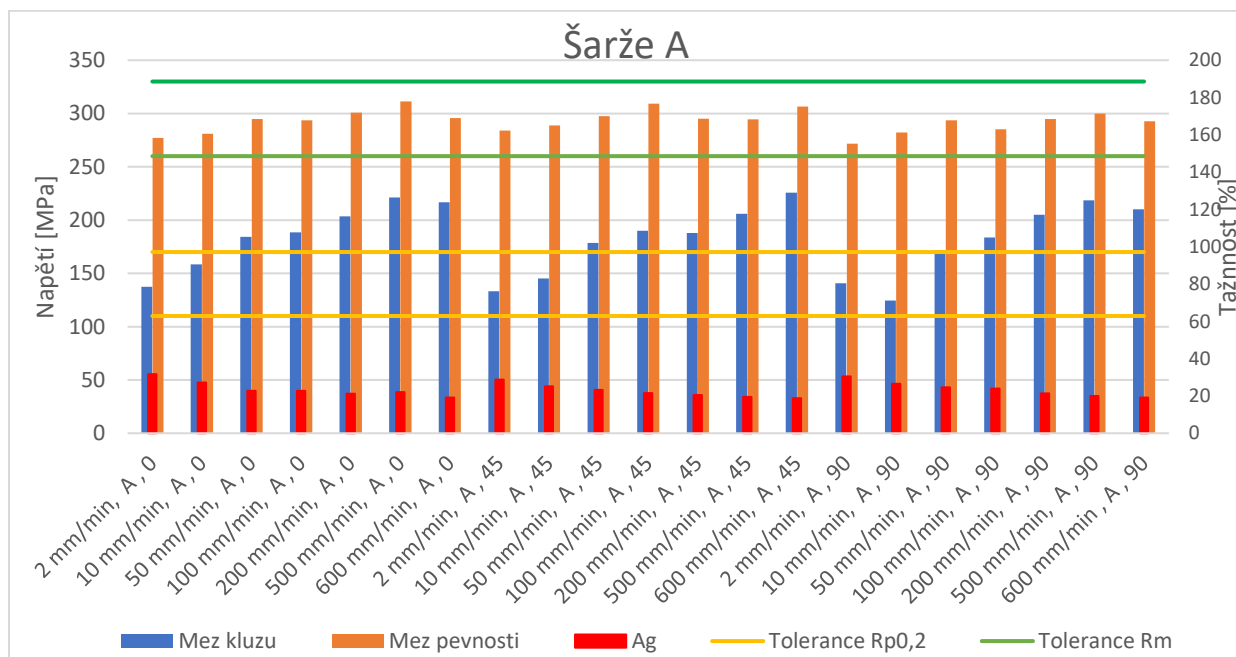
	s	9.884	35.431	10.889	1.397	0.678	1.397	0.010	0.024
50 [mm/min]/ 0,0059 [s-1]	1	219.727	185	301	22.49	39.24	22.63	-	-
	2	208.688	174	293	23.82	47.52	23.96	0.216	1.514
	3	199.773	183	295	24.57	-	24.72	0.220	1.573
	4	201.531	176	301	22.89	42.96	43.06	0.209	1.622
	5	216.835	159	287	23.57	40.70	23.70	0.219	1.553
	6	221.440	194	309	22.09	-	22.22	0.207	1.568
	Ø	211.332	178.50	297.67	23.24	42.61	26.72	0.214	1.566
	s	8.560	10.874	6.992	0.839	3.132	7.357	0.005	0.035
100 [mm/min]/ 0,0119 [s-1]	1	217.106	168	304	20.97	40.87	21.11	0.221	1.510
	2	203.257	199	310	21.46	38.30	21.63	0.205	1.601
	3	209.647	190	307	22.80	45.07	23.02	-	-
	4	218.065	205	318	19.38	42.76	19.53	-	-
	5	195.310	188	307	22.85	45.09	23.00	0.209	1.586
	Ø	208.677	190.00	309.20	21.49	42.42	21.66	0.212	1.566
	s	8.581	12.602	4.792	1.288	2.594	1.303	0.007	0.040
200 [mm/min]/ 0,0238 [s-1]	1	219.719	186	282	19.82	39.92	19.94	0.221	1.534
	2	213.080	188	300	20.87	42.56	21.01	0.222	1.498
	3	205.516	189	295	24.01	41.16	24.16	0.210	1.523
	4	208.645	184	287	20.18	39.77	20.32	0.219	1.581
	5	218.106	193	311	17.78	42.81	17.92	0.212	1.520
	Ø	213.013	188.00	295.00	20.53	41.24	20.67	0.217	1.531
	s	5.407	3.033	10.139	2.021	1.274	2.026	0.005	0.028
500 [mm/min]/ 0,0595 [s-1]	1	209.773	209	294	18.36	-	18.50	0.225	1.592
	2	221.729	206	302	20.38	42.60	20.51	0.234	1.586
	3	199.981	193	285	21.37	44.97	21.51	0.223	1.523
	4	205.827	213	298	18.19	40.67	18.33	0.237	1.513
	5	224.026	209	294	19.21	41.64	19.34	0.219	1.601
	Ø	212.267	206.00	294.60	19.50	42.47	19.64	0.228	1.563
	s	9.235	6.870	5.643	1.214	1.597	1.213	0.007	0.037
600 [mm/min]/ 0,0714 [s-1]	1	205.627	227	311	19.19	-	19.34	-	-
	2	191.877	229	308	17.93	35.72	18.09	0.216	1.556
	3	195.676	231	319	18.99	-	19.18	0.206	1.567
	4	205.260	226	303	19.52	-	19.70	0.209	1.499
	5	205.270	215	295	18.41	38.18	18.58	-	-
	6	197.718	226	304	18.91	-	19.26	0.271	1.596
	Ø	200.238	225.67	306.67	18.83	36.95	19.03	0.226	1.555
	s	5.426	5.088	7.409	0.520	1.230	0.533	0.027	0.035

Tabulka 6: Naměřená data šarže A, orientace 90

Úhel válcování = 90°									
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	R _{p0,2} [N/mm]	R _m [N/mm]	A _g [%]	A [%]	A _{gt} [%]	n [-]	r [-]
2 [mm/min]/ 0,000238 [s ⁻¹]	1	217.178	140	272	29.99	54.78	30.11	0.232	2.282
	2	211.565	144	272	26.42	44.27	26.55	0.225	2.293
	3	205.259	138	271	35.08	58.86	35.21	0.225	2.283
	Ø	211.334	140.667	271.667	30.497	52.637	30.623	0.227	2.286
	s	4.869	2.494	0.471	3.554	6.146	3.554	0.003	0.005
10 [mm/min]/ 0,0019 [s ⁻¹]	1	197.505	138	281	26.08	47.67	26.23	-	-
	2	215.574	-	288	29.40	48.15	29.52	0.227	2.282
	3	214.857	-	278	28.03	-	28.15	-	-
	4	209.782	-	264	28.11	-	28.23	0.241	2.307
	5	209.695	111	280	28.53	46.60	28.66	-	-
	6	203.360	165	281	25.02	-	25.15	-	-
	7	224.512	175	287	25.06	46.35	25.19	-	-
	8	213.622	169	288	25.25	44.28	25.38	-	-
	9	207.263	179	293	23.58	44.94	23.72	0.219	2.208
	Ø	210.686	156.17	282.22	26.56	46.33	26.69	0.229	2.266
	s	7.318	24.114	7.913	1.884	1.373	1.879	0.009	0.042
50 [mm/min]/ 0,0059 [s ⁻¹]	1	205.368	177	291	25.12	42.85	25.26	-	-
	2	211.666	161	286	23.00	43.97	23.13	-	-
	3	195.157	106	288	35.88	-	36.02	-	-
	4	219.462	181	289	23.49	-	23.63	-	-
	5	213.160	180	286	23.26	-	23.39	-	-
	6	208.888	199	301	22.12	-	22.25	0.206	2.275
	7	208.605	169	298	21.84	42.54	22.18	0.219	2.201
	8	202.550	175	298	24.32	44.11	24.53	0.221	2.179
	9	196.754	167	298	24.29	45.29	24.45	0.227	2.213
	10	195.756	203	301	23.09	46.62	23.25	0.216	2.278
	Ø	205.737	171.80	293.60	24.64	44.23	24.81	0.218	2.229
	s	7.742	25.258	5.851	3.864	1.395	3.850	0.007	0.040
100 [mm/min]/ 0,0119 [s ⁻¹]	1	218.199	182	289	22.54	37.23	22.75	0.228	2.263
	2	199.475	164	269	21.93	43.20	22.20	0.224	2.21
	3	220.342	192	288	30.63	54.40	30.75	0.216	2.273
	4	206.279	200	293	19.98	-	20.13	0.228	2.287
	5	212.161	180	287	24.36	46.41	24.49	0.22	2.261
	Ø	211.291	183.60	285.20	23.89	45.31	24.06	0.223	2.259
	s	7.683	12.159	8.352	3.650	6.196	3.621	0.005	0.026
200 [mm/min]/ 0,0238 [s ⁻¹]	1	201.590	191	287	21.34	44.65	21.49	0.225	2.266
	2	210.701	185	281	21.45	43.52	21.57	0.219	2.255
	3	213.542	227	309	20.24	-	20.38	-	-
	4	213.825	208	299	21.44	39.70	21.57	0.224	2.252

	5	197.939	201	290	22.75	-	22.90	0.218	2.26
	6	215.551	218	302	20.87	-	21.01	0.208	2.242
	Ø	208.858	205.00	294.67	21.35	42.62	21.49	0.219	2.255
	s	6.669	14.572	9.534	0.757	2.118	0.760	0.006	0.008
500 [mm/min]/ 0,0595 [s-1]	1	207.346	216	293	-	-	-	0.218	2.244
	2	209.479	200	288	19.42	-	19.56	0.227	2.251
	3	206.675	229	305	19.98	-	20.12	0.227	2.183
	4	197.300	223	300	18.93	-	19.08	0.221	2.257
	5	203.568	225	314	21.49	36.85	21.54	0.197	2.215
	Ø	204.874	218.60	300.00	19.96	36,85	20.08	0.218	2.230
	s	4.234	10.210	9.099	0.961	0	0.922	0.011	0.028
600 [mm/min]/ 0,0714 [s-1]	1	213.393	204	290	16.15	-	16.28	-	-
	2	191.877	229	308	17.93	35.72	18.09	0.234	2.178
	3	207.712	206	288	18.24	41.52	18.38	0.229	2.165
	4	193.523	219	291	17.05	-	17.20	0.215	2.242
	5	205.478	202	288	19.65	42.05	19.84	0.222	2.172
	6	212.215	212	291	20.47	-	20.61	0.215	2.236
	7	209.414	199	293	24.25	45.88	24.85	0.184	2.231
	Ø	204.802	210.14	292.71	19.11	41.29	19.32	0.217	2.204
	s	8.047	9.877	6.452	2.499	3.631	2.636	0.016	0.033

Z naměřených hodnot jsme dále vytvořili grafy, které lépe názorně ukazují vliv jednotlivých parametrů na mechanické vlastnosti.



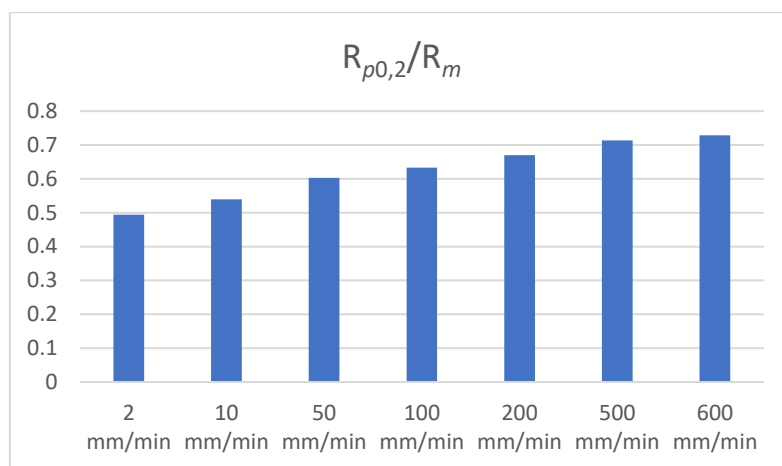
Graf 1: Data šarže A

Na grafu č. 1 můžeme vidět zaznamenané hodnoty meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti v závislosti na změně podmínek zkoušky. Dále je v grafu zeleně vyznačena oblast intervalu meze pevnosti a žlutě oblast meze kluzu. Tímto způsobem můžeme lépe vyhodnotit jednotlivé hodnoty mechanických vlastností a popsat jejich vztah.

V grafu č. 1 vidíme, že všechny hodnoty meze pevnosti se nachází v oblasti intervalu a narůstají na hodnotě se zvyšující se rychlosti zatěžování. K nárůstu meze pevnosti dochází kvůli postupnému zvýšení rychlosti deformace uvnitř materiálu.

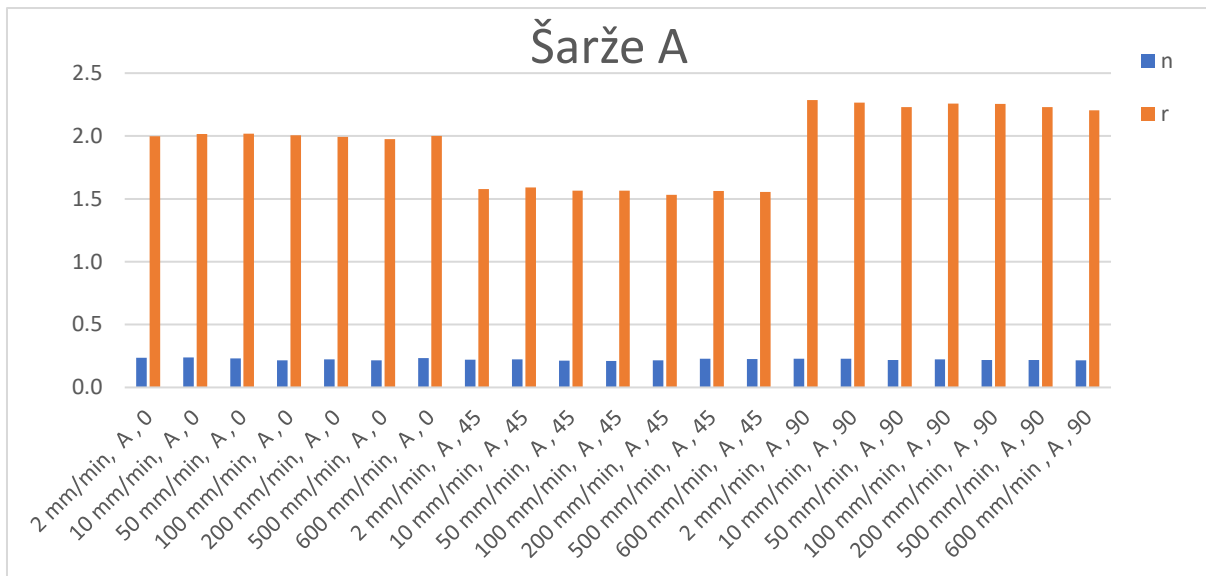
Hodnoty meze kluzu jsou při normované rychlosti 2 mm/min také v oblasti intervalu daného předpisem normy, čímž materiál splňuje dodací podmínky. Vidíme však, že při zvyšující se rychlosti se hodnoty meze kluzu zvyšují a dochází ke zvětšení poměru meze kluzu vůči mezi pevnosti, čímž dochází ke zmenšení oblasti umožňující tváření materiálu.

Na následujícím grafu č. 2 vidíme postupné zvětšení poměru meze kluzu k mezi pevnosti. Hodnoty byly pro lepší přehlednost zprůměrovány ze všech orientací.



Graf 2: Poměr meze kluzu vůči mezi pevnosti šarže A, orientace 0

Další měřenou hodnotou byl koeficient plastické deformace a exponent deformačního zpevnění.

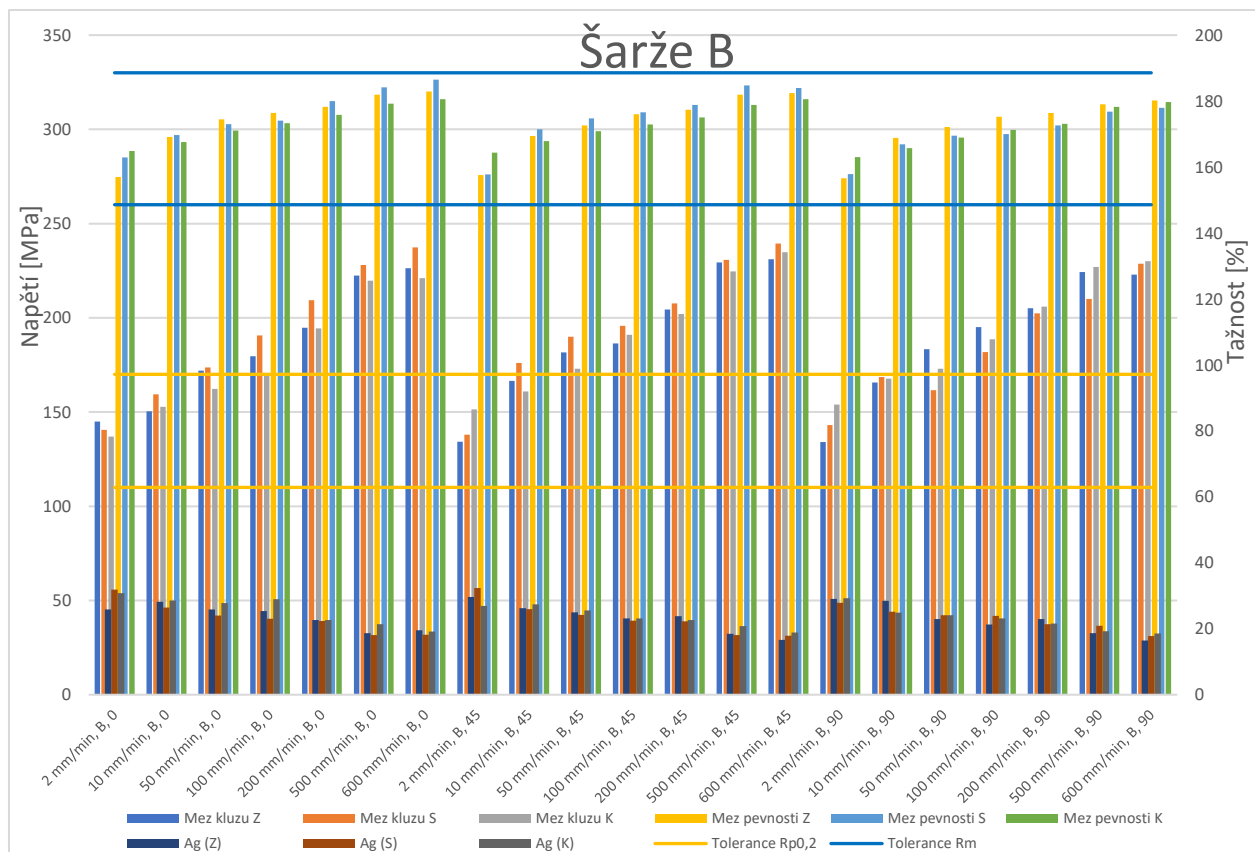


Graf 3: Hodnoty exponentu deformačního zpevnění a součinitele plošné anizotropie šarže A

Můžeme vidět, že rychlost zatěžování nemá zásadní vliv na exponent deformačního zpevnění ani součinitel plastické anizotropie. Zatímco u „n“ exponentu deformačního zpevnění je hodnota téměř neměnná, u „r“ součinitele plastické anizotropie dochází k mírným odchylkám, avšak stále je směrodatná odchylka přijatelná, jak při porovnání mezi jednotlivými vzorky, tak při porovnání mezi různými rychlostmi zatěžování.

Na hodnotu součinitele plastické anizotropie má vliv orientace válcování, kde vidíme rozdílné hodnoty v závislosti na orientaci vzorku v pásu plechu.

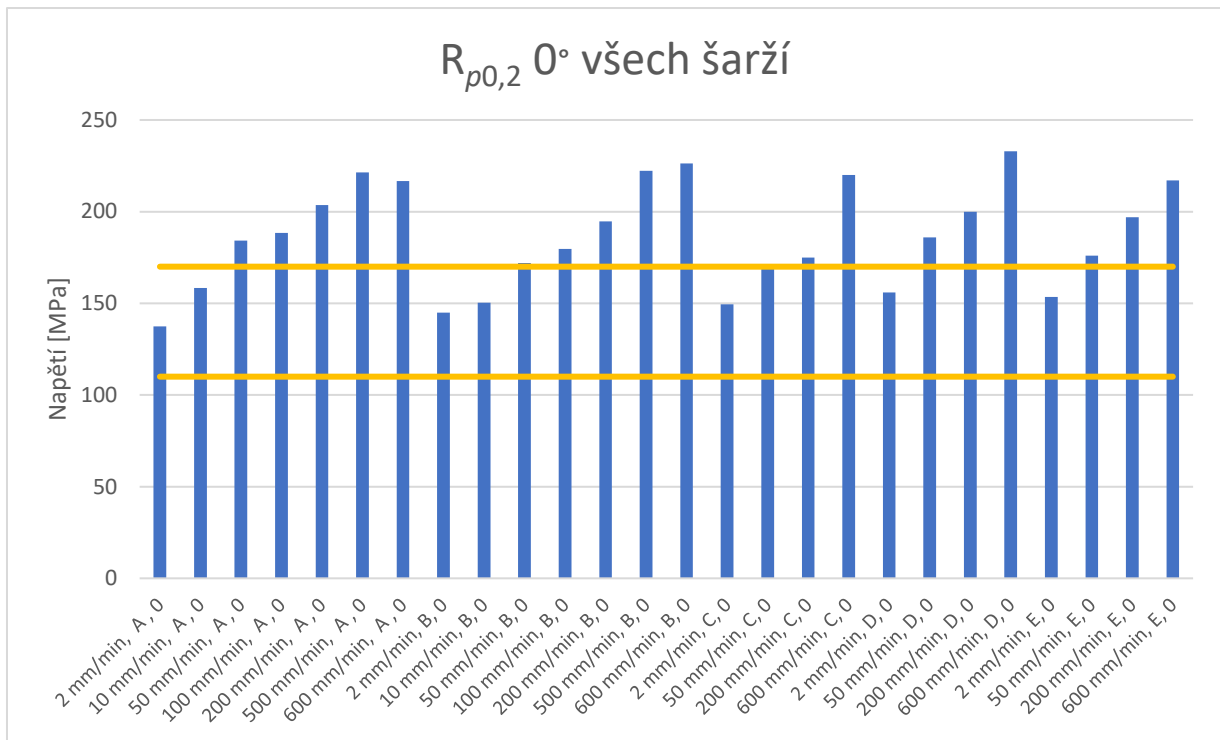
Z důvodu absence parametru polohy ve svitku při měření šarže A bude ovlivnění mechanických vlastností tímto parametrem ukázáno na šarži B.



Graf 4: Srovnání hodnot šarže B pro různé orientace válcování

Zde vidíme, že rozdíly v naměřených hodnotách na začátku, středu a konci svitku jsou ve většině případů minimální. Rozdíly jsou patrné například na středu svitku, kde byly naměřeny vyšší hodnoty na mezi kluzu při orientacích 0° a 45°, naopak při orientaci 90° byly hodnoty vyšší na začátku svitku.

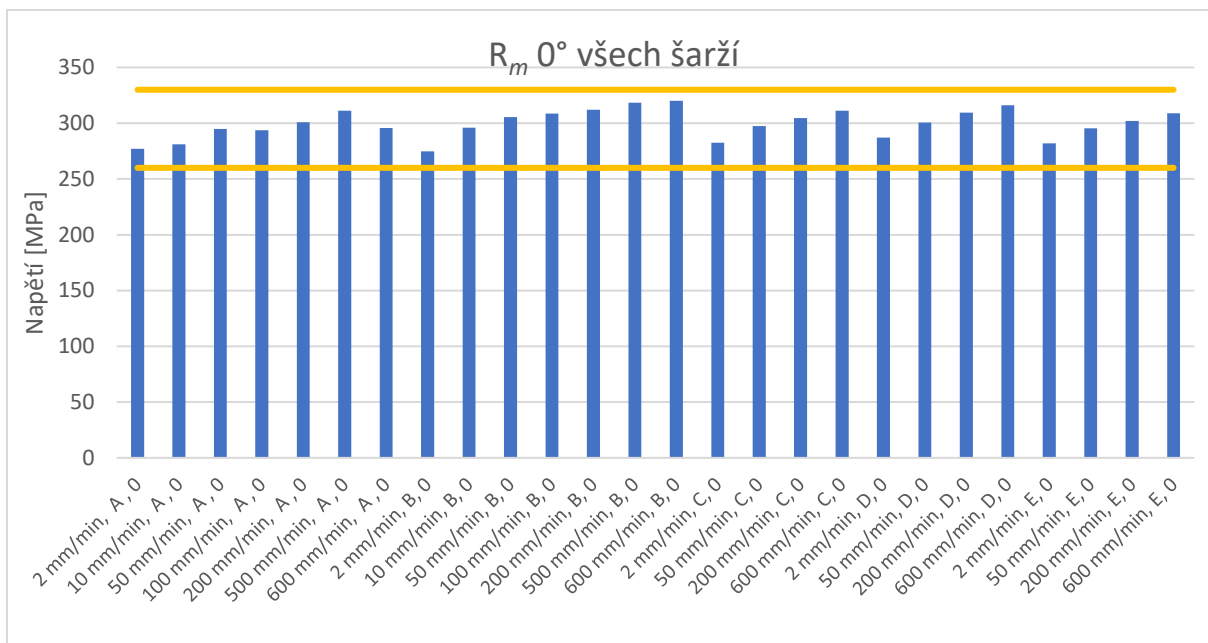
Tímto způsobem byly vyhodnoceny všechny následující šarže, jejichž data jsou v příloze č. 2. V následujícím textu se budeme hlavně věnovat srovnání jednotlivých šarží mezi sebou či rozdílným vlivům jednotlivých parametrů.



Graf 5: Srovnání meze kluzu všech šarží při různých rychlostech

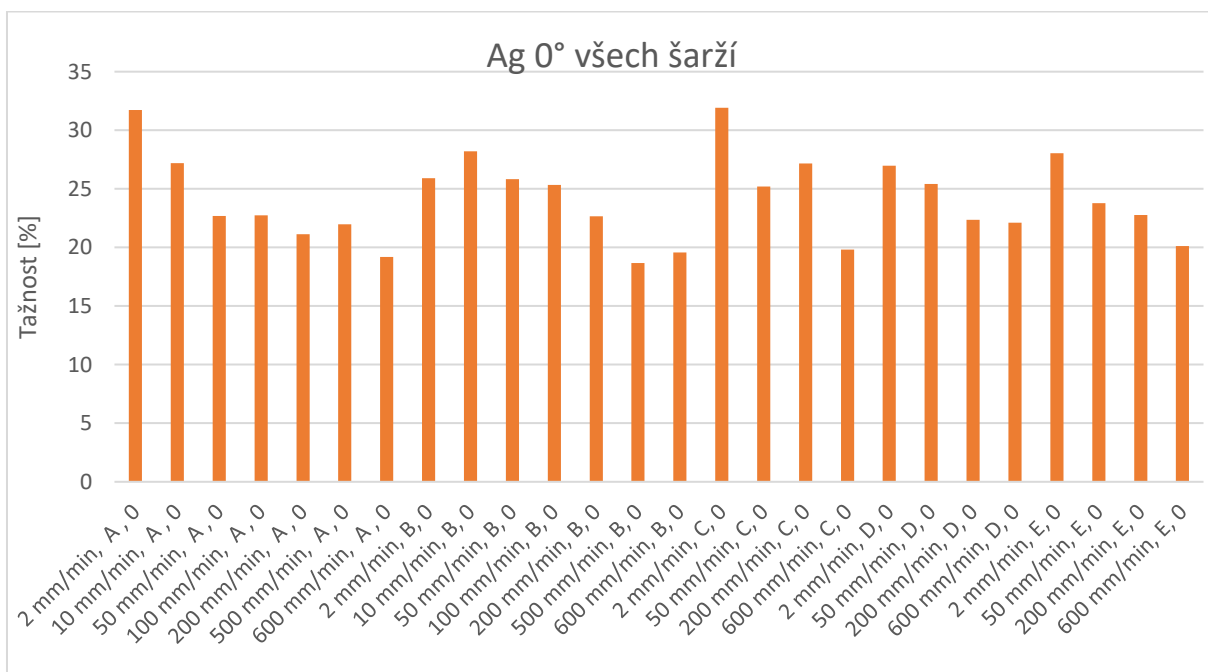
Z grafu č. 5 vidíme hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ pro standartní podmínky zkoušky v toleranci předepsané normou znázorněnými žlutými čarami. Šarže A má hodnoty spíše ve spodní části intervalu, zatímco šarže B, C, D, E vykazují hodnoty v horní polovině intervalu. Jejich rozdíl však činí v maximu 18 MPa, což představuje z průměrné hodnoty 148,5 MPa rozptyl hodnot při maximálním rozdílu o 12,5 %. Dále z grafu vyčteme navyšující se trend hodnot v závislosti na zvyšující se rychlosti zatěžování. Hodnoty meze kluzu se pro vyšší rychlosti zatěžování nacházejí i mimo oblast pásma meze kluzu dané výrobcem.

Zde analyzované hodnoty jsou pro orientaci 0° vůči směru válcování, které dosahují vyšších hodnot než pro ostatní směry. Norma přikazuje udávání hodnoty pro orientaci 90° , nicméně pro naše účely došlo k vyhodnocení všech směrů a následně prezentace jedné modelové šarže pro orientaci 0° .



Graf 6: Srovnání meze kluzu všech šarží při různých rychlostech

Na grafu č. 6 vidíme chování meze pevnosti v závislosti na změně rychlosti při orientaci 0° vůči směru válcování. Vidíme, že následují podobný trend, jako hodnota meze kluzu a také se její hodnota zvyšuje s rychlostí zatěžování. Uvedené hodnoty se i přes tyto skutečnosti nachází v hodnotách definovaných normou.

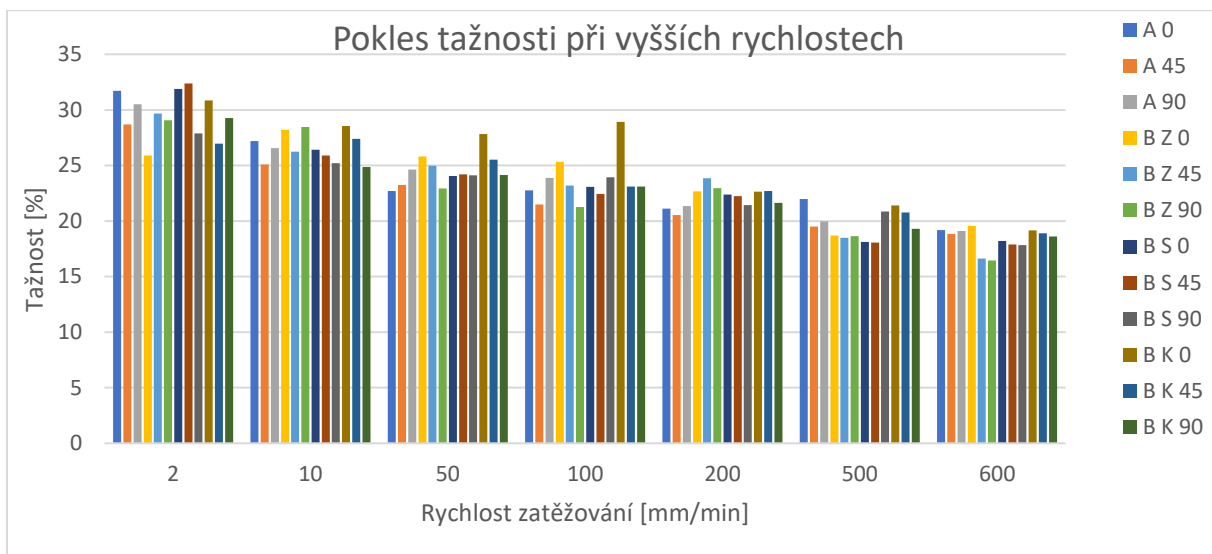


Graf 7: Srovnání tažností všech šarží pro různé rychlosti zatěžování

Z grafu č. 7 je patrný trend snižování tažnosti materiálu s rostoucí rychlostí zatěžování, čímž dochází ke snížení zásoby plasticity materiálu.

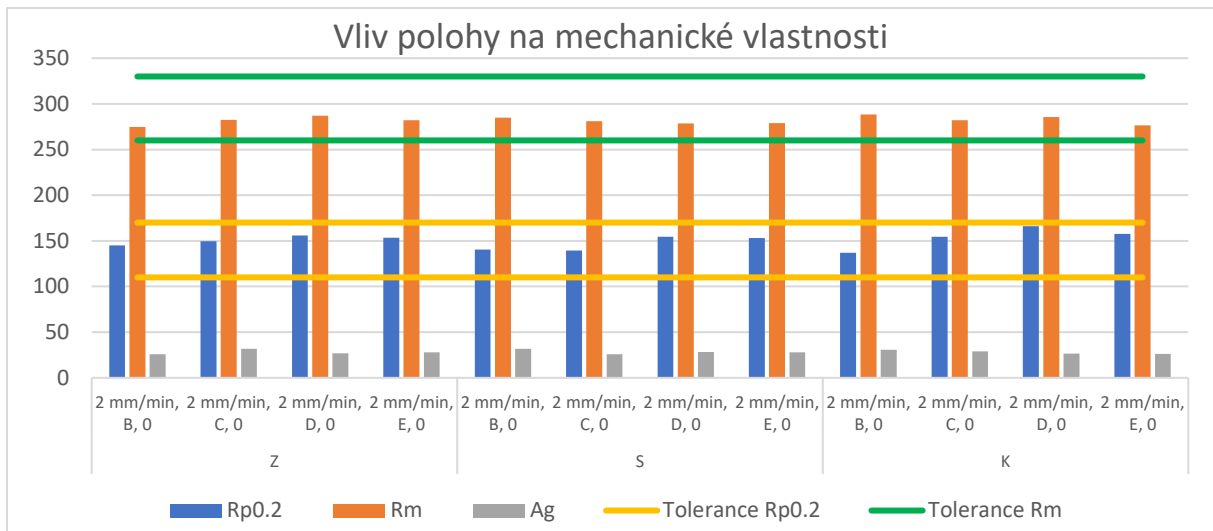
Celkový přehled chování tažnosti je patrný na grafu č. 8, kde jsou hodnoty celkové tažnosti šarží A a B ve všech analyzovaných směrech porovnány z hlediska rychlosti zatěžování.

V grafu jsou patrné výrazné odchylky v hodnotách tažnosti. To je dáno metodikou vyhodnocování tažnosti a snahou o co možná nejvíce ucelený přehled o dosažených výsledcích. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto o ponechání i takovýchto dat, ale bylo by třeba se podrobněji zabývat těmito odchylkami a případně rozšířit spektrum měření.



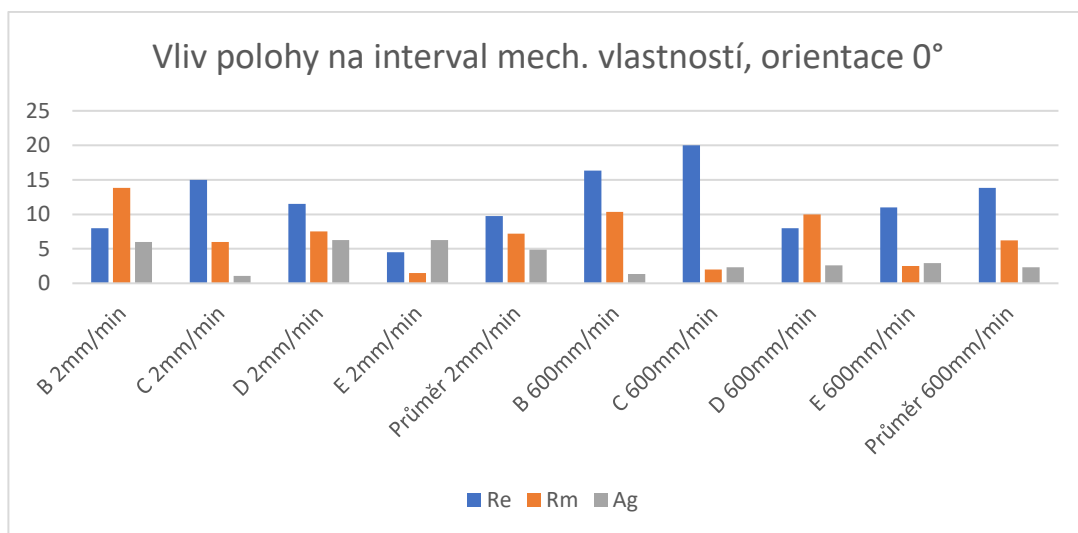
Graf 8: Závislost poklesu tažnosti na rychlosti zatěžování

Dalším měřeným parametrem jsme zvolili polohu ve svitku. Vzorky z různých částí na svitku jsme následně změřili a jejich mechanické vlastnosti si můžeme prohlédnout na grafu č. 9 níže. Vzorky uvedené v grafu byly měřeny při rychlosti zatěžování 2mm/min. Všechny hodnoty jsou v pásmech tolerancí. Vidíme, že dochází ke změnám v hodnotách jednotlivých mechanických vlastností, avšak jejich rozdíl není zásadní.



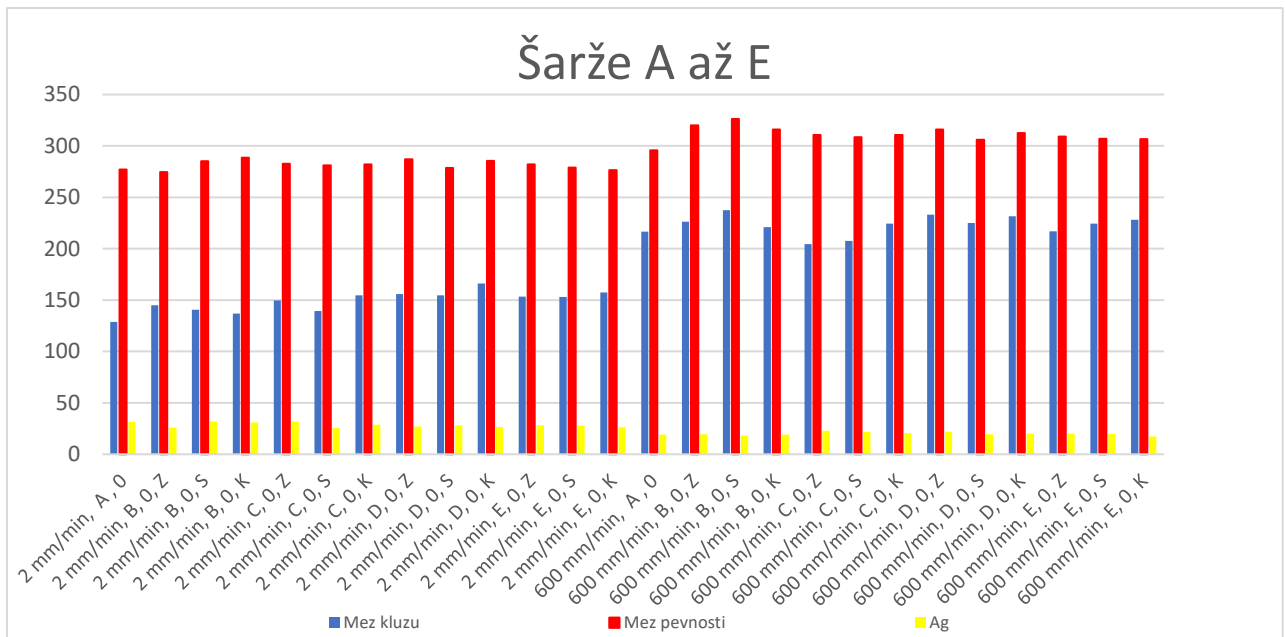
Graf 9: Změna mechanických vlastností v závislosti na poloze ve svitku

Dále ještě můžeme porovnat změnu mechanických vlastností napříč šaržemi při porovnání maximální a minimální naměřené hodnoty pro danou šarži. Z tohoto porovnání vidíme, že největší interval rozptylu mechanických vlastností meze kluzu byl u šarže C u všech rychlostí deformace. Naopak se tato šarže vyznačovala nejmenší citlivostí na rozptyl hodnot meze pevnosti. Největší rozdíl v naměřených hodnotách meze pevnosti pak měla šarže B, hodnoty meze kluzu byly proměnlivé u všech šarží zejména pro rychlost 2 mm/min.



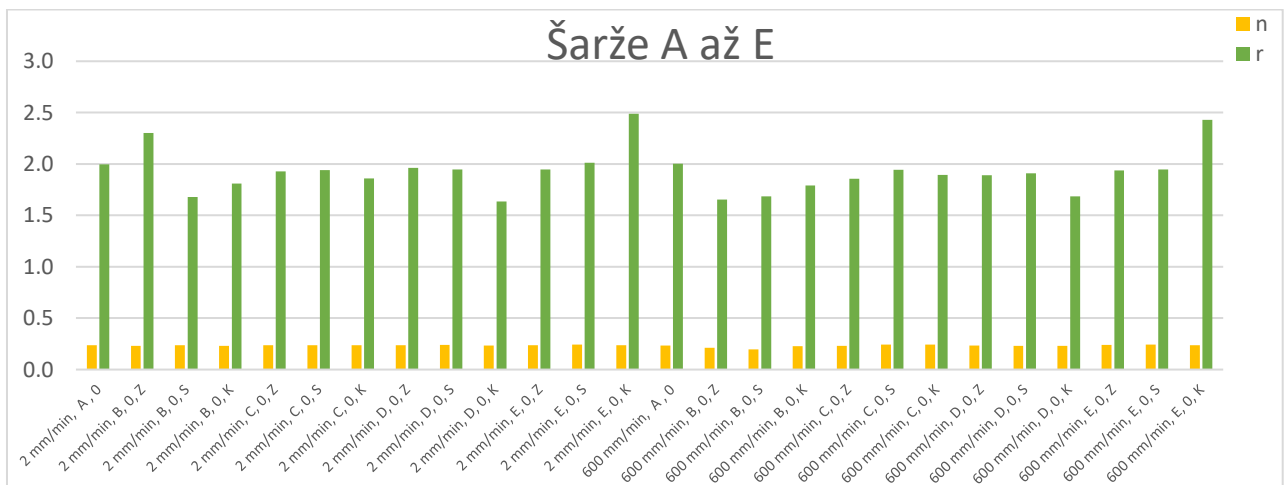
Graf 10: Citlivost šarží na rozptyl hodnot, orientace 0

Zde již vidíme celkové shrnutí jednotlivých šarží a námi zvolených parametrů při minimální a maximální rychlosti zatěžování.



Graf 11: Celkové shrnutí všech naměřených hodnot

Můžeme hodnotit, že materiály různých šarží A až E při normované rychlosti splňují materiálové charakteristiky zadané výrobcem. Při hodnocení materiálu jsou mechanické vlastnosti na začátku a konci svitku rozdílné, avšak vždy splňují podmínky stanovené popisem intervalu mechanických vlastností při zatěžování rychlostí 2 mm/min.

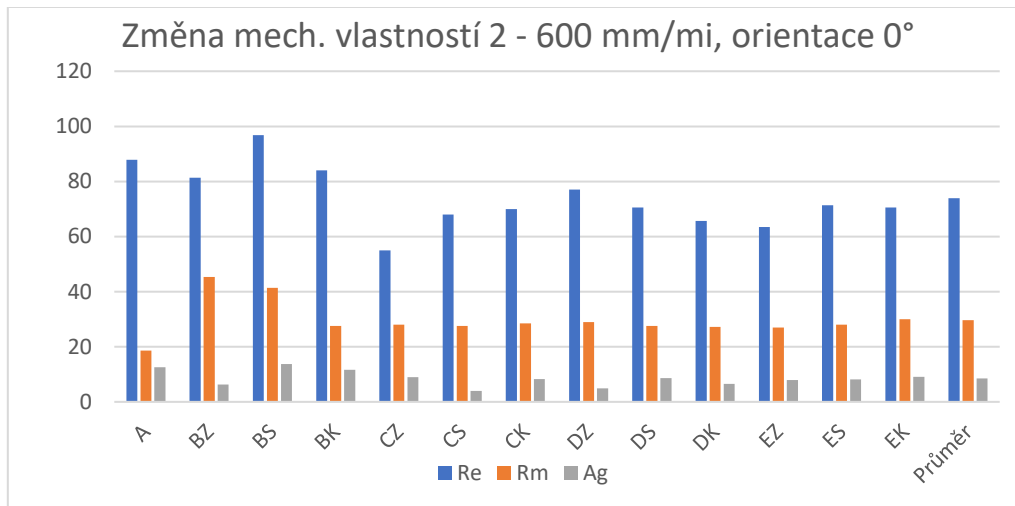


Graf 12: Chování "n" exponentu deformačního zpevnění a "r" součinitele plastické anizotropie u různých šarží a poloh ve svitku

Při pohledu na graf č. 12 ukazující hodnoty exponentu deformačního zpevnění a součinitele plastické anizotropie vidíme, že exponent deformačního zpevnění je totožný v průběhu celého měření a není ovlivněn rychlostí zatěžování. Srovnání grafu je vytvořeno pro rychlosti 2 a 600 mm/min pro porovnání případných rozdílů při nejmenší a nejvyšší rychlosti zatěžování. U součinitele plastické anizotropie sice mírné rozdíly vidíme, ale jedná se o mírné

odchytky ve většině případů mezi různými šaržemi. Viditelně vyšší hodnoty součinitele vidíme například u šarže E, orientace 0°, poloha svitku na konci. Hodnoty jsou tedy zvýšené pro stejný materiál, ve stejné orientaci a ve stejné poloze. Můžeme tedy tvrdit, že rychlost zatěžování na ně zásadní vliv nemá.

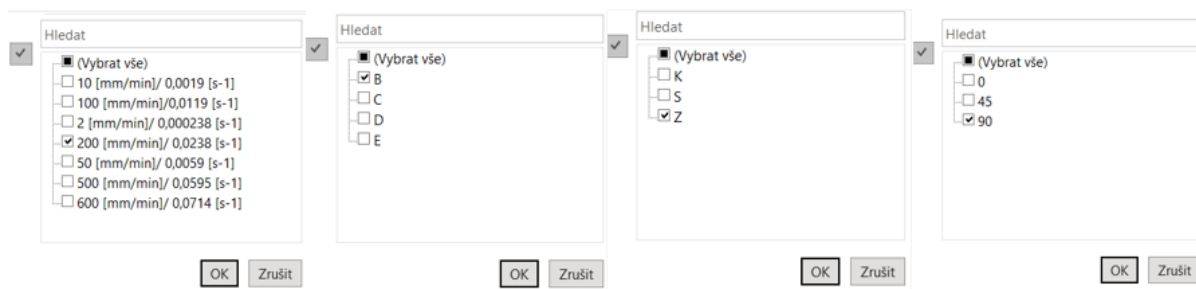
Na grafu č. 13 si můžeme prohlédnout jednotlivé změny mechanických vlastností při porovnání změny rychlosti zatěžování z 2 mm/min na 600 mm/min.



Graf 13: Změna mechanických vlastností při změně rychlosti zatěžování

Vidíme, že dochází k poměrně značným rozdílům co se jednotlivých šarží týče. U jednotlivých šarží dochází k poměrně mírným odchýlkám, avšak při porovnání šarže B střed vůči šarži C začátek si můžeme všimnout, že rozdíl mechanických vlastností je 41,83 MPa. Stejného extrému v tomto případě dosahuje i rozdíl ve snížení tažnosti o 9,68 %. V průměru docházelo ke zvýšení meze kluzu o 73,97 MPa, zvýšení meze pevnosti o 29,65 MPa a ke snížení tažnosti o 8,51 %. V průměru došlo ke zvýšení meze kluzu ze 148,87 MPa na 222,83 MPa a ke zvýšení meze pevnosti z 281,47 MPa na 311,13 MPa. Průměrný poměr $R_{p0,2}/R_m$ se zvýšil z 0,529 na 0,716.

Pro lepší orientaci v námi změřených datech byla vytvořena kontingenční tabulka, pomocí které lze s pomocí vytvořených filtrů různě srovnávat a porovnávat jednotlivé výsledky zkoušky. V tabulce jsou vytvořeny filtry podle jednotlivých parametrů, tedy číslo šarže, orientace válcování, poloha ve svitku a rychlost zatěžování. Dle nastavení jednotlivých filtrů si můžeme jednoduše zobrazit námi požadovanou kombinaci parametrů. Např. je-li požadavek na zobrazení mechanických vlastností pro šarži B, rychlost 200 mm/min, pozici na začátku svitku a orientaci válcování 90 °, nastavíme jednotlivé filtry následovně, jak je ukázáno na obr. 32.



Obrázek 32: Možnosti filtrování v kontingenční tabulce

Následně je možné zobrazit jednotlivé naměřené vzorky pro námi zadanou sadu parametrů. V našem případě tak bude výsledkem následující soubor hodnot, jak vidíme na obr. 33.

E [kN/mm]	Rp0,2 [N/mi]	Rm [N/mi]	Ag [%]	A [%]	Ag1 [%]	n[-]	r [-]	prvních 50 pod a nad	Rp/Rm	pod a nad průměrem	prvních 50 pod a nad	n * r Ag pod a nad průměrem
216.59	207	305	18.12	42.05	22.71	0.217	2.255	0.679	0.679	8.867	8.867	
217.78	205	310	22.02	42.05	22.16	0.223	2.237	0.661	0.661	10.985	10.985	
	203	311	28.77	45.05	28.92	0.222	2.223	0.653	0.653	14.198	14.198	

Obrázek 33: Výsledek filtrování dle zvolených parametrů

Kontingenční tabulka je dále vybavena grafickým znázorněním hodnot. Jednotlivé hodnoty jsou v závislosti na svojí velikosti označeny červeným nebo zeleným polem. Kritéria pro označení hodnot se různí podle povahy dělení. Poměr $R_{p0,2}/R_m$ je například označen červenou v případě, kdy hodnota poměru je nad mediánem všech naměřených hodnot. Neznačí tedy, že se jedná o materiál nesplňující kritéria, nýbrž označuje jeho hodnotu v porovnání vůči ostatním vzorkům. Dále jsou vzorky například označeny podle blízkosti k mediánu. Stejným označením podléhá i např. součinitel plastické anizotropie a exponent deformačního zpevnění.

3.3 Vyhodnocení experimentu zkoušky dle Nakajimy

Stejně jako v případě zkoušky tahem byla i v případě zkoušky dle Nakajimy naměřená data zanesena do softwaru MS Excel, kde byla jednotlivá data zpracována. V případě zkoušky dle Nakajimy nám odpadá parametr orientace válcování. V normě popisující zkoušku je definování polohy vzorku vzhledem ke směru válcování, v našem případě pro ocel, je směr válcování kolmý na směr dřívku vzorku. Při měření jsme používali rychlosti 2, 10, 14 a 17 mm/s, od šarže B pak už jen 2 a 17 mm/s. Obdobně jako u prezentace výsledků zkoušky tahem bude i zde představeno vyhodnocení šarže A a následně dojde k vyhodnocení rozptylu mechanických vlastností napříč šaržemi. Následuje tabulka 7, 8, 9, a 10 naměřených dat pro šarži A.

Tabulka 7: Naměřená data, šarže A, rychlost 2 mm/s

2 mm/s															
G1	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s	
Major strain	0.625	0.640	0.642	0.632	0.629	0.620	0.611	0.689	0.731	0.694	0.692	0.756	0.663	0.045	
Minor strain	-0.331	-0.333	-0.326	-0.340	-0.331	-0.332	-0.364	-0.385	-0.378	-0.378	-0.337	-0.381	-0.351	0.023	
G2	01_0	01_1	01_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s	
Major strain	0.531	0.472	0.495	0.431	0.430	0.424	0.426	0.458	0.465	0.466	0.413	0.414	0.452	0.034	
Minor strain	-0.063	-0.041	-0.056	-0.043	-0.041	-0.046	-0.049	-0.048	-0.051	-0.054	-0.034	-0.046	-0.048	0.007	
G3	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	04_0	04_1	04_2	AVG	s				
Major strain	0.345	0.353	0.349	0.338	0.343	0.343	0.354	0.362	0.351	0.349	0.007				
Minor strain	0.067	0.073	0.077	0.060	0.058	0.059	0.084	0.088	0.084	0.072	0.011				
G4	01_0	01_1	01_2	03_0	03_1	03_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s				
Major strain	0.414	0.428	0.418	0.416	0.415	0.407	0.411	0.413	0.418	0.416	0.005				
Minor strain	0.160	0.157	0.156	0.191	0.188	0.191	0.170	0.177	0.176	0.174	0.013				
G5	01_0	01_1	01_2	03_0	03_1	03_2	07_0	07_1	07_2	AVG	s				
Major strain	0.492	0.486	0.486	0.472	0.460	0.477	0.444	0.447	0.460	0.469	0.016				
Minor strain	0.271	0.272	0.268	0.290	0.288	0.288	0.261	0.258	0.263	0.273	0.012				

Tabulka 8: Naměřená data, šarže A, rychlost 10 mm/s

10 mm/s																	
G1	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.645	0.636	0.679	0.630	0.630	0.584	0.608	0.611	0.623	0.679	0.641	0.594	0.697	0.625	0.650	0.635	0.031
Minor strain	-0.349	-0.341	-0.337	-0.325	-0.324	-0.321	-0.322	-0.333	-0.326	-0.346	-0.340	-0.344	-0.340	-0.327	-0.332	-0.334	0.009
G2	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.438	0.458	0.437	0.410	0.418	0.439	0.442	0.416	0.425	0.413	0.418	0.416	0.432	0.417	0.421	0.427	0.013
Minor strain	-0.047	-0.044	-0.048	-0.043	-0.044	-0.046	-0.041	-0.040	-0.043	-0.042	-0.040	-0.039	-0.037	-0.039	-0.043	-0.042	0.003
G3	01_0	01_1	01_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s			
Major strain	0.347	0.355	0.344	0.345	0.327	0.337	0.340	0.335	0.339	0.331	0.342	0.334	0.340	0.007			
Minor strain	0.115	0.107	0.111	0.075	0.079	0.079	0.080	0.067	0.061	0.087	0.088	0.082	0.086	0.016			
G4	01_0	01_1	01_2	03_0	03_1	03_2	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s				
Major strain	0.381	0.383	0.397	0.399	0.403	0.410	0.405	0.406	0.360	0.368	0.362	0.389	0.018				
Minor strain	0.204	0.201	0.204	0.180	0.183	0.185	0.160	0.165	0.158	0.165	0.160	0.179	0.017				
G5	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.474	0.471	0.472	0.440	0.441	0.437	0.451	0.441	0.432	0.480	0.489	0.488	0.446	0.448	0.442	0.457	0.019
Minor strain	0.284	0.286	0.286	0.281	0.275	0.273	0.260	0.269	0.264	0.323	0.314	0.317	0.293	0.293	0.287	0.287	0.018

Tabulka 9: Naměřená data, šarže A, rychlost 14 mm/s

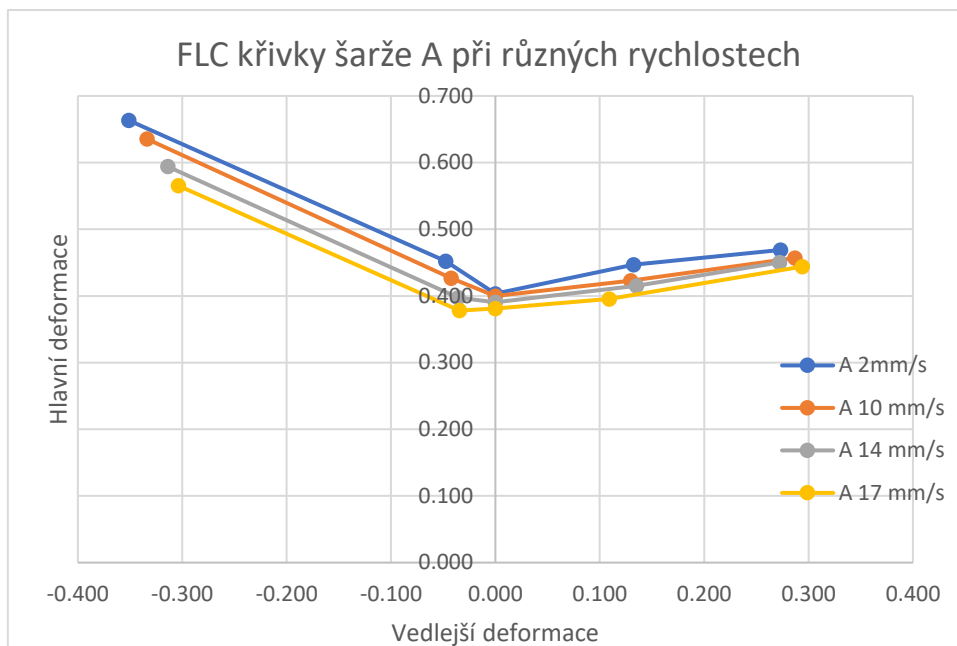
14 mm/s																	
G1	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.590	0.590	0.576	0.573	0.594	0.592	0.573	0.594	0.600	0.585	0.603	0.606	0.596	0.630	0.609	0.594	0.014
Minor strain	-0.309	-0.311	-0.311	-0.305	-0.309	-0.312	-0.308	-0.314	-0.316	-0.316	-0.318	-0.317	-0.315	-0.325	-0.323	-0.314	0.005

G2	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.409	0.409	0.405	0.391	0.401	0.404	0.387	0.381	0.381	0.395	0.399	0.399	0.404	0.402	0.397	0.398	0.009
Minor strain	-0.035	-0.036	-0.038	-0.040	-0.037	-0.039	-0.031	-0.029	-0.030	-0.037	-0.036	-0.035	-0.035	-0.036	-0.039	-0.036	0.003
G3	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	04_0	04_1	04_2	AVG	s						
Major strain	0.351	0.343	0.343	0.310	0.319	0.305	0.355	0.353	0.357	0.337	0.019						
Minor strain	0.092	0.091	0.095	0.094	0.081	0.081	0.075	0.077	0.078	0.085	0.008						
G4	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	04_0	05_0	05_2	05_1	AVG	s					
Major strain	0.389	0.399	0.393	0.403	0.406	0.405	0.384	0.362	0.361	0.350	0.385	0.019					
Minor strain	0.216	0.218	0.212	0.177	0.169	0.171	0.174	0.166	0.161	0.164	0.183	0.022					
G5	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.440	0.434	0.431	0.432	0.429	0.432	0.465	0.460	0.459	0.488	0.475	0.481	0.444	0.448	0.432	0.450	0.019
Minor strain	0.272	0.270	0.272	0.285	0.281	0.275	0.239	0.237	0.237	0.334	0.339	0.340	0.233	0.237	0.232	0.272	0.038

Tabulka 10: Naměřená data, šarže A, rychlost 17 mm/s

17mm/s																	
G1	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.532	0.535	0.521	0.580	0.578	0.574	0.574	0.596	0.580	0.577	0.579	0.566	0.567	0.568	0.553	0.565	0.020
Minor strain	-0.294	-0.294	-0.291	-0.311	-0.312	-0.311	-0.305	-0.310	-0.307	-0.306	-0.309	-0.307	-0.300	-0.301	-0.297	-0.304	0.007
;	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.375	0.365	0.376	0.380	0.379	0.375	0.380	0.376	0.383	0.356	0.360	0.360	0.403	0.402	0.401	0.378	0.014
Minor strain	-0.033	-0.032	-0.034	-0.034	-0.034	-0.035	-0.034	-0.034	-0.034	-0.033	-0.032	-0.033	-0.039	-0.037	-0.040	-0.035	0.002
G3	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s
Major strain	0.325	0.332	0.321	0.332	0.334	0.330	0.337	0.315	0.322	0.344	0.352	0.362	0.332	0.334	0.339	0.334	0.012
Minor strain	0.086	0.090	0.086	0.083	0.084	0.086	0.079	0.074	0.076	0.086	0.086	0.085	0.077	0.076	0.078	0.082	0.005
G4	01_0	01_1	01_2	02_0	02_1	02_2	03_1	04_0	04_1	04_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s		
Major strain	0.366	0.373	0.370	0.369	0.367	0.376	0.399	0.326	0.332	0.325	0.394	0.372	0.390	0.366	0.023		
Minor strain	0.114	0.119	0.116	0.154	0.157	0.150	0.159	0.19	0.186	0.189	0.185	0.185	0.181	0.160	0.028		
G5	01_0	01_1	01_2	02_1	02_2	03_0	03_1	03_2	05_0	05_1	05_2	AVG	s				
Major strain	0.418	0.417	0.420	0.481	0.455	0.465	0.465	0.471	0.418	0.436	0.439	0.444	0.023				
Minor strain	0.265	0.260	0.271	0.318	0.312	0.309	0.300	0.310	0.289	0.296	0.303	0.294	0.019				

V tabulce jsou uvedena data ze zkoušky získaná z programu ARAMIS pro „Major strain“ a „Minor strain“. Jedná se o hlavní a vedlejší deformace, které byly vyhodnoceny. Jejich hodnota nám popisuje tedy bod, při kterém dochází k porušení materiálu a jedná se o hraniční bod křivky vyznačující bezpečnou oblast tváření. Různé geometrie definují polohu těchto bodů při různých hlavních a vedlejších deformacích, čímž simulujeme různé typy stavu deformace při tváření.

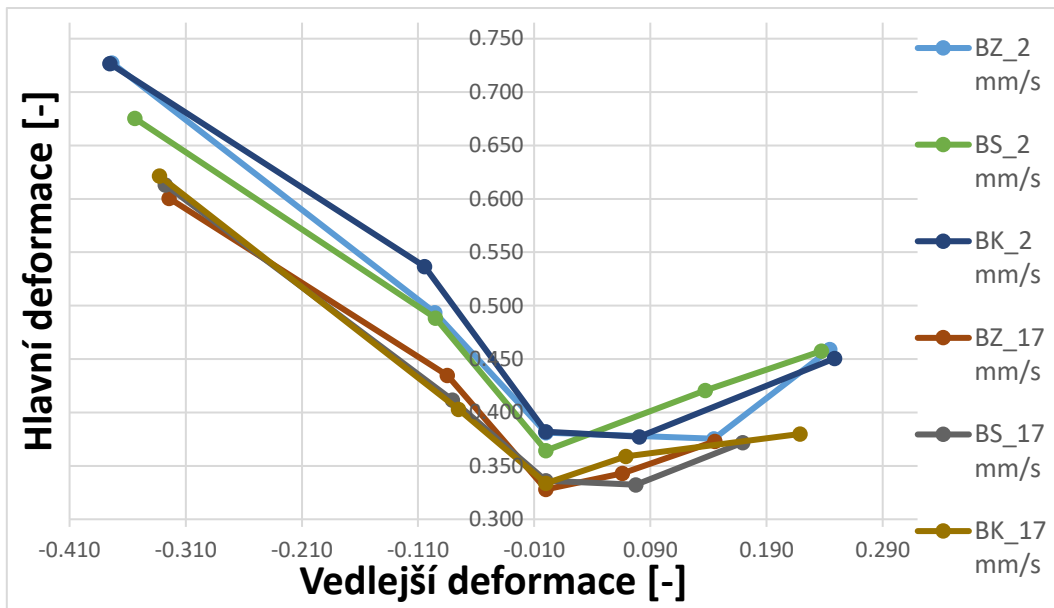


Graf 14: FLC křivky pro šarži A

Na grafu č. 14 vidíme již zaznamenané hodnoty poměru jednotlivých geometrií, které byly následně propojeny s body zaznamenanými při stejné rychlosti zatěžování. Vznikly nám tak 4 křivky mezní tvářitelnosti, které ukazují, jaký vliv má rychlost tváření na zásobu plasticity v materiálu při daném poměru hlavních a vedlejších deformací.

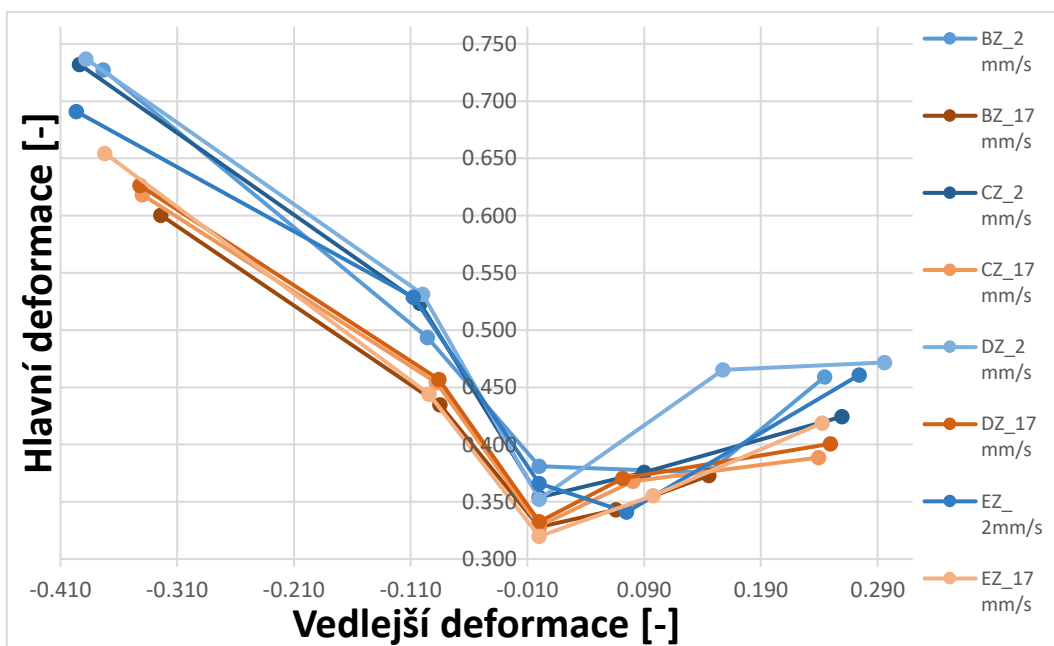
Vidíme, že křivka pro 2 mm/s je položena nejvýše a disponuje tedy největší zásobou plasticity. S rostoucí rychlostí dochází k posunu křivky směrem dolů, což znamená snížení maximálních hodnot pro hlavní a vedlejší deformaci. Na tento zkoumaný jev má dozajista vliv rychlost deformace materiálu. Musíme však brát i v potaz realizaci experimentu, kdy byl pro nejspokojivější výsledek zkoušky použit tribologický systém, jehož úkolem bylo zajistit minimální tření mezi vzorkem a tažníkem. Při vyšších rychlostech bylo patrné, že po zkoušce docházelo ve větší míře k vytlačení maziva a k větším deformacím PTFE pásku a PE fólie. Po zkoušce byly také vzorky významně teplejší, než před ní, na základě čeho můžeme i případnou změnu teploty přisuzovat změně mechanických vlastností. Tento experiment však nebyl pro takové možnosti navrhnout a tyto důsledky nejsou brány v potaz.

Pro porovnání parametru polohy na svitku použijeme šarži B. Na grafu 15 vidíme, že hodnoty se liší hlavně v závislosti na rychlosti zatěžování, parametr polohy způsobuje pouze nevýznamné odchylky, které neovlivňují celkový průběh křivky. Dávají nám ale cenné informace o nestejnorození materiálu a o případné změně mechanických vlastností.



Graf 15: Vliv polohy ve svitku na křivky FLC šarže B

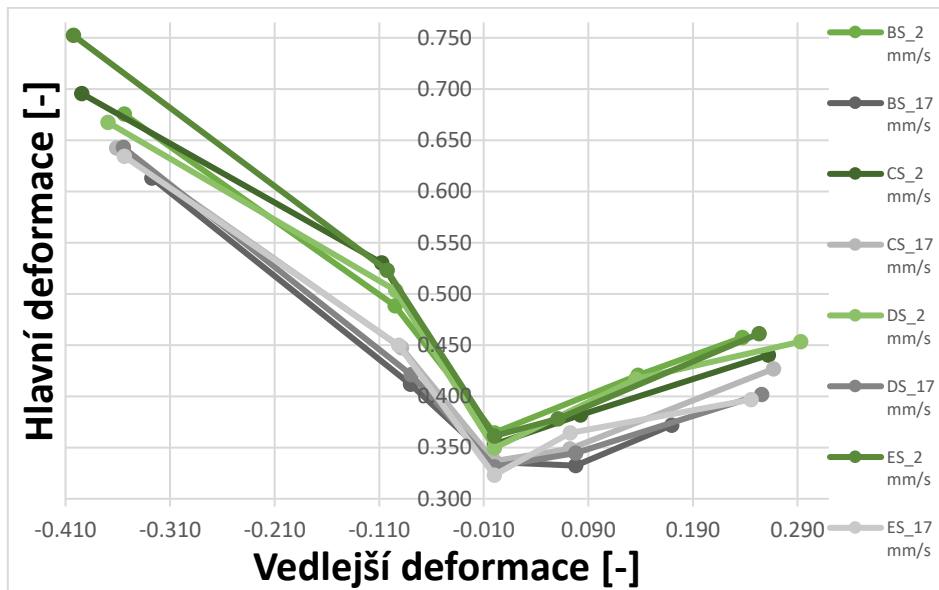
Opět vidíme, že body křivky vzniklé při zatěžování nižší rychlostí jsou položené výše než body zatěžované vyšší rychlostí.



Graf 16: Srovnání křivek FLC různých šarží při rychlostech 2 a 17 mm/s z polohy začátku svitku

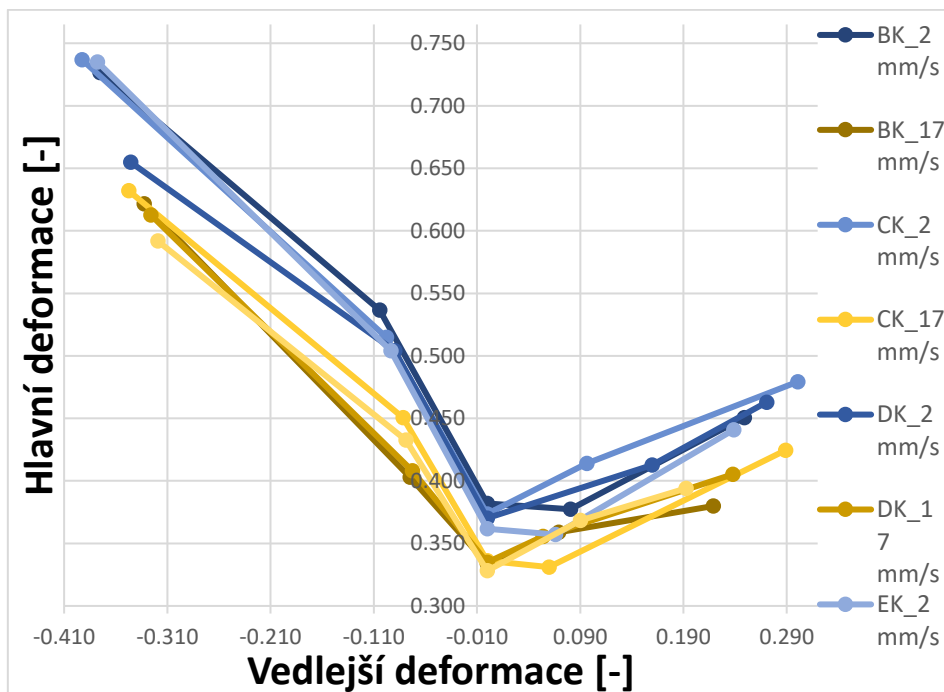
Na grafu 16, 17 a 18 je porovnání šarží B,C,D,E, u kterých byly vybrány křivky odpovídající rychlosti zatěžování 2mm/s a 17 mm/s. Křivky byly rozděleny podle polohy na svitku. I u těchto šarží bylo prokázáno, že s rostoucí rychlostí procesu se křivka posouvá směrem dolů, k menší zásobě plasticity. Dále jsou v grafu patrné rozptýlené hodnoty, které je třeba

dále analyzovat, případně rozšířit rozsah zkoušení, tento problém je patrný v pravé části diagramu.



Graf 17: Srovnání křivek FLC různých šarží při rychlostech 2 a 17 mm/s z polohy středu svitku

Křivky na grafu č. 17 ve střední části svitku se překrývají méně, než u vzorků pořízených na začátku svitku. Opět dochází k rozdělení křivek dle rychlosti zatěžování.

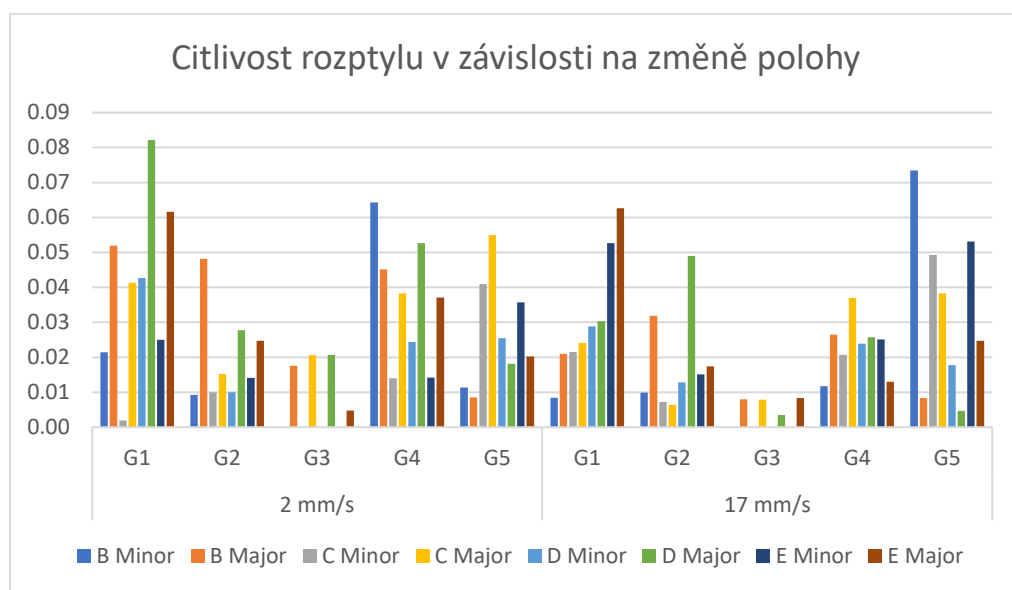


Graf 18: Srovnání křivek FLC různých šarží při rychlostech 2 a 17 mm/s z polohy konce svitku

Výsledkem jsou dvě oblasti bezpečného tváření pro různé rychlosti zatěžování. Rychlost deformace souvisí s rychlostí zatěžování, avšak nejedná se o jediný faktor, se kterým můžeme

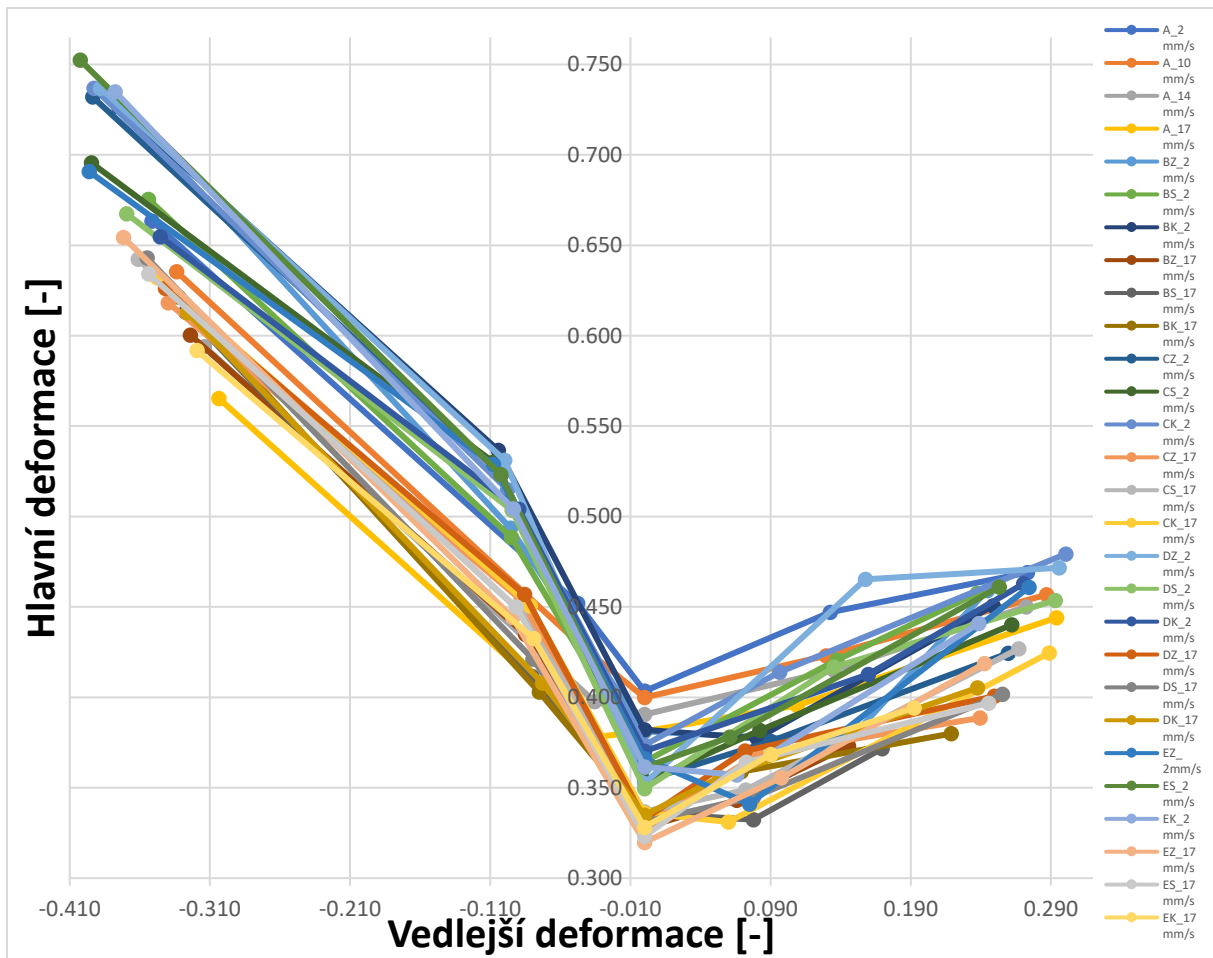
jeho návaznost spojit. Jedná se například o způsob deformace, geometrii lisovací formy a další. Proto v našem případě vytváříme návaznost pro rychlost měřicího stroje.

Pro porovnání citlivosti na změnu polohy ve svitku byl vytvořen graf č. 19, který ukazuje maximální rozdíly v zaznamenaných hodnotách. Čím větší je interval zaznamenaných hodnot, tím víc je materiál náchylný ke změně poměru hlavních a vedlejších deformací v závislosti na změně polohy ve svitku. Z následujícího grafu vidíme, že většina šarží následovala stejný trend pro různé geometrie. Je ale vidět, že například u geometrie 1. je nejvíce náchylná na rozptyl hodnot šarže E, která vykazuje větší rozptyl i u geometrií 2. a 4..Poměrně široký rozptyl hodnot vykazuje i šarže B u geometrií 1., 4., a 5..



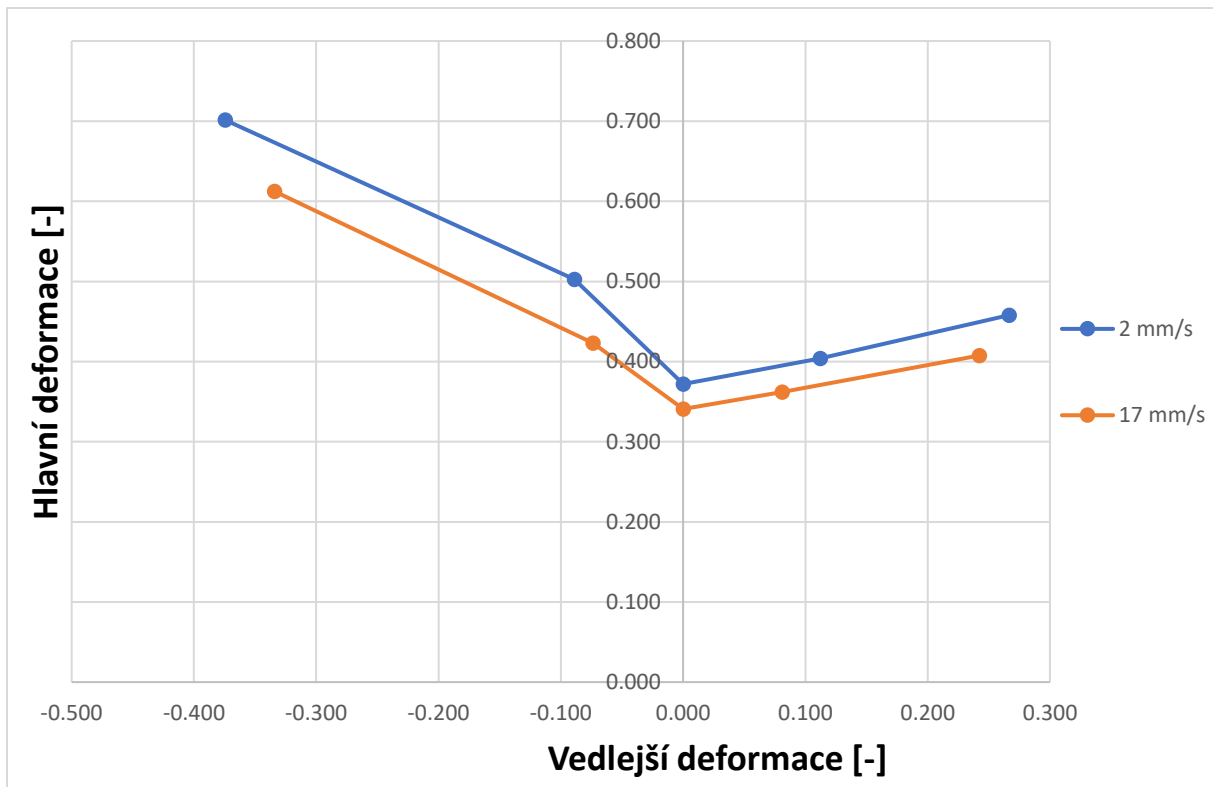
Graf 19: Citlivost rozptylu při změně polohy

Pro potřeby experimentu bylo vytvořeno značné množství FLC, které jsou pro názornost vloženy do jednoho grafu. V praxi je však nereálné aplikovat jednotlivé FLC pro zrovna dodaný materiál, a tak byl ze všech FLC vytvořen průměr pro zatěžování rychlostí 2mm/s a 17 mm/s.



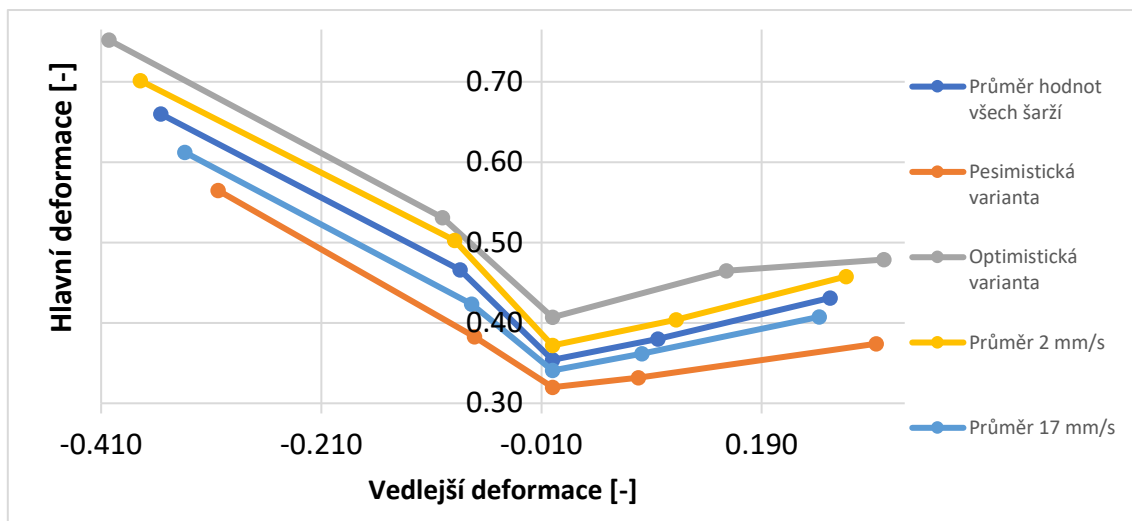
Graf 20: Souhrn všech naměřených FLC křivek

Je vidět, že graf č. (20) je méně přehledný, avšak i zde vidíme, že křivky modrých odstínů jsou položeny nad křivkami žlutých odstínů. Orientačně z něj ale vidíme množství FLC křivek, které byly naměřeny, a rozptyl všech naměřených hodnot. Křivky tak vytváří dvě určité oblasti pro každou rychlost, ve kterých dochází k proměnlivosti v závislosti na různých šaržích. Pro lepší přehled si můžeme prohlédnout již zmíněný průměr pro nejvyšší a nejnižší rychlost.



Graf 21: Průměr FLC pro rychlosti 2 a 17 mm/s

Tyto křivky průměrují všechny šarže i polohy na svitku. Jedná se tak o univerzální křivky použitelné pro dosažení stabilního tvářecího procesu. Podstatou experimentu je získání nejhorších možných mechanických vlastností materiálu pro zajištění stabilního tvářecího procesu. Z tohoto důvodu byly diskutovány různé varianty popisu materiálových vlastností, které jsou označovány jako pesimistická, průměrná, optimistická apod. Získáním „pesimistické“ varianty FLC bude dosaženo limitu, za kterým už hrozí destrukce materiálu. Proto jeho použití bude znamenat bezpečnou variantu v simulačním odvětví, neboť v případě kladného výsledku simulace budou všechny hodnoty mechanických vlastností materiálu přesahovat nároky na výrobu. Dosadíme-li do grafu č. 21 křivky reprezentující průměr všech šarží, pesimistickou variantu sestávající z nejhorších získaných hodnot a optimistickou variantu reprezentující nejlepší dosažitelné možnosti materiálu, získáme graf č. 22.



Graf 22: Závěrečná křivka mezních deformací pro hlavní zjištěné parametry

3.4 Chemické složení

Pro potřeby experimentu bylo také změřeno chemické složení materiálu jednotlivých šarží. Pomocí spektrální analýzy jsme jednotlivé vzorky nejdříve zbavili povrchové úpravy zinku mořením v 10 % roztoku kyseliny chlorovodíkové, jak je na obr. 34.



Obrázek 34: Odstranění povrchové úpravy vzorků

Po odstranění povrchové vrstvy jsme pomocí přístroje Delta Professional změřili chemické složení materiálu přiložením přístroje ke vzorku a následování instrukcí dle protokolu měření.



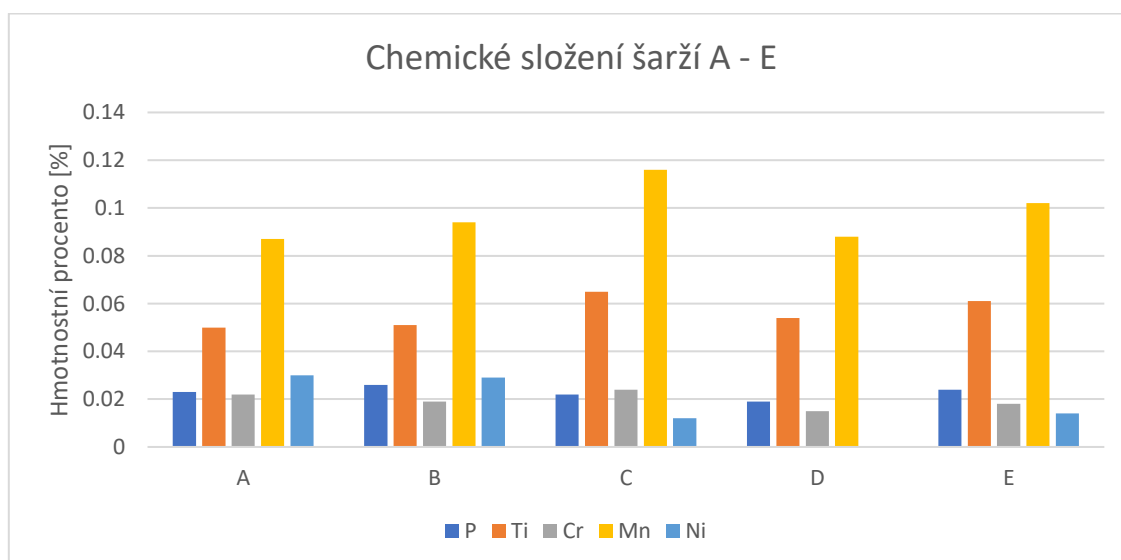
Obrázek 35: Průběh měření chemického složení

Pro zvýšení přesnosti měření byly jednotlivé vzorky měřeny vícekrát. Měření vzorku je ukázáno na obr. 35. Výsledky měření chemického složení si můžeme prohlédnout v tabulce č. 11 níže.

Tabulka 11: Naměřená data chemického složení šarží materiálu CR5

Šarže		P	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
A	Složení	0,023	0,050	0,022	0,087	99,777	0,030
	chyba	0,003	0,008	0,003	0,006	0,012	0,004
B	Složení	0,026	0,051	0,019	0,094	99,740	0,029
	chyba	0,003	0,008	0,003	0,006	0,013	0,004
C	Složení	0,022	0,065	0,024	0,116	99,677	0,012
	chyba	0,003	0,009	0,003	0,006	0,013	0,003
D	Složení	0,019	0,054	0,015	0,088	99,733	0,000
	chyba	0,003	0,008	0,003	0,006	0,013	0,000
E	Složení	0,024	0,061	0,018	0,102	99,704	0,014
	chyba	0,003	0,009	0,003	0,006	0,013	0,003

Z naměřených dat byl vytvořen graf č. 23, který lépe názorně ukazuje poměry jednotlivých prvků.



Graf 23: Grafické znázornění chemického složení šarží materiálu CR5

V grafu č. 23 vidíme, že se v šaržích objevují přibližně podobné poměry legujících prvků. U šarže D je vidět absence niklu, avšak pro vyvození důsledků by bylo zapotřebí provést důkladnější měření, jelikož pro účely tohoto experimentu bylo měření chemického složení čistě orientační.

4 Závěrečné zhodnocení

V teoretické části práce jsem se zabýval problematikou související s prováděnou experimentální částí. Jsou zde vysvětleny základní pojmy a definice pro tváření materiálu a způsoby dosažení deformace. Dále jsem popsal proměnné, které budou v rámci práce analyzovány, a které mohou mít vliv na chování materiálu při deformaci. Také byly popsány techniky měření a způsoby sběru dat v průběhu měření, zejména pak 3D korelaci a bezdotykové snímání bodů. Popsal jsem různé materiálové modely a jejich vlastnosti a přednosti, dále pak jsou popsány principy zkoušky tahem a zkoušky dle Nakajimy.

V praktické části jsem se věnoval samotnému provedení experimentu. Popsal jsem přípravu experimentu sestávající ze způsobů přípravy vzorků, jejich zbavení nečistot a mastnoty a přípravy měřicí techniky včetně kalibrace systému ARAMIS. Bylo zapotřebí se vypořádat s problematikou čitelností patternu systému pro analýzu deformace, kdy docházelo k častým problémům s destrukcí nátěru, nevhodným poměrem jednotlivých barev, odlupování nátěru a dalších problémů. Dále pak s problematikou tribologického systému, který vykazoval vhodné chování při zkouškách nižších rychlostí, avšak u vyšších docházelo ke zhoršení čitelnosti měrné sítě, která mohla být ovlivněna jiným způsobem vytlačování maziva či výrazným zvýšením teploty v průběhu experimentu. Cílem experimentu bylo porovnání jednotlivých šarží materiálu CR5 z hlediska mechanických vlastností. Pro tyto potřeby bylo navrženo několik parametrů, které měly ukázat na rozptyl v hodnotách mechanických vlastností napříč šaržemi.

U zkoušky tahem bylo celkem provedeno 536 zkoušek tahem při různých rychlostech, orientace vůči směru válcování, poloze a rychlosti zatěžování. V praktické části jsem ukázal vyhodnocení jedné šarže materiálu a následně porovnání výsledků jednotlivých šarží. Pro detailní popis chování byla vybrána šarže A s ohledem na největší rozsah provedených zkoušek. U zkoušky tahem byl vytvořen soubor dat obsahující rozřazení dle jednotlivých šarží a dalších parametrů. Dále bylo provedeno porovnání mezi jednotlivými šaržemi a parametry. Byla vytvořena kontingenční tabulka obsahující záznamy všech zkoušek umožňující rychlé filtrování dle zadaných parametrů. Získáním jednotlivých hodnot ze zkoušky tahem byly získány vstupní data do materiálové karty pro křivky zpevnění a materiálový model plasticity.

U zkoušky dle Nakajimy bylo celkem provedeno 540 měření pro všechny analyzované šarže materiálu. Obdobně jako u zkoušky tahem byla nejdříve vyhodnocena jedna modelová šarže a následně byly jednotlivé šarže porovnány mezi sebou. Následovalo vyhodnocení

vlastností a hodnot mezi šaržemi. Tam jsme se zaměřili na rozdíly v hodnotách mezi různými polohami na svitku a rychlostech zatěžování.

Celkově se ukázalo, že největší vliv na změnu mechanických vlastností měla rychlost zatěžování. U zkoušky tahem docházelo v orientaci 0° ke zvýšení hodnot meze kluzu, průměrem o 73,97 MPa, meze pevnosti průměrem o 29,65 MPa a ke snížení tažnosti, průměrem o 8,51 %. V případě polohy ve svitku se ukázalo, že při orientaci 0° je na změnu hodnot meze kluzu nejvíce citlivá šarže C, naopak u meze pevnosti nejméně. U meze pevnosti byla na rozptyl nejnáchylnější šarže B. Rozptyl hodnot tažnosti byl u všech šarží podobný. Celkově byl rozptyl hodnot větší u rychlosti 600 mm/min, než u rychlosti 2 mm/min. Orientace válcování ve svitku měla hlavně vliv na součinitel plastické anizotropie, naopak pro exponent deformačního zpevnění neměla vliv žádný. V grafickém srovnání vidíme, že mechanické vlastnosti se při změně orientace mění minimálně, je však znatelný rozdíl v trendu klesajících hodnot, kdy orientace 0° dosahuje nejvyšších hodnot, orientace 45° nižších a 90° nejnižších.

U měření křivek mezní tvářítečnosti byly z naměřených dat vytvářeny jednotlivé FLC křivky, které byly následně porovnány. Vyhodnocení probíhalo na základě zvolených parametrů. V souladu s literaturou se ukázalo, že FLC křivky zaznamenané pro vyšší rychlosti vytvářeli menší oblast bezpečné deformace, než křivky zatěžované rychlostí nižší. Ukázalo se však, že některé křivky rychlostí 2 mm/s byly položeny na stejné úrovni či níže, než křivky pro rychlost zatěžování 17 mm/s, avšak pro rozdílné šarže. Dalším zkoumaným parametrem byl vliv polohy ve svitku. Ukázalo se, že většina šarží se až na výjimky chová v rámci tolerance a nedochází k výrazným odchylkám. Odchylku vykazovala šarže E, pro kterou hodnoty na začátku svitku padaly pod hodnoty ostatních šarží, a to i pro vyšší rychlost zatěžování.

Dalším pokračováním této práce bude ověření naměřených dat metodou měrných sítí, kdy dojde k nanesení mřížky leptáním na povrch přístřihu plechu. Dále dojde k lisovacímu procesu, který bude v různých okamžicích zastaven a pomocí metody ARGUS dojde k analýze deformací materiálu a porovnání se získanými daty. Dále bude postupně rozšířen obsah kontingenční tabulky, kdy budou nové šarže měřeny pro limitní rychlosti a v případě odchylek dojde k proměření šarže v celém rozsahu.

Seznam použité literatury

- [1] LENFELD, Petr. Technologie II: Tváření kovů [online]. In: . Technická univerzita Liberec [cit. 2023-06-25]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm
- [2] ŽÍDEK, M. Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena. 1. vydání. Praha: Aleko, 1995. 348 s. ISBN 80-85341-45-X.
- [3] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvařitelnost kovových materiálů [online]. 3 Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006, poslední aktualizace 9.1.2007
- [4] BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. Industrial Press Inc., 2004.
- [5] ČSN EN ISO 10275 (420436) Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem
- [6] LANG, Lihui, et al. Investigation into the forming of a complex cup locally constrained by a round die based on an innovative hydromechanical deep drawing method. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167.2-3: 191-200.
- [7] SEMIATIN, S. (ed.). *ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming*. ASM International, 2006. ISBN 978-0-87170-710-9.
- [8] TATÍČEK, František. Vliv materiálu na kvalitu výlisku. MM Průmyslové spektrum [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku>
- [9] ČSN ISO 10113 (420435) Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie
- [10] ANDERSSON, Alf. Evaluation and visualisation of surface defects on auto-body panels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209.2: 821-837.
- [11] DOUBEK, Pavel. Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace. Technická Univerzita v Liberci, 2006. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38810>
- [12] VALEŠ, Michal. Vliv deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu karosářských výlisků. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [13] RABAHALLAH, Meziane; BALAN, Tudor; BARLAT, Frédéric. Application of strain rate potentials with multiple linear transformations to the description of polycrystal plasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, 46.9: 1966-1974.
- [14] VERLEYSEN, Patricia, et al. Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211.8: 1457-1464.
- [15] DARIANI, B. M.; LIAGHAT, G. H.; GERDOOEI, M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223.6: 703-712.
- [16] VEGTER, Henk, Carel TEN HORN a Michael ABSPOEL. The corus-vegter lite material model: simplifying advanced material modelling. *International Journal of Material Forming* [online]. 2009, 2(1), 511-514 [cit. 2023-05-25]. ISSN 1960-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-009-0640-4
- [17] VEGTER, Henk, Carel TEN HORN a Michael ABSPOEL. The Corus-Vegter lite material model high accuracy with few parameters.
- [18] VEGTER, H. a A.H. VAN DEN BOOGAARD. A plane stress yield function for anisotropic sheet material by interpolation of biaxial stress states. *International Journal of Plasticity* [online]. 2006, 22(3), 557-580 [cit. 2023-07-26]. ISSN 07496419. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijplas.2005.04.009
- [19] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software [online]. In: . [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [20] Digital Image Correlation: Motion and Deformation Analysis [online]. GOM [cit. 2023-07-20]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/topics/digital-image-correlation>

- [21] GÓRSZCZYK, Jarosław, Konrad MALICKI a Teresa ZYCH. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials* [online]. 2019, 12(15) [cit. 2023-04-05]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12152349
- [22] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. In: *Correlated Solutions* [online]. s. 56 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [23] ORTEU Jean-José, Dorian GARCIA, Michel DEVY. Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images : applications en mécanique expérimentale. *Photoniques*, 2003, 10, pp.34-43. fihal-01832922f
- [24] ČSN EN ISO 6892-1. Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. 2010.
- [25] AN, Y. G.; VEGTER, H.; HEIJNE, J. Development of simple shear test for the measurement of work hardening. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209.9: 4248-4254.
- [26] DOURNAUX, J. L., et al. Full-field measurement technique and its application to the analysis of materials behaviour under plane strain mode. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 500.1-2: 47-62.
- [27] EN ISO 12004-2. Kovové materiály - Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy - Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři. 2021.
- [28] NOVÁK, V., M. VALEŠ, F. TATÍČEK, J. ŠANOVEC a L. CHRÁŠŤANSKÝ. The effect of strain rate on position of forming limit curve [online]. 2019, 450-454 [cit. 2023-05-11]. ISSN 2694-9296. Dostupné z: doi:10.37904/978-80-87294-92-5
- [29] BANABIC, D.; VOS, M. Modelling of the forming limit band—a new method to increase the robustness in the simulation of sheet metal forming processes. *CIRP annals*, 2007, 56.1: 249-252.
- [30] UTHAISANGSUK, V.; PRAHL, U.; BLECK, W. Stress based failure criterion for formability characterisation of metastable steels. *Computational Materials Science*, 2007, 39.1: 43-48.
- [31] CARLEER, B., et al. Analysis of the effect of material properties on the hydroforming process of tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 104.1-2: 158-166.
- [32] BANABIC, Dorel. Plastic Behaviour of Sheet Metal. In: BANABIC, Dorel. *Sheet Metal Forming Processes* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, s. 27-140 [cit. 2023-04-20]. ISBN 978-3-540-88112-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-88113-1_2
- [33] Product Information BUP 400 BUP 600 [online]. Zwick Roell [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/11_933_BUP_400_BUP_600_testControl_II_PI_EN.pdf
- [34] ARAMIS: User Information - Hardware. Braunschweig: GOM, 2018. Dostupné z: www.gom.com

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: MECHANISMY DEFORMACE	9
OBRÁZEK 2: ZPEVNĚNÍ MONOKRYSTALU	10
OBRÁZEK 3: VLIV "n" EXPONENTU DEFORMAČNÍHO ZPEVNĚNÍ NA POLOHU KŘIVEK MEZNÍ DEFORMACE	11
OBRÁZEK 4: POROVNÁNÍ MODELŮ PLASTICITY H.M.H A DLE TRESCY	14
OBRÁZEK 5: NÁZORNÉ SCHÉMA ZKOUŠEK PRO VYTVOŘENÍ MATERIÁLOVÉHO MODELU VEGTER	15
OBRÁZEK 6: TVORBA MODELU PLASTICITY ZE ZÍSKANÝCH PARAMETRŮ	15
OBRÁZEK 7: POROVNÁNÍ MATERIÁLOVÝCH MODELŮ MATERIÁLŮ	16
OBRÁZEK 8: SCHÉMA NÁROČNOSTI A PŘESNOSTI STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH MODELŮ	17
OBRÁZEK 9: POROVNÁNÍ MODELŮ PLASTICITY VEGTER A VEGTER-LITE	17
OBRÁZEK 10: KEELER-GOODWINŮM DIAGRAM	18
OBRÁZEK 11: VLIV ŠÍŘKY DŘÍKU NA POLOHU KŘIVKY MEZNÍCH DEFORMACÍ	19
OBRÁZEK 12: SLEDOVÁNÍ POHYBU BODU PŘI DEFORMACI	20
OBRÁZEK 13: TYPY SNÍMANÉHO POVRCHU	20
OBRÁZEK 14: ČÍSELNÉ VYJÁDŘENÍ ZMĚNY POLOHY BODU	21
OBRÁZEK 15: MOŽNOSTI INTERPOLACE ZÍSKANÝCH DAT	21
OBRÁZEK 16: SCHÉMA KORELAČNÍCH PROCESŮ PŘI 3D DIC	22
OBRÁZEK 17: MODELOVÝ DIAGRAM ZKOUŠKY TAHEM	22
OBRÁZEK 18: SCHÉMA ZKOUŠKY DLE NAKAJIMY	24
OBRÁZEK 19: POROVNÁNÍ DEFORMAČNÍ CESTY PŘI ZKOUŠCE DLE MARCINIAKA A DLE NAKAJIMY	25
OBRÁZEK 20: RŮZNÉ GEOMETRIE PRO ZKOUŠKU DLE NAKAJIMY	28
OBRÁZEK 21: POUŽITÉ SPREJE TVOŘÍCÍ SNÍMACÍ NÁTĚR	29
OBRÁZEK 22: POROVNÁNÍ NÁTĚRU SE ZÁKLADOVOU BARVOU (VLEVO) A BEZ ZÁKLADOVÉ BARVY (VPRAVO)	30
OBRÁZEK 23: POSTUP APLIKACE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ TRIBOLOGICKÉHO SYSTÉMU	31
OBRÁZEK 24: ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ BUP 600 VYBAVENÝ SYSTÉMEM ARAMIS	32
OBRÁZEK 25: OPTICKÝ SNÍMACÍ SYSTÉM ARAMIS	33
OBRÁZEK 26: KALIBRAČNÍ DESTIČKA	33
OBRÁZEK 27: PŘÍPRAVA VZORKU PRO MĚŘENÍ POMOCÍ 3D TISKNUTÉHO PŘÍPRAVKU	35
OBRÁZEK 28: POSTUP MĚŘENÍ VZORKU. ZLEVA: VLOŽENÍ DO STROJE, DOSEDNUTÍ PŘIDRŽOVAČE, PO PROVEDENÍ ZKOUŠKY	36
OBRÁZEK 29: MOŽNÉ VÝSLEDKY ZKOUŠKY	37
OBRÁZEK 30: VZORKY TVOŘÍCÍ JEDNU KŘIVKU MEZNÍCH DEFORMACÍ	37
OBRÁZEK 31: MOŽNOSTI FILTROVÁNÍ V KONTINGENČNÍ TABULCE	53
OBRÁZEK 32: VÝSLEDEK FILTROVÁNÍ DLE ZVOLENÝCH PARAMETRŮ	53
OBRÁZEK 33: ODSTRANĚNÍ POVRCHOVÉ ÚPRAVY VZORKŮ	62
OBRÁZEK 34: PRŮBĚH MĚŘENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ	62

Seznam tabulek

TABULKA 1: VLASTNOSTI ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ BUP600.....	32
TABULKA 2: CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLU CR5 DLE VW 50065: 2014-05	38
TABULKA 3: MECHANICKÉ VLASTNOSTI CR5 DLE VW 50065: 2014-05	38
TABULKA 4: NAMĚŘENÁ DATA ŠARŽE A, ORIENTACE 0.....	39
TABULKA 5: NAMĚŘENÁ DATA ŠARŽE A, ORIENTACE 45.....	40
TABULKA 6: NAMĚŘENÁ DATA ŠARŽE A, ORIENTACE 90.....	42
TABULKA 7: NAMĚŘENÁ DATA, ŠARŽE A, RYCHLOST 2 MM/S	54
TABULKA 8: NAMĚŘENÁ DATA, ŠARŽE A, RYCHLOST 10 MM/S	54
TABULKA 9: NAMĚŘENÁ DATA, ŠARŽE A, RYCHLOST 14 MM/S	54
TABULKA 10: NAMĚŘENÁ DATA, ŠARŽE A, RYCHLOST 17 MM/S	55
TABULKA 11: NAMĚŘENÁ DATA CHEMICKÉHO SLOŽENÍ ŠARŽÍ MATERIÁLU CR5	63

Seznam grafů

GRAF 1: DATA ŠARŽE A	43
GRAF 2: POMĚR MEZE KLUZU VŮČI MEZI PEVNOSTI ŠARŽE A, ORIENTACE 0	44
GRAF 3: HODNOTY EXPONENTU DEFORMAČNÍHO ZPEVNĚNÍ A SOUČINITELE PLOŠNÉ ANIZOTROPIE ŠARŽE A	45
GRAF 4: SROVNÁNÍ HODNOT ŠARŽE B PRO RŮZNÉ ORIENTACE VÁLCOVÁNÍ	46
GRAF 5: SROVNÁNÍ MEZE KLUZU VŠECH ŠARŽÍ PŘI RŮZNÝCH RYCHLOSTECH	47
GRAF 6: SROVNÁNÍ MEZE KLUZU VŠECH ŠARŽÍ PŘI RŮZNÝCH RYCHLOSTECH	48
GRAF 7: SROVNÁNÍ TAŽNOSTÍ VŠECH ŠARŽÍ PRO RŮZNÉ RYCHLOSTI ZATĚŽOVÁNÍ	48
GRAF 8: ZÁVISLOST POKLESU TAŽNOSTI NA RYCHLOST ZATĚŽOVÁNÍ	49
GRAF 9: ZMĚNA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V ZÁVISLOSTI NA POLOZE VE SVITKU	50
GRAF 10: CITLIVOST ŠARŽÍ NA ROZPTYL HODNOT, ORIENTACE 0	50
GRAF 11: CELKOVÉ SHRNUÍ VŠECH NAMĚŘENÝCH HODNOT	51
GRAF 12: CHOVÁNÍ "n" EXPONENTU DEFORMAČNÍHO ZPEVNĚNÍ A "r" SOUČINITELE PLASTICKÉ ANIZOTROPIE U RŮZNÝCH ŠARŽÍ A POLOH VE SVITKU	51
GRAF 13: FLC KŘIVKY PRO ŠARŽI A	56
GRAF 14: VLIV POLOHY VE SVITKU NA KŘIVKY FLC ŠARŽE B	57
GRAF 15: SROVNÁNÍ KŘIVEK FLC RŮZNÝCH ŠARŽÍ PŘI RYCHLOSTECH 2 A 17 MM/S Z POLOHY ZAČÁTKU SVITKU	57
GRAF 16: SROVNÁNÍ KŘIVEK FLC RŮZNÝCH ŠARŽÍ PŘI RYCHLOSTECH 2 A 17 MM/S Z POLOHY STŘEDU SVITKU	58
GRAF 17: SROVNÁNÍ KŘIVEK FLC RŮZNÝCH ŠARŽÍ PŘI RYCHLOSTECH 2 A 17 MM/S Z POLOHY KONCE SVITKU	58
GRAF 18: SOUHRN VŠECH NAMĚŘENÝCH FLC KŘIVEK	60
GRAF 19: PRŮMĚR FLC PRO RYCHLOSTI 2 A 17 MM/S	61
GRAF 20: ZÁVĚREČNÁ KŘIVKA MEZNÍCH DEFORMACÍ PRO HLAVNÍ ZJIŠTĚNÉ PARAMETRY	62
GRAF 21: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ ŠARŽÍ MATERIÁLU CR5	63