

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2022**

**ONDŘEJ  
VĚTROVEC**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Větrovec      Jméno: Ondřej      Osobní číslo: 495475  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávací katedra/ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství  
Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza chování materiálů DX56 při zkoušce tahem při různých rychlostech deformace

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of the behaviour of DX56 materials in tensile testing at different strain rates

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámení s problematikou zkoušení materiálu
- 2) Návrh podmínek pro realizaci experimentů
- 3) Vyhodnocení změny mechanických vlastností při různých rychlostech deformace
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN ISO 8892-1  
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) bakalářské práce:

Ing. Jan Havelka      ústav strojírenské technologie      FS

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

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

Datum zadání bakalářské práce: 21.04.2022      Termín odevzdání bakalářské práce: 15.08.2022

Platnost zadání bakalářské práce: 31.12.2022

Ing. Jan Havelka  
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

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

podpis

## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Janu Havelkovi za jeho odborné vedení a připomínky při zpracovávání.

Dále bych chtěl poděkovat doktoru Tatíčkoví a inženýru Novákovi za asistenci s realizací experimentu a odborné konzultace.

Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

<b>Autor:</b>	Ondřej Větrovec
<b>Název bakalářské práce:</b>	Analýza chování materiálů DX56 při zkoušce tahem při různých rychlostech deformace
<b>Rozsah práce:</b>	50 stran, 33 obrázků, 14 tabulek
<b>Rok vyhotovení:</b>	2022
<b>Universita:</b>	České vysoké učení technické v Praze – fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Jan Havelka
<b>Konzultant bakalářské práce:</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.
<b>Klíčová slova:</b>	Tvářitelnost, křivky zpevnění, zkouška tahem, rychlost deformace, digitální korelace obrazu, systém ARAMIS

**Anotace:**

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem rychlosti deformace na mechanické vlastnosti pro materiál z hlubokotažné oceli CR4. V teoretické části této práce bylo provedeno seznámení s procesem tváření. Dále byl popsán průběh zkoušky tahem a naměřené hodnoty. Zmíněn byl také optický systém ARAMIS, kterým byla zkouška tahem snímána.

V Experimentální části byla popsána kalibrace systému ARAMIS a jeho propojení s universálním trhacím zařízením. Další část byla zaměřena na přípravu zkušebních vzorků. Nakonec byla provedena zkouška tahem, která byla následně vyhodnocena. Experimentálně získaná data slouží k vytvoření materiálového modelu pro numerické simulace výroby tenkých plechových dílů ve ŠKODA AUTO a.s.

<b>Author:</b>	Ondřej Větrovec
<b>Title of bachelor thesis:</b>	Analysis of the behaviour of DX56 materials in tensile testing at different strain rates
<b>Extent:</b>	50 pages, 33 figures, 14 tables
<b>Academic year:</b>	2022
<b>University:</b>	Czech Technical University in Prague – Faculty of mechanical engineering
<b>Department:</b>	Department of Manufacturing Technology
<b>Supervisor:</b>	Ing. Jan Havelka
<b>Consultant:</b>	Ing. František Tatiček, Ph.D.
<b>Key words:</b>	Formability, hardening curves, tensile test, strain rate, digital image correlation, ARAMIS system

**Annotation:**

This bachelor's thesis deals with the effect of the strain rate on the mechanical properties of a deep-drawn CR4 steel material. In the theoretical part of this thesis, an introduction to the forming process was made. Furthermore, the tensile test process and measured values were described. The ARAMIS optical system used to perform the tensile test was also mentioned.

In the experimental part, the calibration of the ARAMIS system and its connection to the universal tearing device were described. The next part focused on the preparation of the test specimens. Finally, the tensile test was performed and subsequently evaluated. The experimentally obtained data are used to create a material model for numerical simulations of the production of thin sheet metal parts at ŠKODA AUTO a.s.

# Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	- 1 -
1 Úvod.....	- 3 -
2 Tvářitelnost .....	- 4 -
Ukazatele tvářitelnosti: .....	- 5 -
2.1 Tváření za tepla.....	- 5 -
2.2 Tváření za studena .....	- 5 -
2.3 Tváření za poloohřevu .....	- 6 -
2.4 Objemové tváření.....	- 6 -
2.5 Plošné tváření.....	- 6 -
2.5.1 Hluboké tažení.....	- 7 -
2.5.2 Stříhání .....	- 7 -
2.5.3 Ohýbání .....	- 8 -
2.6 Deformace v materiálu.....	- 9 -
3 Zkouška tahem .....	- 9 -
3.1 Princip zkoušky tahem.....	- 10 -
3.2 Zkušební těleso .....	- 11 -
3.3 Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu .....	- 11 -
3.4 Zásoba plasticity (ZP).....	- 12 -
3.5 Exponent deformačního zpevnění (n).....	- 12 -
3.6 Součinitel plastické anizotropie (r), vážený průměr součinitele plastické anizotropie (r).....	- 13 -
4 Optické systémy pro měření přetvoření plechu .....	- 14 -
4.1 DIC (Digital image correlation).....	- 14 -
4.1.1 Princip dvourozměrné korelace (2D) .....	- 14 -
4.1.2 Princip třírozměrné korelace (3D).....	- 16 -
4.2 Systém ARAMIS .....	- 17 -
5 Hlubokotažné oceli .....	- 18 -

6	Příprava měření.....	- 19 -
6.1	Kalibrace kamer ARAMIS .....	- 20 -
6.2	Propojení systémů ARAMIS a trhacího zařízení.....	- 23 -
7	Příprava zkušební vzorku.....	- 24 -
7.1	Odmaštění vzorku před barevným nástřikem .....	- 25 -
7.1.1	Nečistoty na povrchu.....	- 25 -
7.1.2	Postup odmaštění.....	- 26 -
7.2	Barevný nástřik (pattern) .....	- 27 -
8	Nastavení snímání a zkušební vzorku.....	- 29 -
9	Výsledky a vyhodnocení zkoušky tahem.....	- 31 -
9.1.1	Výsledky pro úhel válcování 0° .....	- 32 -
9.1.2	Výsledky pro úhel válcování 45° .....	- 35 -
9.1.3	Výsledky pro úhel válcování 90° .....	- 38 -
9.1.4	Výsledné porovnání orientace válcování .....	- 41 -
9.2	Vyhodnocení.....	- 42 -
10	Závěr.....	- 43 -
	Seznam použité literatury .....	- 45 -
	Seznam obrázků.....	- 48 -
	Seznam grafů .....	- 49 -
	Seznam tabulek.....	- 49 -
	Seznam použitých programů .....	- 50 -
	Seznam příloh.....	- 50 -



## Seznam zkratk a symbolů

<b>Značka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Veličina</b>
CCD		Charge-coupled device
DIC		Digital image correlation
LED		Light-Emitting Diode
SSD		sum of squared differences
$A$	[%]	tažnost
$A_g$	[%]	plastické prodloužení při max. zatížení
$A_{gt}$	[%]	celkové prodloužení při max. zatížení
$A_H$	[%]	homogenní (rovnoměrná) tažnost
$A_p$	[J]	práce na vyčerpání zásoby plasticity
$A_t$	[%]	celková tažnost
$c$	[s <sup>-1</sup> ]	rychlost deformace
$d_o$	[mm]	průměr zkoušené délky tyče kruhového průřezu
$e$	[%]	prodloužení měřené průtahoměrem
$E$	[MPa]	modul pružnosti v tahu
$F$	[N]	zatěžující síla
$IT$	[-]	index tváritelnosti
$k$	[-]	stupeň tažení
$L_0$	[mm]	původní délka vzorku
$L_o$	[mm]	počáteční měřná délka
$L_u$	[mm]	koněčná měřená délka tyče

$m_E$	[-]	směrnice pružné části závislosti napětí-prodloužení
$n$	[-]	exponent deformačního zpevnění
$n_m$	[-]	střední hodnota tvářítečnosti
$r$	[-]	normálová anizotropie
$R$	[Mpa]	napětí
$r_0, r_{45}, r_{90}$	[-]	hodnoty normálových anizotropií v různých směrech
$R_e$	[Mpa]	mez kluzu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti
$r_m$	[MPa]	vážený součinitel normálové anizotropie
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
$\bar{r}$	[-]	střední hodnota normálové anizotropie
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha průřezu vzorku
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky
$S_u$	[mm <sup>2</sup> ]	nejmenší plocha příčného průřezu po lomu
$t$	[s]	čas
$Z$	[%]	kontrakce
$ZP$	$\left[\frac{N \cdot mm}{mm^3}\right]$	zásoba plasticity
$\Delta L$	[mm]	prodloužení vzorku
$\Delta r$	[-]	stupeň plošné anizotropie
$\varepsilon$	[-]	poměrné prodloužení
$\sigma$	[MPa]	tahové napětí
$\phi$	[-]	deformace

# 1 Úvod

V dnešní době je kladen čím dál větší důraz na rychlost a efektivitu výroby v automobilovém průmyslu. Z tohoto důvodu je snaha o co největší využitelnost vlastností materiálů, což může pomoci například ke snížení celkové hmotnosti vozu a tím snížení vyprodukovaných emisí. Kvůli tomu je potřeba zjistit mechanické vlastnosti použitého materiálu před jeho technologickým zpracováním.

Z hlediska tváření materiálů jsou mechanické vlastnosti klíčové. Zjištění těchto mechanických vlastností můžeme realizovat běžnou zkouškou tahem, která probíhá obvykle při rychlosti zatěžování 2 mm/min. Takto nízká rychlost se bude značně lišit od rychlostí při běžných operacích plošného tváření. Proto je tato práce zaměřena na zkoušku tahem při vyšších rychlostech zatěžování, aby se podmínky experimentu co nejvíce přiblížili reálnému tváření a tím dopomohly zpřesnit numerické simulace.

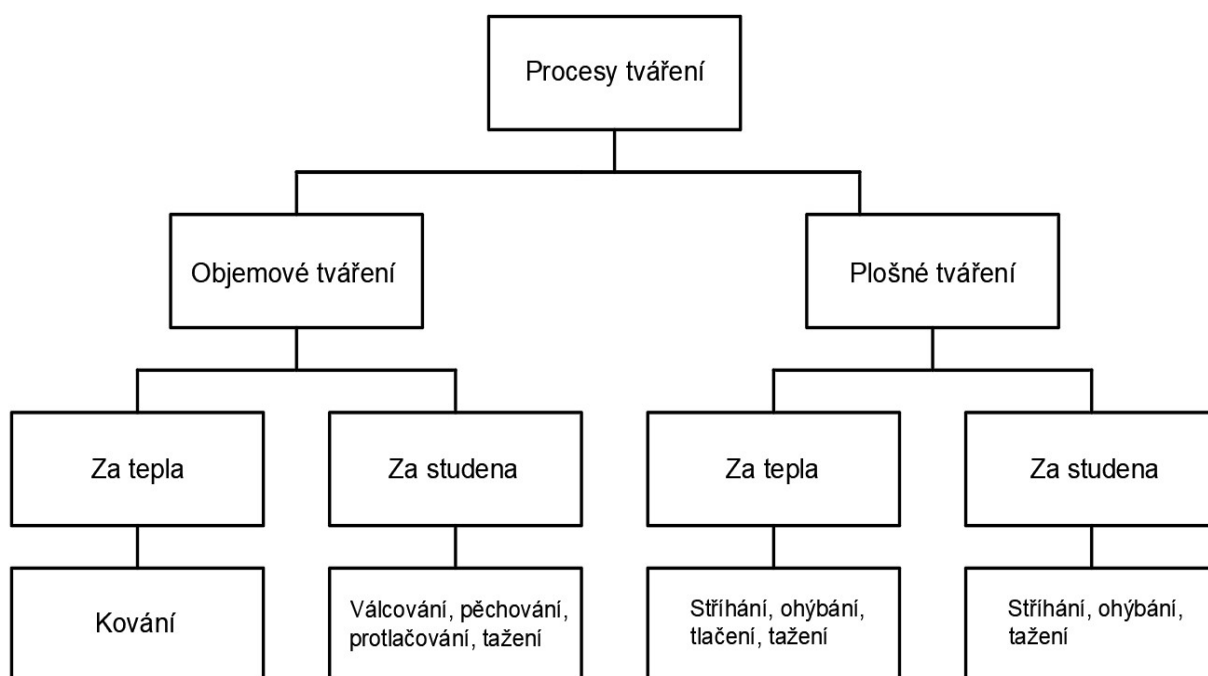
Teoretická část této práce je zaměřena na seznámení se s tvářecími procesy, jejich rozdělením a způsobem vyhodnocení. Následuje popsání zkoušky tahem, pomocí které je možné zjistit mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu. Tato práce se konkrétně zabývá vlivem rychlosti deformace na mechanické vlastnosti oceli CR4. Při zjišťování těchto vlastností je možné využít optický systém ARAMIS fungující na principu digitální korelace obrazu.

Experimentální část bude zaměřena na kalibraci systému ARAMIS a jeho propojení s trhacím zařízením. Dále bude zkoumán nejlepší možný způsob přípravy zkušebního vzorku, který zahrnuje správné odmaštění a izotropní barevný nástřík. Naměřené hodnoty budou získávány jak z trhacího zařízení (software Test&Motion), tak ze systému ARAMIS. Tyto hodnoty budou mezi sebou porovnány.

Cílem této práce je změřit zkoušku tahem souběžně 2 systémy (ARAMIS a Test&Motion). Zvyšováním rychlosti zatěžování se přiblížit reálným tvářecím rychlostem. Vyhodnotit dílčí mechanické vlastnosti ( $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A_g$ ,  $A_{gt}$ ,  $n$ ,  $r$ ) pro rychlosti zatěžování 10, 50, 100, 200, 500, 600 mm/min. Výsledky této práce budou poskytnuty společnosti ŠKODA AUTO pro zpřesnění materiálové karty.

## 2 Tvářitelnost

Tváření je proces, v jehož důsledku dochází k trvalému přetvoření materiálu či polotovaru. Za účelem vzniku tohoto přetvoření je potřeba vyvolat v materiálu dostatečné napětí bez makroskopického porušení materiálu. Tato technologie se využívá k dosažení vysoké kvality výrobků a ke snížení nákladů na výrobu. Tvářecí proces je velmi ovlivněn teplotou, dle které se dělí na tváření za tepla, za studena a za poloohřevu. Dále se rozděluje podle působení vnějších sil na plošné a objemové tváření. Rozdělení tváření je uvedeno na obrázku 1. Hlavními výhodami tváření jsou vysoká produktivita, využitelnost materiálu a rozměrová přesnost vzniklých výrobků. Mezi nevýhody patří především vysoká cena strojů a nástrojů. [1; 2]



Obrázek 1 - Rozdělení tvářecích procesů [3]

K vyhodnocení tvářitelnosti materiálu, byla vyvinuta celá řada zkoušek, které mají zkoumat nebo napodobovat možné stavy materiálů, předcházet vadám a zpřesnit výrobu. Základními mechanickými zkouškami jsou: zkouška tlakem, tahem, krutem a rázem v ohybu. Podobné technologické zkoušky jsou např. zkouška rozšiřování otvoru podle Siebela a Pompa, zkouška hloubením podle Erichsena a zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška). [2]

### Ukazatele tvářitelnosti:

- a) Technologické podmínky pro zpracování: tvar a drsnost pracovních nástrojů
- b) Metalurgicko-fyzikální charakter: strukturní stav, chemické složení, tepelné aktivované děje
- c) Termomechaničtí činitelé: deformační rychlosti, velikost deformace, teplota tváření
- d) Napěťový stav: stav napjatosti, tření, přídavná napětí

## 2.1 Tváření za tepla

Tváření za tepla probíhá nad teplotou rekrystalizace (nad hodnotou 70% teploty tání tvářeného materiálu). Nedochází ke zpevňování materiálu, kvůli vysoké teplotě tváření. Pro tváření za tepla stačí až mnohonásobně menší tvářecí síly, než je potřeba pro tváření za studena. Vlivem vzniku okují je povrch výrobku nekvalitní. [3]

Výhody:

- nízké přetvárné odpory
- menší opotřebení nástrojů
- větší tažnost a houževnatost

Nevýhody:

- horší kvalita povrchu (z důvodu vzniku okují)
- spotřebovaná energie na ohřev materiálu
- menší rozměrová a tvarová přesnost

## 2.2 Tváření za studena

Teploty u tváření za studena se pohybují pod teplotou rekrystalizace (pod hodnotou 30 % teploty tání tvářeného materiálu). Vlivem nerovnoměrné deformace v kluzových rovinách dochází ke zpevňování materiálu. Zpevněním materiálu klesá tažnost, ale zvyšují se mechanické vlastnosti jako je mez kluzu a mez pevnosti. [3]

Výhody:

- kvalitní povrch
- vysoká přesnost rozměrů
- vyšší tvrdost, mez pevnosti a kluzu.

Nevýhody:

- menší vrubová houževnatost, tvárnost
- velké tvářecí síly
- omezená tvárnost, nerovnoměrné zpevnění

### **2.3 Tváření za poloohřevu**

Důvodem tváření za poloohřevu je kompromis mezi tvářením za tepla a za studena. Základem je zahřát materiál na takovou teplotu, kdy dochází ke snížení přetvárných odporů. Horní teplota tváření se pohybuje pod teplotou rekrytalizace, kde dochází k pohybu dislokací. [3]

### **2.4 Objemové tváření**

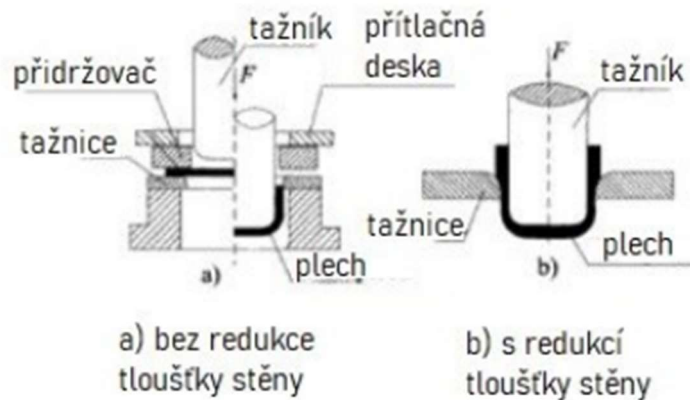
Je definováno jakožto proces deformace, při němž se dosahuje změny tvaru v celém objemu polotovaru. Jako polotovar se nejčastěji používají ingoty, kaloty, bramy, tyče. Objemové tváření lze dále rozdělit na kování, válcování, protlačování a tažení. [4]

### **2.5 Plošné tváření**

Plošným tvářením se mění tvar součásti, bez podstatné změny tloušťky nebo průřezu polotovaru, přičemž mechanické vlastnosti zůstávají zachovány. Mezi polotovar se řadí pásy a plechy. Rozdělení plošného tváření: tažení, stříhání, ohýbání. [4]

## 2.5.1 Hluboké tažení

Hluboké tažení je proces tváření plechu. Spočívá ve výrobě dutého nerozvinutého tělesa – výtažku, a to v důsledku silového působení tažníku na přístřih plechu, který je vypínán do prostoru tažnice. K vyrobění hlubokých výtažků je zapotřebí více tvářecích operací. Pro mělké výtažky stačí pouze jedna operace. Touto technologií je možné vyrábět díly s vysokou pevností a nízkou hmotností. Jedním ze způsobů hlubokého tažení je bez redukce tloušťky stěny. Další možností je s redukcí tloušťky výrobku (obvykle je rozdíl mezi tloušťkou dna a stěnou výtažku). [5; 6]



Obrázek 2 - Popis hlubokého tažení plechů [7]

## 2.5.2 Stříhání

Stříhání je jednou z nejrozšířenějších tvářecích operací v oblasti strojírenství. Při stříhání je materiál oddělován protilehlými nástroji (střížníkem a střížnicí nebo noži). Využívá se ať už jako dokončovací operace, tak pomocná operace před dalším technologickém zpracování. Také k přípravě polotovarů, stříhání profilů nebo k rozdělení plechů. Základní střížné operace dle způsobu odstranění materiálu jsou vystřihování, přistřihování, ostřihování, prosekávání, děrování atd. [3; 8]

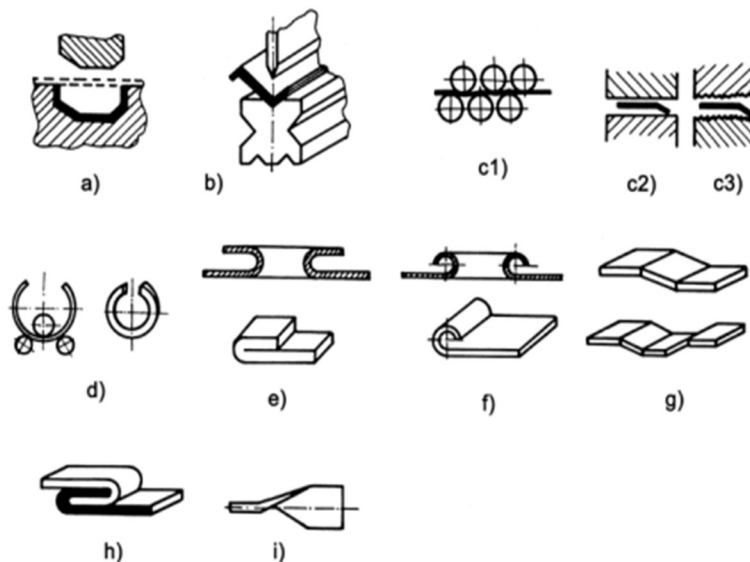
Rozdělení stříhání:

- Podle teploty
  - stříhání za studena – pro plechy nebo měkké oceli (max. pevnost 400 MPa)
  - stříhání za tepla – ohřev na teplotu cca 700 °C, pro tvrdé materiály nebo materiály s větší tloušťkou
- Podle konstrukce nožů
  - rovnoběžné nože
  - kotoučové nože
  - skloněné nože
  - nože na tyče a profily

### 2.5.3 Ohýbání

Procesem ohýbání dochází k trvalému přetvoření polotovaru, vlivem působením momentu od ohybových sil (nastává pružně-plastická deformace). Nejvíce využívané je ohýbání za studena. Ohýbání za tepla se zvláště používá pro materiály s velkým průřezem a velkým odporovým momentem, tvrdé a křehké materiály. Ohybem nedochází ke značné změně průřezu materiálu. Polotovarem jsou plechy, tyče nebo dráty. [9; 10]

V důsledku operace ohýbání dochází v materiálu ke springbacku (odpružení), což je dáno rozdílem napětí na stranách ohýbaného profilu. Na vnější straně ohybového rádiusu působí tah a na vnitřní tlak. Okolo neutrální osy vzniká oblast, kde je působící napětí nižší než mez kluzu. V této oblasti se materiál zdeformuje jen elasticky a po uvolnění napětí se deformace uvolní, což způsobí tvarovou nepřesnost. V automobilovém průmyslu je to velmi důležitý parametr z hlediska spasování jednotlivých dílů. [10]



Obrázek 3 - Rozdělení ohýbání [9]

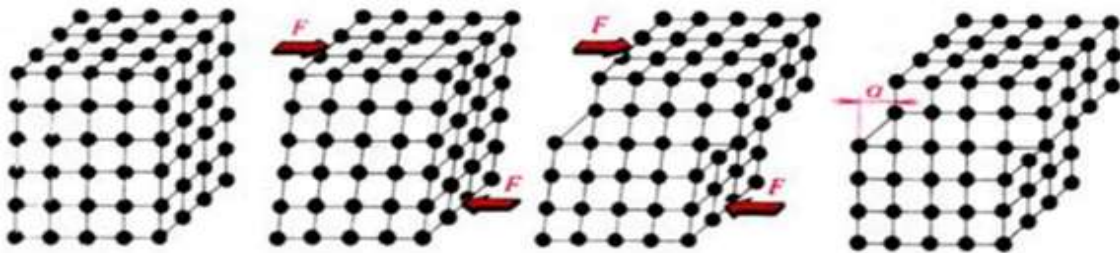
a) prosté ohýbání, b) ohraničování, c1) rovnání mezi rovnacími válci, c2) rovnání mezi rovnými čelistmi, c3) rovnání mezi rýhovanými čelistmi, d) zakružování, e) lemování, f) obrubování, g) osazování, h) drápkování, i) zkrucování



## 2.6 Deformace v materiálu

Deformace se projevuje změnou tvaru materiálu bez vzniku trhlin. Lze ji rozdělit na elastickou a plastickou. Pokud se po odstranění zatížení vrátí těleso do původního tvaru, jedná se o elastickou deformaci. U plastické deformace dochází k trvalému posunu atomů z rovnovážných poloh, ve kterých zůstávají i po ukončení účinků deformace. Je k tomu potřeba překročit hodnotu kritického smykového napětí. Plastická deformace se realizuje pohybem dislokací. K tomu dochází ve skluzových rovinách, které jsou nejhustěji obsazeny atomy.

V důsledku tváření dochází k pohybu dislokací a ty se kumulují po hranicích zrn, čímž dochází k nárůstu napětí, které brání jejich dalšímu pohybu. S rostoucím napětím pak dojde k vyčerpání plasticity a porušení materiálu. Dalším zvýšením zatěžovací síly, by mohlo dojít k překročení meze pevnosti a vzniku trhlin, které snižují kvalitu výrobku. [1; 3]

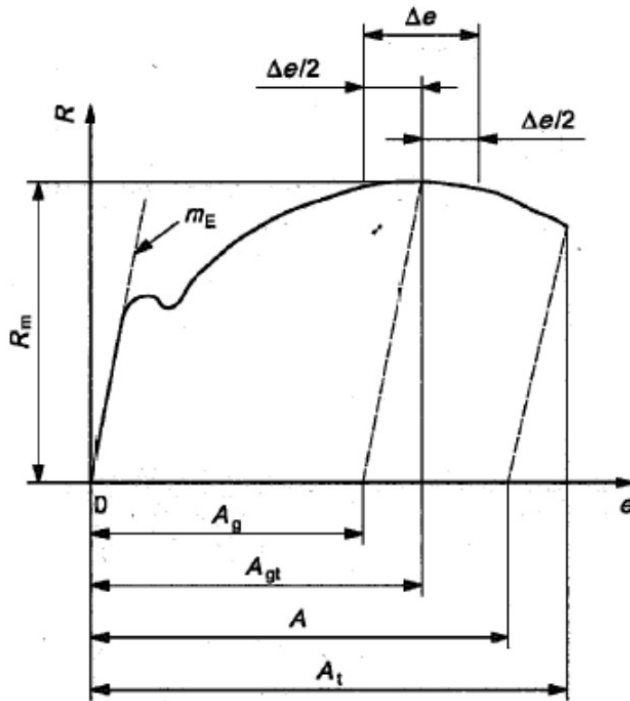


Obrázek 4 - Přeměna krystalické mřížky vlivem plastické deformace [3]

## 3 Zkouška tahem

Zkouška tahem se řadí mezi nejstarší laboratorní zkoušky. Již v 15. století, se Leonardo da Vinci pokoušel pomocí tahových namáhání zjistit pevnost konopných lan. Slouží pro určení mechanických vlastností a plasticity materiálů. Dále je možné určit, pro jaké technologické operace je materiál vhodný. Zkouška tahem se neprovádí přímo na vyrobených součástech, místo toho se využívají zkušební tyče ze stejného materiálu. Rozměry a tvar tyčí jsou normalizovány. [11; 12]

Tvárnost materiálu lze posoudit podle údajů získaných ze zkoušky tahem. Jedná se o napěťové charakteristiky: mez kluzu ( $R_e$ ), mez pevnosti ( $R_m$ ) a deformační charakteristiky: tažnost (A), kontrakce (Z). Dále je možné zjistit hodnoty normálové anizotropie ( $r$ ), plošné anizotropie ( $\Delta r$ ), vážený součinitel normálové anizotropie ( $\bar{r}$ ), poměr meze kluzu a pevnosti ( $R_e/R_m$ ), exponent deformačního zpevnění ( $n$ ) a určit zásobu plasticity nebo index tvářitelnosti (IT). [2]



Obrázek 5 - Diagram zkoušky tahem [2]

$R$  – napětí [MPa]

$R_m$  – mez pevnosti v tahu [MPa]

$e$  – prodloužení měřené průtahoměrem [%]

$m_E$  – směrnice pružné části závislosti napětí-prodloužení

$A$  – tažnost [%]

$A_t$  – celková tažnost [%]

$A_g$  – plastické prodloužení při max. zatížení [%]

$A_{gt}$  – celkové prodloužení při max. zatížení [%]

Hookův zákon:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (2) \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [-]} \quad (3)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1)$$

$\sigma$  – tahové napětí [MPa]

$\varepsilon$  – poměrné prodloužení [-]

$E$  – modul pružnosti v tahu [MPa]

$F$  – zatěžující síla [N]

$\Delta L$  – prodloužení vzorku

$S$  – plocha průřezu vzorku [mm<sup>2</sup>]

[mm]

[mm<sup>2</sup>]

$L_0$  – původní délka vzorku

[mm]

### 3.1 Princip zkoušky tahem

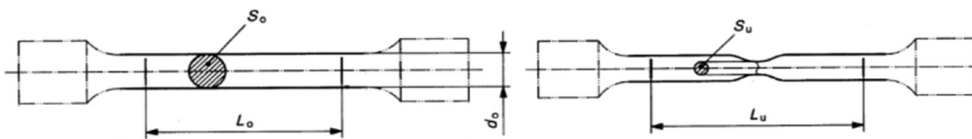
Zkouška se provádí na zkušebním zařízení (trhacím stroji) dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Spočívá v upnutí obou konců zkušební tyče do čelistí a následném natahování tyče. Dolní konec tyče je upnut v pevném příčnicku a horní konec tyče se upíná do posuvného příčnicku. Rychlostí pohybu příčnicku lze měnit rychlost deformace materiálu a také vzdálenost čelistí od sebe. Zkouška je prováděna za pokojové teploty až do přetržení materiálu. [11; 12]

### 3.2 Zkušební těleso

Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou dány normou. Odvíjí se však od rozměrů či výrobní technologie zkoumaného výrobku, pro který určujeme mechanické vlastnosti. Příčný průřez zkušebního tělesa se nejčastěji volí tak, aby měl jednoduchý geometrický tvar (kruh, čtverec, obdélník, šestiúhelník). [12]

Dělení zkušebních tyčí dle normy ČSN EN ISO 6892-1:

- a) Zkušební tyče, které se používají pro tenké výrobky, jako jsou plechy, pásy a ploché výrobky o tloušťce mezi 0,1 mm a 3 mm
- b) Zkušební tyče používané pro dráty, tyče nebo profily, jejichž průměr nebo tloušťka činí maximálně 4 mm
- c) Zkušební tyče používané pro plechy a ploché výrobky o tloušťce nejméně 3 mm. Také se využívá u drátů, tyčí a profilů o průměru nebo tloušťce nejméně 4 mm
- d) Zkušební tyče používané u trubek



Obrázek 6 - Zkušební tyč před a po zkoušce tahem [13]

$L_o$  – počáteční měrná délka [mm]

$S_o$  – počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky [mm<sup>2</sup>]

$d_o$  – průměr zkoušené délky tyče kruhového průřezu [mm]

$L_u$  – konečná měřená délka tyče [mm]

$S_u$  – nejmenší plocha příčného průřezu po lomu [mm<sup>2</sup>]

### 3.3 Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu

Rychlost deformace je definována rovnicí (poměr derivace deformace a času):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varphi}{dt} [s^{-1}] \quad (4)$$

Velikost rychlost deformace je předem daná pro normalizované zkoušky. Pokud se však chceme přiblížit reálným tvářecím podmínkám, musíme ji regulovat změnou rychlosti zatěžování.

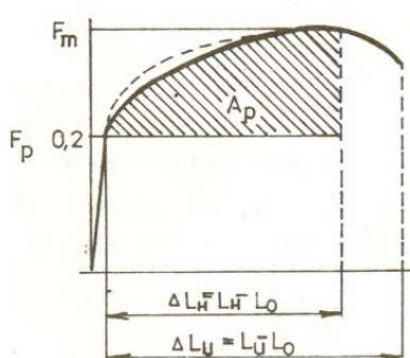
U materiálu s vyšším obsahem uhlíku je citlivost na rychlost zatěžování menší. Při rychlém napínání, výrazně roste mez kluzu a mírně se zvyšuje tažnost a pevnost. Snížením rychlosti zatěžování klesá tažnost, mez kluzu a nepatrně pevnost.

Austenitické oceli jsou více citlivé na rychlost zkoušení. Během rychlého napínání mají nižší tažnost i pevnost než při pomalém. Tažnost a kontrakce se při pomalém zatěžování u většiny kovů mění jen zřídka.

Při zvyšování rychlosti deformace u hlubokotažných ocelí roste odpor materiálu oproti plastické deformaci. Mez kluzu výrazněji narůstá než hodnota meze pevnosti, zároveň klesá exponent deformačního zpevnění, zásoba plasticity a tažnost. Změna těchto vlastností má vliv na okolní oblasti plechu, při reálném tvářecím procesu. [14; 15]

### 3.4 Zásoba plasticity (ZP)

Je nejpoužívanější ukazatel tvářitelnosti. Definována jako množství mechanické práce potřebné k plastické deformaci 1 mm<sup>3</sup> materiálu. Zásoba plasticity závisí na rozdílu napětí meze pevnosti a meze kluzu a na velikosti maximální rovnoměrné deformace. Čím více práce materiál potřebuje na rovnoměrnou plastickou deformaci, tím je lépe tvářitelný. [16]



Obrázek 7 - Zásoba plasticity [16]

$$A_H = \frac{\Delta L_H}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

$$ZP = \frac{A_P}{V_0} = k \cdot (R_m - R_k) \cdot \frac{A_H}{100} \left[ \frac{N \cdot mm}{mm^3} \right] \quad (6)$$

$k = 3/4$  a  $R_k = R_{p0,2}$  – materiály mají nevýraznou  $R_e$

$k = 3/4$  a  $R_k = R_e$  – materiály mají výraznou  $R_e$

$A_H$  – homogenní tažnost

$A_P$  – práce na vyčerpání zásoby plasticity

$k$  – stupeň tažení

### 3.5 Exponent deformačního zpevnění (n)

Exponent deformačního zpevnění je stanoven tahem a definován jako exponent skutečné plastické deformace v matematické rovnici, vztahující skutečné napětí ke skutečné plastické deformaci při aplikaci jednoosého zatížení. Podle typu krystalické mřížky se odvíjí exponent deformačního zpevnění. [16; 17]

Tabulka 1 - Vliv exponentu deformačního zpevnění na tvářitelnost materiálů [17]

Exponent deformačního zpevnění (n)	Tvářitelnost
$n < 0,215$	Špatná
$n = 0,215$ až $0,25$	Dobrá
$n > 0,25$	Výborná

Čím je exponent deformačního zpevnění vyšší, tím je materiál lépe tvářitelný.

Výpočet exponentu deformačního zpevnění dle Holomona:

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad (7)$$

Střední hodnota tohoto exponentu ( $n_m$ ) slouží jako ukazatel tvářitelnosti. Pro nízkouhříkové oceli se jeho hodnota pohybuje v rozmezí 0,17 až 0,26.

$$n_m = 0,5 \cdot (n_0 + n_{45} + n_{90}) \quad (8)$$

### 3.6 Součinitel plastické anizotropie (r), vážený průměr součinitele plastické anizotropie ( $\bar{r}$ )

Součinitel plastické anizotropie lze posoudit pomocí váženého průměru součinitele plastické anizotropie (ukazatel hlubokotažnosti), který je řazen mezi nejvýznamnější ukazatele tvářitelnosti plošného tváření. Součinitel plastické anizotropie je stanovený jako poměr skutečné plastické deformace šířky a skutečné plastické deformace tloušťky zkušební tělesa, které je vystaveno jednoosému zatěžování.

Anizotropii lze definovat jako nestejnoseměrnost fyzikálních a mechanických vlastností v různých směrech plechu. Při posuzování anizotropie se materiál považuje za homogenní a je stanoven třemi směry ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Směr válcování je stejný jako směr osy x (směr označený  $0^\circ$ ). [16; 17]

Výpočet váženého průměru součinitele plastické anizotropie:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (9)$$

Výpočet stupně plošné anizotropie:

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90} \cdot r_{45/20}}{2} \quad (10)$$

Je-li  $\Delta r = 0$ , cípy se nevytváří.

Je-li  $\Delta r < 0$ , vytváří se cípy ve směrech  $45^\circ$  a  $-45^\circ$  ke směru válcování plechu.

Je-li  $\Delta r > 0$ , vytváří se cípy ve směrech  $0^\circ$  a  $90^\circ$  ke směru válcování plech.

## 4 Optické systémy pro měření přetvoření plechu

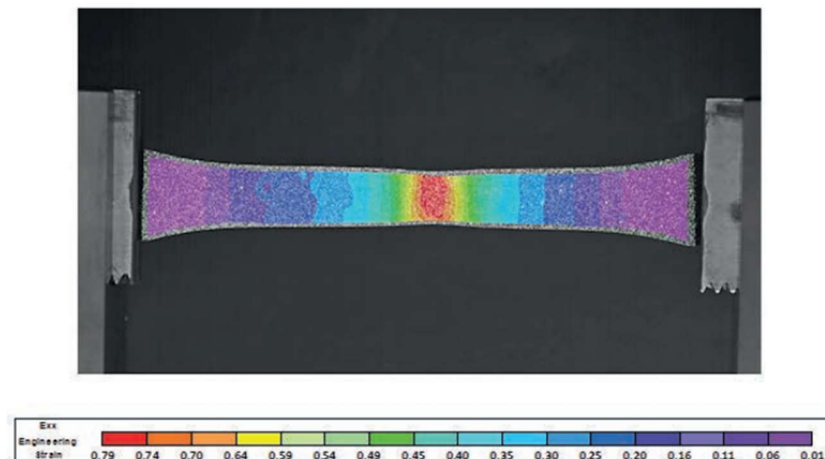
Optické měřicí systémy zastávají v dnešní době důležitou roli ve strojírenství. Využívají se pro vyhodnocení velikosti deformace. Při měření deformace optickým systémem, musí být díl snímán vždy, minimálně ze dvou pozic. Ze snímků se získají 3D souřadnice bodů, které leží na povrchu měřené součásti. Z těchto souřadnic jednotlivých elementů se dá určit jejich vzájemný posuv a tím pádem i velikost deformace. [18; 20]

Na základě naměřených deformací plechu je možné zjistit polohu bodů v rámci limitního diagramu nebo hodnotu hlavního a vedlejšího napětí a aktuální tloušťku součásti v konkrétním místě z rovnice ze zákona o zachování objemu:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (11)$$

### 4.1 DIC (Digital image correlation)

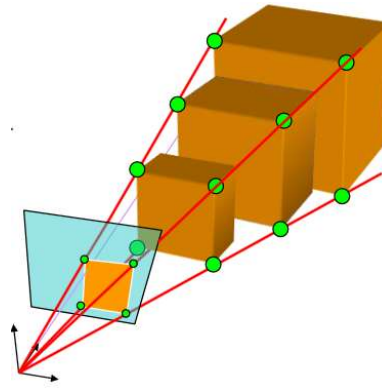
Digital image correlation (digitální obrazová korelace) je optická metoda pro určení velikosti deformace materiálu. Tato metoda využívá techniku sledování 2D a 3D měření pomocí snímků z kamer. Pro 2D měření deformace se používá pouze jedna kamera a dvě kamery se používají pro 3D měření. V průběhu měření jsou získány vysoce kvalitní snímky, které systém dále vyhodnotí. [19; 20]



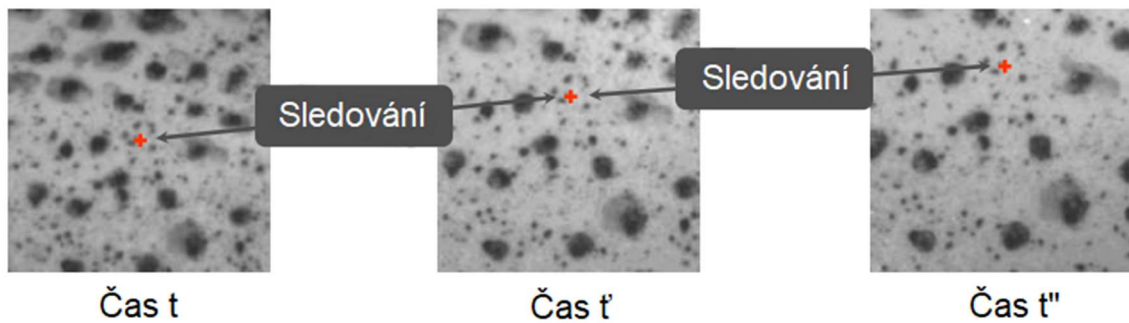
Obrázek 8 - Teplotní mapa zkoušeného vzorku [26]

#### 4.1.1 Princip dvourozměrné korelace (2D)

Je to monokulární metoda, u které nejde určit velikost objektů. Měřený rovinný povrch musí být rovnoběžný k rovině snímání po celou dobu snímání. U této metody je potřebné zvolit si bod v počátečním snímku, který je sledován po celou dobu deformace nebo posuvu (viz. obrázek 10). [19; 21]

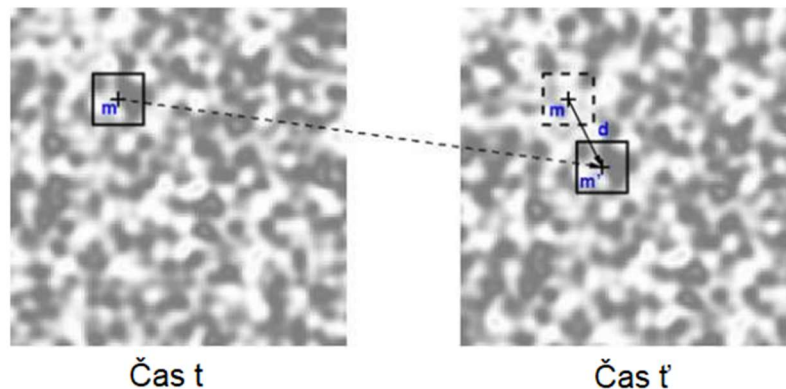


Obrázek 9 - Princip dvourozměrné korelace [19]



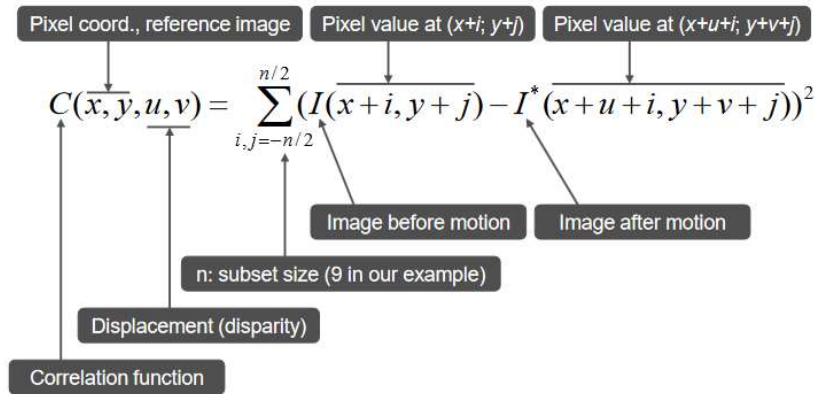
Obrázek 10 - Sledování zvoleného bodu [19]

Ve skutečnosti nejde sledovat jediný samostatný bod, ale sledovány jsou i pixely v okolí sledovaného bodu. Celému tomuto okolí se říká fazeta. Dále na obrázku 11 je zobrazen posuv fazety.



Obrázek 11 - Posuv fazety [19]

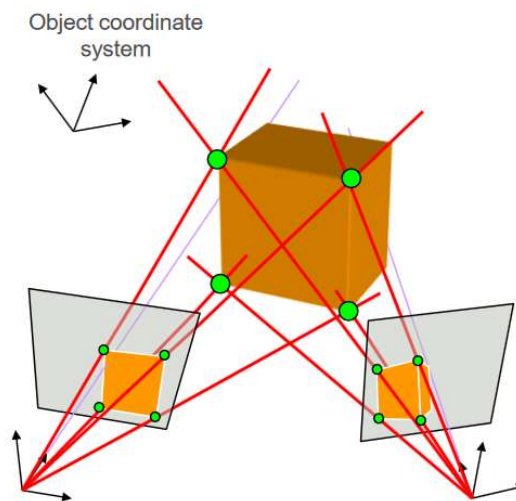
Před pohybem si určíme sledovací matici (fazetu) o rozměrech 5 x 5 pixelů. Pomocí mapovacího procesu lze nalézt pohyb zvolené matice. Běžnou funkcí pro korelaci SSD (sum of squared differences) lze určit shodu pixelů. Čím vyjde menší hodnota korelační funkce, tím je shoda vyšší. V ideálním případě se  $C = 0$ . [19; 21]



Obrázek 12 - Výpočet korelační funkce [19]

### 4.1.2 Princip třírozměrné korelace (3D)

Třírozměrná korelace dokáže sledovat jakýkoliv druh pohybu v průběhu času. Je možné vnímat okolí ve 3D, stejně jako z lidské perspektivy. Pozorovaný vzorek je snímán 2 CCD kamerami v průběhu deformačního děje. Před měřením je nutné kamery zkalibrovat kalibrační deskou. Obě kamery musí snímat stejnou oblast, aby byly schopny vytvořit 3D obraz vzorku. [19; 21]



Obrázek 13 - Princip třírozměrné korelace [19]



## 4.2 Systém ARAMIS

ARAMIS je bezkontaktní měřicí systém od německé společnosti GOM. Tento systém je schopen změřit chování materiálu při deformaci a tím můžeme určit pro jaké tvářecí operace je materiál vhodný. ARAMIS je vhodný pro statické i dynamické zatěžování. Skládá se ze 2 LED diodových světel a 2 CCD kamer. Systém ARAMIS funguje na principu DIC (digital image correlation), který je popsán výše. Snímány mohou být součásti o velikosti  $10^{-4}$  do  $10^2$  m, rozsah měření deformace je od 0,05 % do stovek %. [20; 22]



Obrázek 14 - Kamerový systém ARAMIS [22]

Před samotným měřením je nezbytné na snímaném dílu vytvořit tzv. pattern (barevný vzor) kombinací nástřiku bílé a černé barvy. Díky nanesenému nástřiku jsou kamerky schopny snímat měřený díl. [20; 19]



Obrázek 15 - Zvolení správného patternu [21]



Obrázek 16 - Barevný nástřik na vzorku

## 5 Hlubokotažné oceli

Hlubokotažné oceli jsou mikrolegované nízkouhlíkové oceli specifické svým velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku, které tak nezpevňují jejich strukturu. Právě proto jsou vhodné k využití v automobilovém průmyslu pro tváření tvarově složitějších dílů.

Základní struktura je složena z feritu a cementitu. Nejvýhodnější pro tváření je, aby byl cementit vylučován rovnoměrně ve feritické struktuře v podobě globulí. K mikrolegování se používá titan nebo niob a zároveň slouží jako stabilizátory. Díky tomu je obsah uhlíku v hlubokotažných ocelích nižší než u běžných konstrukčních ocelí. Nejdůležitějšími parametry těchto ocelí jsou mez kluzu, mez pevnosti, poměr meze kluzu a meze pevnosti, kontrakce, tažnost a exponent deformačního zpevnění. [23]

Tabulka 2 - Chemické složení hlubokotažných ocelí

Označení materiálu	Chemické složení						Norma
	C [%]	P [%]	S [%]	Mn [%]	Si [%]	Ti [%]	
DC 01	0,12	0,045	0,045	0,60	-	-	ČSN EN 10152
DC03	0,10	0,035	0,035	0,45	-	-	
DC04	0,08	0,030	0,040	0,40	-	-	
DC05	0,06	0,025	0,350	0,35	-	-	
DC06	0,02	0,020	0,250	0,25	-	0,30	
DX51D	0,18	0,120	1,200	1,20	0,50	0,30	
DX52D – DX58D	0,12	0,100	0,600	0,60	0,50	0,30	

Mechanické vlastnosti jednotlivých hlubokotažných ocelí:

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí

Označení materiálu	Povrchová úprava	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$r_{90,min}$ [-]	$A_{80,min}$ [%]	Norma
DC01	EG	270 až 410	280	-	28	ČSN EN 10152
DC03	EG	270 až 370	240	1,3	34	
DC04	EG	270 až 350	220	1,6	38	
DC05	EG	270 až 330	200	1,9	40	
DC06	EG	270 až 350	180	1,8	38	
DX51D	GI	270 až 500	280	-	22	
DX52D	GI	270 až 420	300	-	26	
DX53D	GI	270 až 380	260	-	30	
DX54D	GI	260 až 350	220	1,6	36	
DX56D	GI	260 až 180	180	1,9	39	
DX57D	GI	260 až 170	170	2,1	41	
DX58D	GI	260 až 160	160	2,3	43	

GI – Žárové zinkování

EG – Elektrolytické pozinkování

## 6 Příprava měření

Zkouška tahem byla prováděna na trhacím zařízení LabTest Model 5.100SP1 od firmy LaborTech (zobrazeno na Obrázku 17). Byl k dispozici na ústavu strojírenské technologie fakulty strojní ČVUT v Praze v laboratoři mechanických zkoušek. Trhací stroj je ve dvousloupovém provedení a disponuje velkou škálou příslušenství, díky kterému je možné testovat vzorky nebo celé výrobky v tlaku, tahu, smyku, ohybu a krutu. Je vhodný do provozu i laboratoři ke kontrole kvality, ale také pro vývoj nebo výzkum výrobků. V tabulce 4 jsou uvedeny parametry trhacího zařízení.

*Tabulka 4 - Parametry trhacího zařízení LabTest Model 5.100SP1*

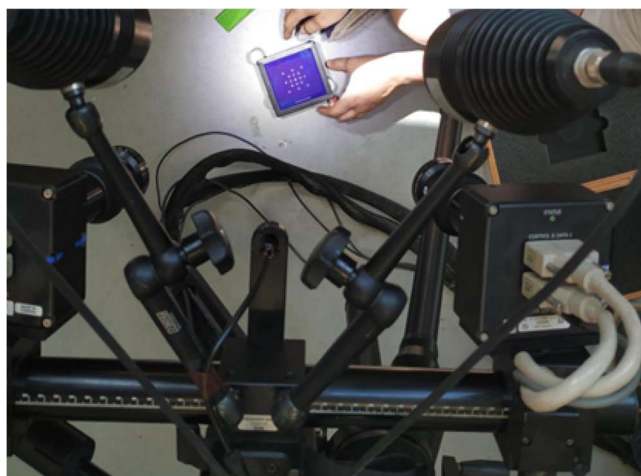
Technická data	Hodnoty	Jednotky
Výška pracovního prostoru	1130	mm
Šířka pracovního prostoru	400	mm
Rozměry stroje (VxŠxH)	2379 x 920 x 880	mm
Hmotnost stroje	533	kg
Tuhost rámu	$1,6 \times 10^{-6}$	mm/N
Jmenovité zatížení	100	kN
Napájecí napětí	230 V 50/60 Hz	V
Příkon stroje	2200	VA
Min. rychlost měření	0,001	mm/min
Max. rychlost měření	600	mm/min
Návratová rychlost	600	mm/min
Přesnost řízení rychlosti	$\pm 0,5$	%
Rozlišení polohy příčnicku	1	$\mu\text{m}$
Teplota pracovního prostředí	10-35	$^{\circ}\text{C}$
Vlhkost pracovního prostředí	20-70	%
Barevná úprava	9005 elox	RAL



Obrázek 17 - Trhací zařízení LabTest Model 5.100SP1

## 6.1 Kalibrace kamer ARAMIS

Před kalibrací bylo nutné zapnout systém ARAMIS a nechat zahřát snímací kamery. Podle uživatelského manuálu je potřeba nechat zahřívát snímací kamery zhruba 25 minut. V případě, že se začne s kalibrací systému před uplynutím této doby, nebude měření deformace přesné. Samotná kalibrace se používá ke zjištění přesných souřadnic zkoušeného vzorku měřícím systémem. Ke kalibraci systému se používají kalibrační destičky. Je na nich síť s identifikačními body a vzdálenost mezi body se liší podle rozměrů destičky. Pro naši kalibraci byla zvolena destička CP20 o rozměrech 55 x 44 mm, díky které jsou kamery schopny snímat oblast 80 x 60 mm. Tato snímaná oblast vyhovuje rozměrovým požadavkům měřeného vzorku.

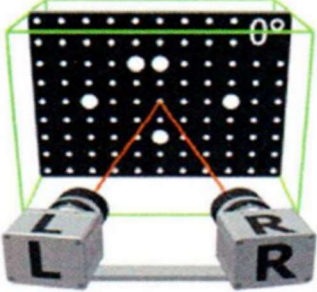
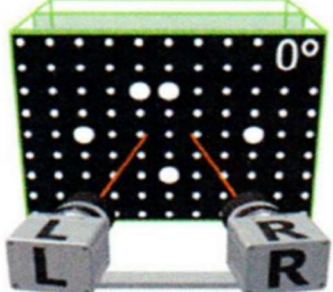
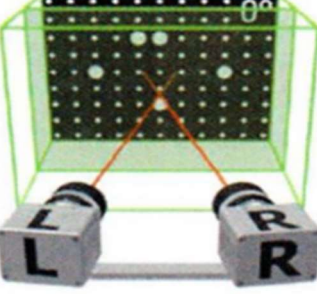
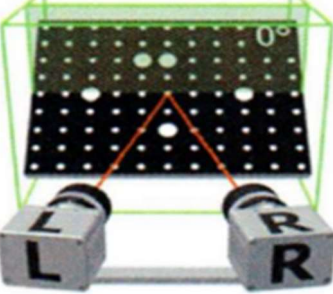
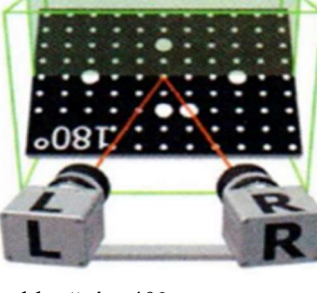
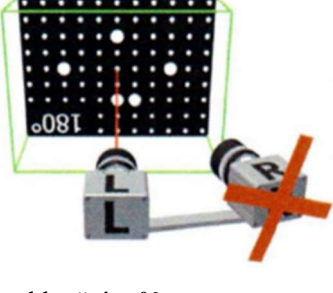


Obrázek 18 - Kalibrace systému ARAMIS

Po zvolení vhodné destičky bylo ještě potřeba nastavit úhel světla, snímací úhel a vzdálenost kamer od objektu (destička nebo vzorek). Podle specifikací destičky musí být úhel kamer a světla  $25^\circ$  (je však nutné, aby obě světla směřovala na snímaný objekt), vzdálenost kamer od objektu 785 mm a vzdálenost mezi kamerami 318 mm. Pokud je vše nastavené a kamery jsou zaostřeny na destičku, lze začít s kalibrací.

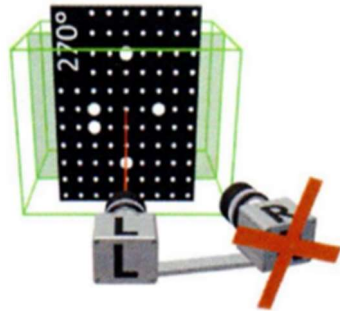
Kalibrace byla provedena dle uživatelského návodu. Spočívá v nastavení kamer a destičky do 13 různých předepsaných pozic, které jsou detailně zobrazeny v tabulce 5.

Tabulka 5 - Postup kalibrace kamer ARAMIS [25]

<p>1. pozice</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Natočení = <math>0^\circ</math>, naklonění = <math>0^\circ</math></li> <li>- Zapnuté obě kamery</li> <li>- Destička je ve středu</li> </ul>	<p>2. pozice</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Natočení = <math>0^\circ</math>, naklonění = <math>0^\circ</math></li> <li>- Zapnuté obě kamery</li> <li>- Destička je blízko ke kamerám</li> </ul>
<p>3. pozice</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Natočení = <math>0^\circ</math>, naklonění = <math>0^\circ</math></li> <li>- Zapnuté obě kamery</li> <li>- Destička je daleko od kamer</li> </ul>	<p>4. pozice</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Natočení = <math>0^\circ</math>, naklonění = <math>40^\circ</math></li> <li>- Zapnuté obě kamery</li> <li>- Destička je ve středu</li> </ul>
<p>5. pozice</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Natočení = <math>180^\circ</math>, naklonění = <math>40^\circ</math></li> <li>- Zapnuté obě kamery</li> <li>- Destička je ve středu</li> </ul>	<p>6. pozice</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- Natočení = <math>180^\circ</math>, naklonění = <math>0^\circ</math></li> <li>- Zapnutá jen levá kamera</li> <li>- Destička je ve střed</li> </ul>

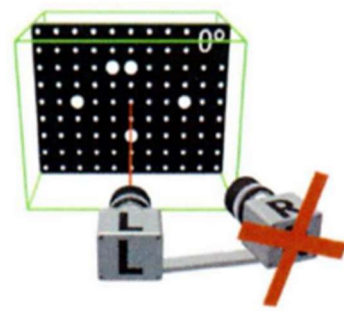


7. pozice



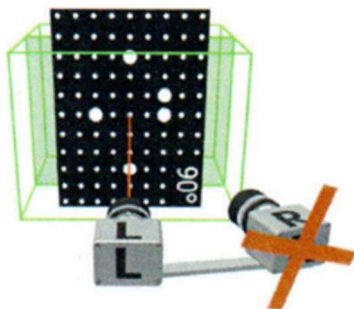
- Natočení =  $270^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnutá jen levá kamera

8. pozice



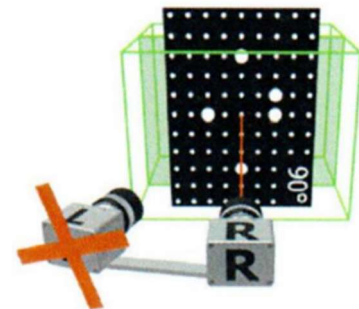
- Natočení =  $0^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnuté jen levá kamera

9. pozice



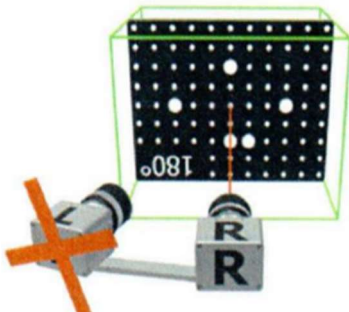
- Natočení =  $90^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnutá jen levá kamera

10. pozice



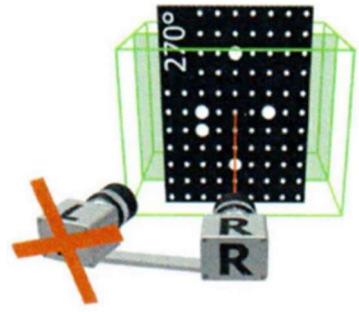
- Natočení =  $90^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnutá jen pravá kamera

11. pozice



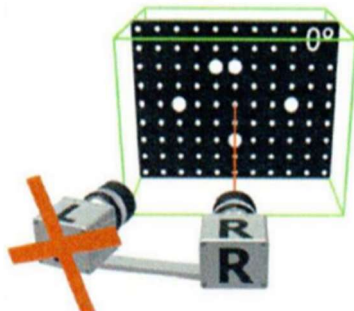
- Natočení =  $180^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnutá jen pravá kamera

12. pozice



- Natočení =  $270^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnutá jen pravá kamera

13. pozice



- Natočení =  $0^\circ$ , naklonění =  $0^\circ$
- Zapnutá jen pravá kamera

Po dokončení kalibrace byl systémem vytvořen tzv. protokol o kalibraci. Tento protokol obsahuje veškeré údaje o provedené kalibraci. Pro nás byla důležitá hodnota kalibrační odchylky, která dosahovala 0,027 Pixelů. V případě, že by tato hodnota byla vyšší, než je limitní, museli bychom celou kalibraci opakovat.

<b>Calibration Result</b>	
Calibration deviation	0.027 Pixels
Calibration deviation (check)	OK (limit value: 0.050 Pixels)
Scale discrepancy	0.003 mm
Scale discrepancy (check)	OK (limit value: 0.005 mm)
Camera angle	24.8°
Height variance	36 mm
Measuring volume	100 / 75 / 55 mm

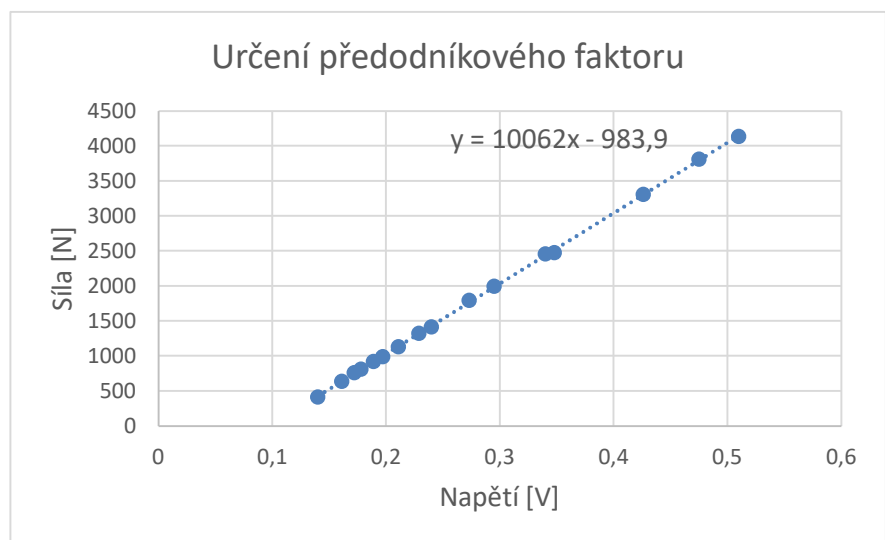
*Obrázek 19 - Výsledky z kalibračního protokolu*

## 6.2 Propojení systémů ARAMIS a trhacího zařízení

Jedním z úkolů této bakalářské práce bylo propojit systém ARAMIS s trhacím zařízením. Systém ARAMIS dostává informace od trhacího zařízení v podobě napěťového signálu. Abychom byli schopni vyhodnotit zkoušku tahem pomocí ARAMISu, museli jsme zjistit tzv. převodníkový faktor, díky kterému ARAMIS pozná hodnoty zatěžujících sil v průběhu celého měření. Bylo provedeno několik zkoušek tahem pro různé zatěžující síly. Odečtením hodnoty napětí ke každé ze zatěžujících sil. Převodníkový faktor byl stanoven jako regresní parametry spojnice trendů z naměřených hodnot (viz. tabulka 6 a graf 1).

*Tabulka 6 - Převodníkový faktor*

Napětí [V]	Síla [N]
0,140	414
0,161	635
0,172	760
0,178	812
0,189	918
0,197	990
0,211	1130
0,229	1324
0,240	1415
0,273	1793
0,295	1995
0,348	2475
0,340	2457
0,426	3306
0,475	3308
0,510	4136



*Graf 1 - Kalibrace ARAMIS - analog*

## 7 Příprava zkušební vzorku

Z důvodu výrobních komplikací a odstávek byl od ŠKODA AUTO dodán materiál CR4, který je ale dle koncernové normy VW 50065 a standardu VDA 239-100 ekvivalentní k DX56. (D – materiál pro hluboké tažení, X – způsob válcování může být za tepla i za studena). Jak je možné vidět z označení, jedná se o ocel vhodnou pro hlubokotažné výlisky, čemuž napovídá, jak její chemické složení, tak i mechanické vlastnosti. Jednou z vlastností je tažnost, která přesahuje 40 %.

Tabulka 7 - Vlastnosti CR4 dle VW 50065 a VDA 239-100

Materiál	Mez průtažnosti $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost		Součinitel plastické anizotropie		$n_{10-20/Ag}$
			$A_{50\text{ mm}}$ [%]	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$r_{90/20}$	$r_{m/20}$	
CR4	140 až 180	270 až 330	≥ 40	≥ 39	≥ 1,9	≥ 1,6	≥ 0,20

Jde o feritickou ocel s nízkým obsahem uhlíku (max. 0,06 %) a titanem (max. 0,3 %), kterým se ocel mikroleguje. Titan zastupuje funkci stabilizátoru – karbonitridu, což dopomáhá k vyčištění feritu od intersticiálních rozpuštěných atomů dusíku a uhlíku. Snížením obsahu těchto prvků, vede ke zlepšení plastických mechanických vlastností materiálu. [23]

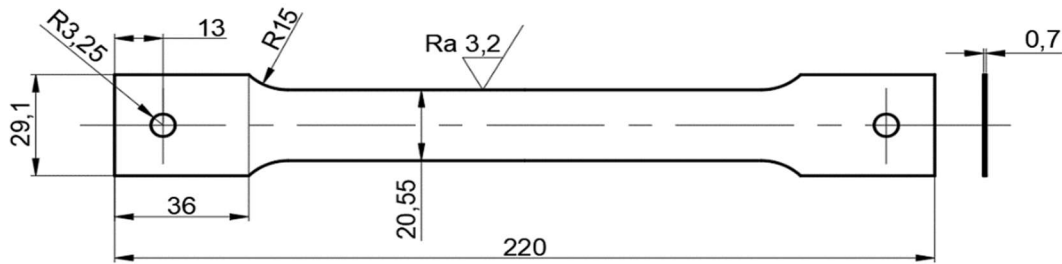
Tabulka 8 - Chemické složení CR4 dle VW 50065 a VDA 239-100

Materiál	Chemické složení [%]						
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
CR4	≤ 0,06	≤ 0,50	≤ 0,40	≤ 0,025	≤ 0,025	≥ 0,010	≤ 0,30

Uplatnění oceli CR4 je především v automobilovém průmyslu v podobě výlisku bočních rámců, dveří či víka kufru. Kvůli prodloužení životnosti, funkčnosti je na materiál aplikována protikorozní povrchová úprava. Nejčastěji se jedná o žárový ponor do zinkové lázně, do slitiny zinek – hliník, do slitiny hliník – zinek, do slitiny zinek – železo.

Zkušební vzorky byly odebrány z plechů o tloušťce 0,7 mm s různými úhly válcování (0°, 45°, 90°). Poté jim byly zbrušeny konce ručním pilníkem, aby se předešlo prokluzování vzorku v upínacích hlavách. Jakmile byl vzorek takto připraven, byl označen podle úhlu válcování (příklad: A144 – úhel válcování 45°) a byl připraven k odmaštění.





Obrázek 20 - Výkres zkušební vzorku



Obrázek 21 - Zkušební vzorek po broušení

## 7.1 Odmaštění vzorku před barevným nástřikem

Nezbytná součást přípravy vzorku je jeho správné odmaštění. Pokud testovaný vzorek nebude správně odmaštěn, tak nebude držet barevný nástřik a v průběhu deformace se začne trhat. To může vést k nedostatečnému zachycení vzorku kamerami, což znemožní získání potřebných informací pro vyhodnocení celé zkoušky.

### 7.1.1 Nečistoty na povrchu

Nečistoty vyskytující se na povrchu lze rozdělit do dvou skupin: vlastní (vázané) nečistoty a cizí (ulpělé) nečistoty. Vlastní nečistoty jsou spojeny s kovem určitou chemickou vazbou (chemisorpcí). Vznikají chemickou přeměnou po tepelném zpracování kovu (např. rez, okuje). Cizí nečistoty jsou vázány s povrchem součásti pomocí absorpčních a adhezních sil. Častokrát nemusí být tyto nečistoty vidět, je však důležité, aby byly odstraněny. Do této skupiny patří kovové nečistoty (prach, třísky), anorganické nečistoty (anorganické soli, grafit, zbytky brusných prostředků) a mastnoty (zbytky emulzí, olejů). Větší problém pro nanesení patternu, představují cizí nečistoty a je potřeba je vždy důkladně odstranit.

## 7.1.2 Postup odmaštění

Jako první byl použit čistič a odmašťovač Viton CL07, který slouží k vyčištění úkapů od zaschlých i čerstvých vodouředitelných nebo rozpouštědlových barev pro pracovní náčiní (štetce, válečky, stříkací pistole apod.). Také je to velmi silný odmašťovač povrchu před nanesením nátěrového nástríku. Zvyšuje přilnavost nanesené barvy a tím prodlužuje její životnost.

Aplikování CL07 bylo provedeno dle předepsaného návodu. V poměru 1:10 dílů (1 díl CL07, 10 dílů vody). Následně byl vzorek několikrát opláchnutý pod tekoucí vodou. Soudržnost nátěru již byla značně lepší, bylo však nutné proces odmaštění ještě zlepšit.

To se ukázalo nastříkáním technického líhu na povrch vzorku těsně před nanášením patternu. Byl použit technický líh ADR: 3 UN 1170 s obsahem ethanolu min. 93 %, který se používá pro technické účely do brzdové soustavy nákladních aut, k ředění lihových barev, ale také k odstraňování nečistot a odmašťování. Kvůli bezpečnosti byly použity ochranné rukavice a místnost byla větrána.



Obrázek 22 - Odmašťovač CL07



Obrázek 23 - Vzorky po odmaštění



Obrázek 24 - Technický líh

## 7.2 Barevný nástřík (pattern)

Jak už bylo výše zmíněno, na vzorek musí být nanesen barevný nástřík. Aby mohl ARAMIS správně vyhodnotit deformaci, nástřík musí být izotropní, dostatečně kontrastní a neopakující se. Vytvořen poměrem 50% bílé a 50% černé barvy. Barvy musí být matné, aby neodrážely světlo do snímacích kamer. Během experimentu byly vyzkoušeny laky s různou bází.

Z počátku byl používán rychleschnoucí lak na akrylové bázi od firmy Motip. Jde o univerzální lak, který je možné použít na různé druhy materiálů (kov, dřevo, plast, sklo). Základním pojivem je akrylová pryskyřice. Výhodou těchto laků je vysoká povrchová tvrdost a že rychle zasychají.

Nejprve byl lak protřepán, poté se začala nanášet podkladová bílá barva ze vzdálenosti 20-30 cm od vzorku. Bílá barva slouží jako podklad, proto musela být rovnoměrně rozprostřená po celé měřicí části vzorku. Zhruba po třech minutách se začala nanášet i černá barva, která měla vytvořit finální vzor patternu. U nanášení černého nástříku, bylo důležité najít vyhovující techniku a intenzitu stříkání spreje. Z počátku bylo vyzkoušeno přerušované stlačování spreje z větší vzdálenosti (cca 40 cm). To se však neosvědčilo, kvůli převládající černé barvě na vzorku, což způsobilo, že kamery nebyly schopny zachytávat celou měřicí plochu. Jako nejlepší způsob se osvědčilo mírné stlačení spreje, což vedlo k tzv. prskání barvy ze vzdálenosti 20-30 cm a tím byl vytvořen ideálně izotropní vzor. Před následným měřením bylo nutné nechat 15 minut zasychat.



Obrázek 25 - Akrylový lak (bílý)



Obrázek 26 - Akrylový lak (černý)

Také byly vyzkoušeny dva laky na bázi vody od různých firem. První byl lak RAL 9010 od firmy belton. Jde o rychleschnoucí univerzální nitrokombinační barvu, vhodnou na kov, keramiku, dřevo. Dále byl použit GRANIT od firmy Montana, který je také použitelný na velkou škálu materiálů.

Postup nanášení byl stejný, jako u laků na akrylové bázi. Akorát při použití laku GRANIT, bylo nanášení černého patternu daleko jednodušší. Struktura rozstříku se více blížila žádoucímu patternu a snížila důraz na zvolenou techniku nanášení. Barvu bylo vhodné nechat zasychat 20-25 minut před měřením.

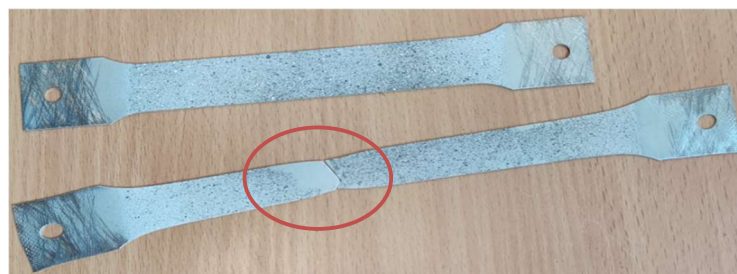


Obrázek 27 - Lak na vodní bázi Montana



Obrázek 28 - Lak na vodní bázi belton

Laky na bázi vody odolávaly deformaci při zkoušce tahem daleko lépe než akrylové laky. Akrylové laky se při deformaci trhaly a jen zřídka byla zkouška možná vyhodnotit. Nanášení laků na vodní bázi bylo mnohem jednodušší a pattern snáší lépe deformaci. Na obrázku 29 a 30 je zobrazeno porovnání soudržnosti patternu.



Obrázek 29 - Vzorek s akrylovým nástřikem



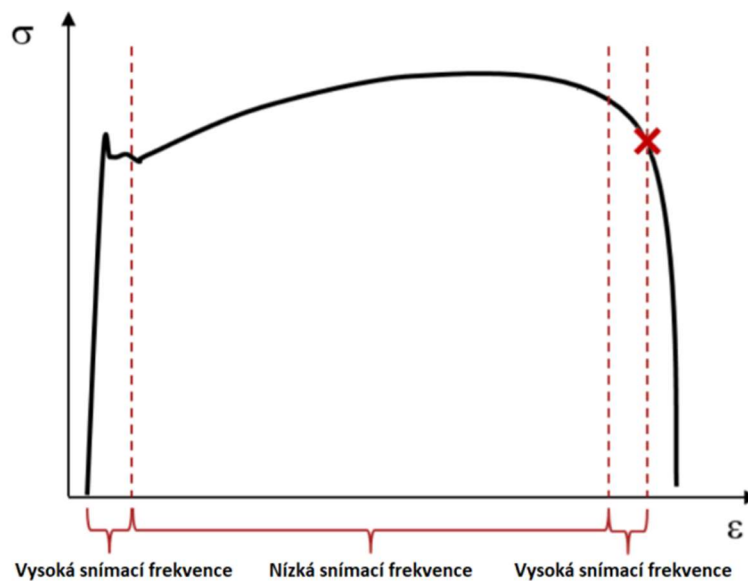
Obrázek 30 - Vzorek s nástřikem na bázi vody

## 8 Nastavení snímání a zkušební vzorku

Snímání systémem ARAMIS zkoušku tahem si vyžaduje nastavení různých snímacích frekvencí v průběhu měření. Tyto frekvence mohou být nastaveny nadefinováním jednotlivých sekvencí samotným uživatelem nebo vybráním z již vytvořených systémových šablon. V měřicí sekvenci bylo potřeba nadefinovat rychlost snímací frekvence pro začátek a konec měření.

Po spuštění softwaru a měřicího senzoru, byl založen nový projekt a nastavena (vynulována) poloha senzoru proti zkušebnímu vzorku. Zvolené měřicí sekvence se v průběhu měření samy spouští v chronologickém pořadí.

Důležité je získat co nejvíce dat před začátkem plastické deformace a poté těsně před lomem měřeného vzorku (zobrazeno na obrázku 31). Kvůli tomu se tyto dva úseky zkoušky zaznamenávají vysokou snímací frekvencí. Ze zbylých úseků není nutné získat takové množství dat, proto postačí snímat nižší frekvencí.



Obrázek 31 - Snímací frekvence v průběhu zkoušky tahem



Zkušební vzorek byl upnut do čelistí trhacího stroje a byly nastaveny kamery, aby sledovali místo, kde je vzorek upnut. Poté byly na zkušební vzorek připnuty reflexní pásky pro měření tažnosti laserovým průtahoměrem LE-05 a příčný extenzometr pro změření kontrakce. Vzdálenost mezi reflexními páskami byla 80 mm, protože vzorek byl nepoměrový.

Pokud bylo vše připravené (viz. obrázek 32), došlo ke spuštění zkoušky tahem. Jelikož spuštění systému Test&Motion (ovládací systém trhacího zařízení) a ARAMISu, nebylo nijak propojené. Oba systémy musely být spuštěny samostatně ve stejnou chvíli.



*Obrázek 32 - Připravený vzorek pro měření*

## 9 Výsledky a vyhodnocení zkoušky tahem

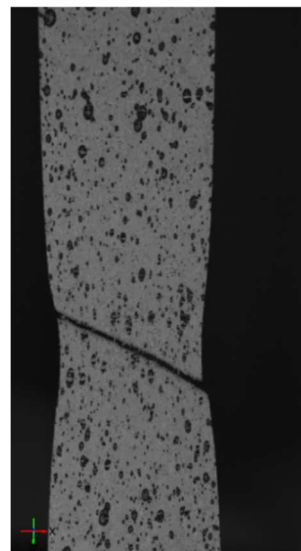
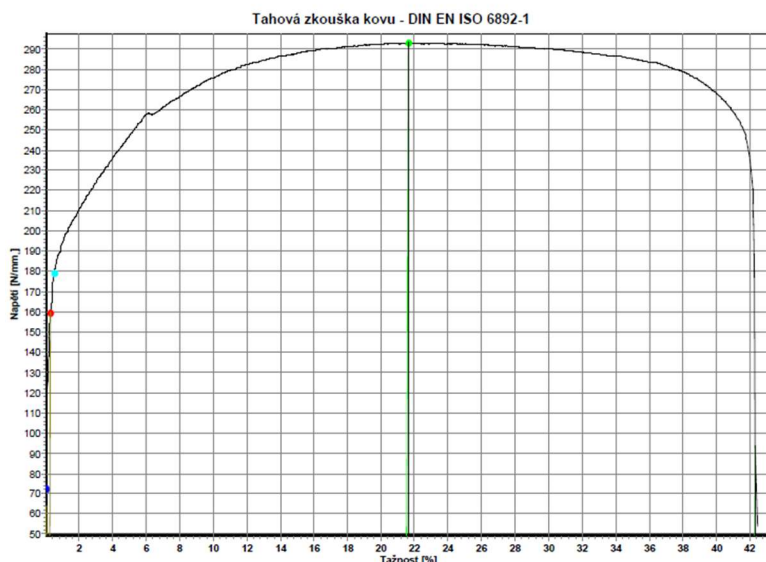
Cílem této bakalářské práce bylo zjistit chování materiálu CR4 při zkoušce tahem, tak abychom se co nejvíce přiblížili reálným tvářecím rychlostem. Rychlosti zatěžování byly zvoleny 10, 50, 100, 200, 500, 600 mm/min. Výsledky byly získány pomocí systému ARAMIS a Test&Motion (viz. obrázek 33).

Po ukončení zkoušky tahem oba systémy vyexportují protokoly z měření, které obsahují tahový diagram a veškeré informace o naměřených hodnotách. Systém ARAMIS navíc poskytuje možnost zobrazení kteréhokoliv snímku z celé deformace. Na zobrazeném snímku lze vidět velikost deformace podle druhu zbarvení nebo tvorbu krčku na zkušební tělese.

### Zkušební parametry

Zkušební norma: Tahová zkouška kovu - DIN EN ISO 6892-1  
 Typ stroje: 48/17  
 Snímač síly: 100kN  
 Průtahoměr: extenzometr  
 Upínací přípravek: ne  
 Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor  
 Rozměry vzorku: a = 0,7 mm; b = 20,55 mm; h = 1 mm; m = 1 g  
 Zadání délky: Le = 80,32 mm; Lc = 110 mm; LO = 80 mm  
 Zkušební rychlosti: V0 = 100 mm/min; V1 = 100 mm/min  
 Přepínací body: F0 = 1000 N  
 Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 90000 N; dF = 80 %

Name	Value
Ag	23.082 %
Agt	23.432 %
At	46.915 %
mE	208420.860 MPa
n-value	0.221
Poisson-value	0.322
r-value	1.993
Rm	294.318 MPa
Rp02	171.201 MPa



### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	E kN/mm <sub>2</sub>	Rp0,2 N/mm <sub>2</sub>	Fp0,2 N	Rt0,5 N/mm <sub>2</sub>	ReH N/mm <sub>2</sub>	ReL N/mm <sub>2</sub>
9	x	10.05.22	17:51			173,473	159	2292,30	179	0	0

	Rm N/mm <sub>2</sub>	Fm N	Ag %	A %	Agt %	At %
9	293	4213,50	21,48	42,28	21,65	42,34

Obrázek 33 - Výsledné protokoly (vlevo Test&Motion, vpravo ARAMIS)

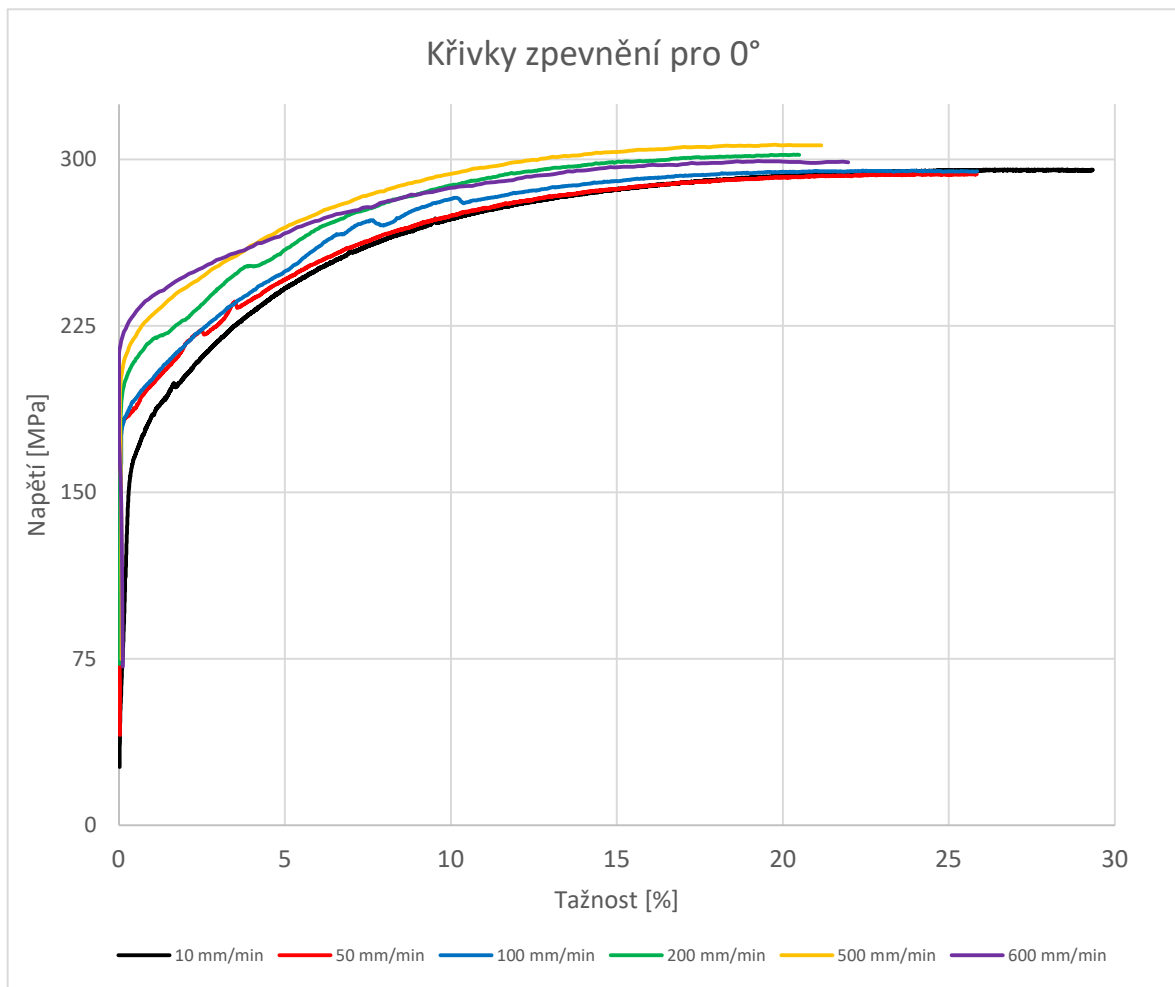
### 9.1.1 Výsledky pro úhel válcování 0°

*Tabulka 9 - Naměřené hodnoty pro úhel válcování 0°*

Úhel válcování = 0°								
Rychlost zatěžování/deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm]	$R_m$ [N/mm]	$A_g$ [%]	$A_{gt}$ [%]	n [-]	r [-]
<b>10 [mm/min]/ 0,0019 [s<sup>-1</sup>]</b>	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
<b>50 [mm/min]/ 0,0059 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	216,662	185	293	22,47	22,60	0,228	2,033
	2	211,616	185	294	23,96	24,10	0,232	2,001
	3	195,749	184	292	17,44	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	22,83	0,232	2,019
	s	7,858	2,315	3,655	2,806	2,801	0,005	0,014
	<b>100 [mm/min]/ 0,0119 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	199,530	188	294	22,18	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	159	293	21,48	21,65	0,224	2,010
	6	213,136	187	295	23,76	23,88	0,215	2,008
	Ø	206,411	183,50	293,67	22,74	22,89	0,216	2,005
	s	6,468	12,285	1,106	1,171	1,163	0,006	0,035
<b>200 [mm/min]/ 0,0238 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	207,983	196	301	21,08	21,23	0,237	1,940
	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	21,24	0,223	1,993
	s	4,066	5,083	2,713	1,138	1,151	0,012	0,051
	<b>500 [mm/min]/ 0,0595 [s<sup>-1</sup>]</b>	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	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	22,18	0,216	1,975
	s	9,304	7,242	7,115	1,835	1,876	0,009	0,017



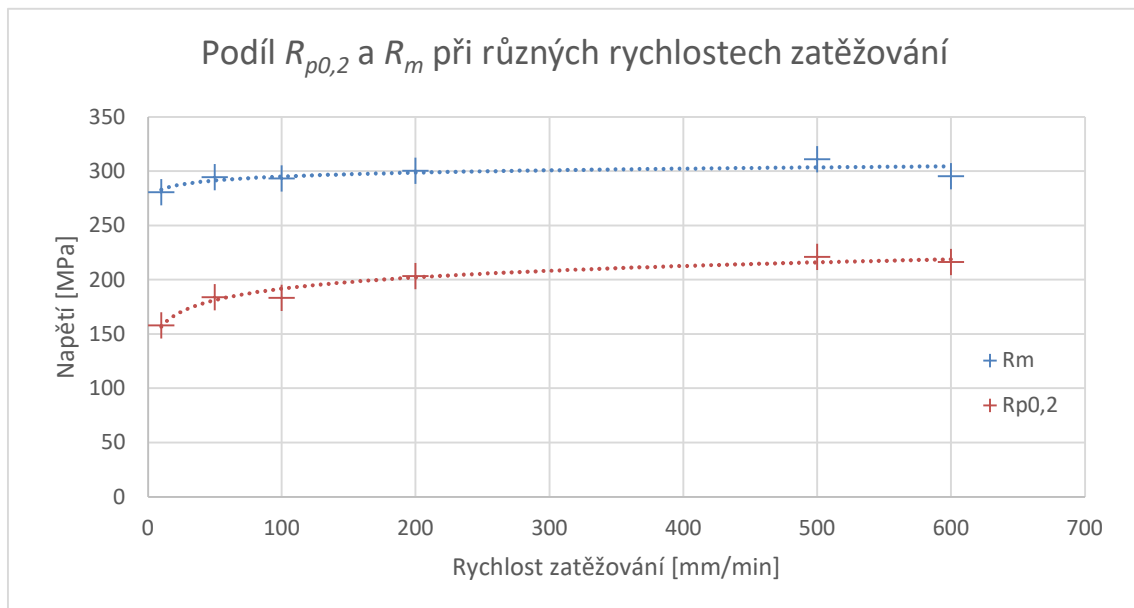
Úhel válcování = 0°								
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm]	$R_m$ [N/mm]	$A_g$ [%]	$A_{gt}$ [%]	n [-]	r [-]
600 [mm/min]/ 0,0714 [s-1]	1	213,234	229	311	17,04	17,18	0,230	1,983
	2	205,609	238	307	18,37	18,51	0,227	1,998
	3	200,933	191	279	18,92	19,15	0,220	2,006
	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	19,35	0,234	2,002
	s	6,878	16,152	11,250	1,356	1,358	0,009	0,009



Graf 2 - Křivky zpevnění pro úhel válcování 0°

*Tabulka 10 - podíl  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro úhel válcování  $0^\circ$* 

Rychlost zatěžování [mm/min]	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ [MPa]
10	281	158	0,563
50	295	184	0,625
100	294	184	0,625
200	301	204	0,677
500	311	221	0,711
600	296	217	0,733


*Graf 3 - Podíl  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro úhel válcování  $0^\circ$* 

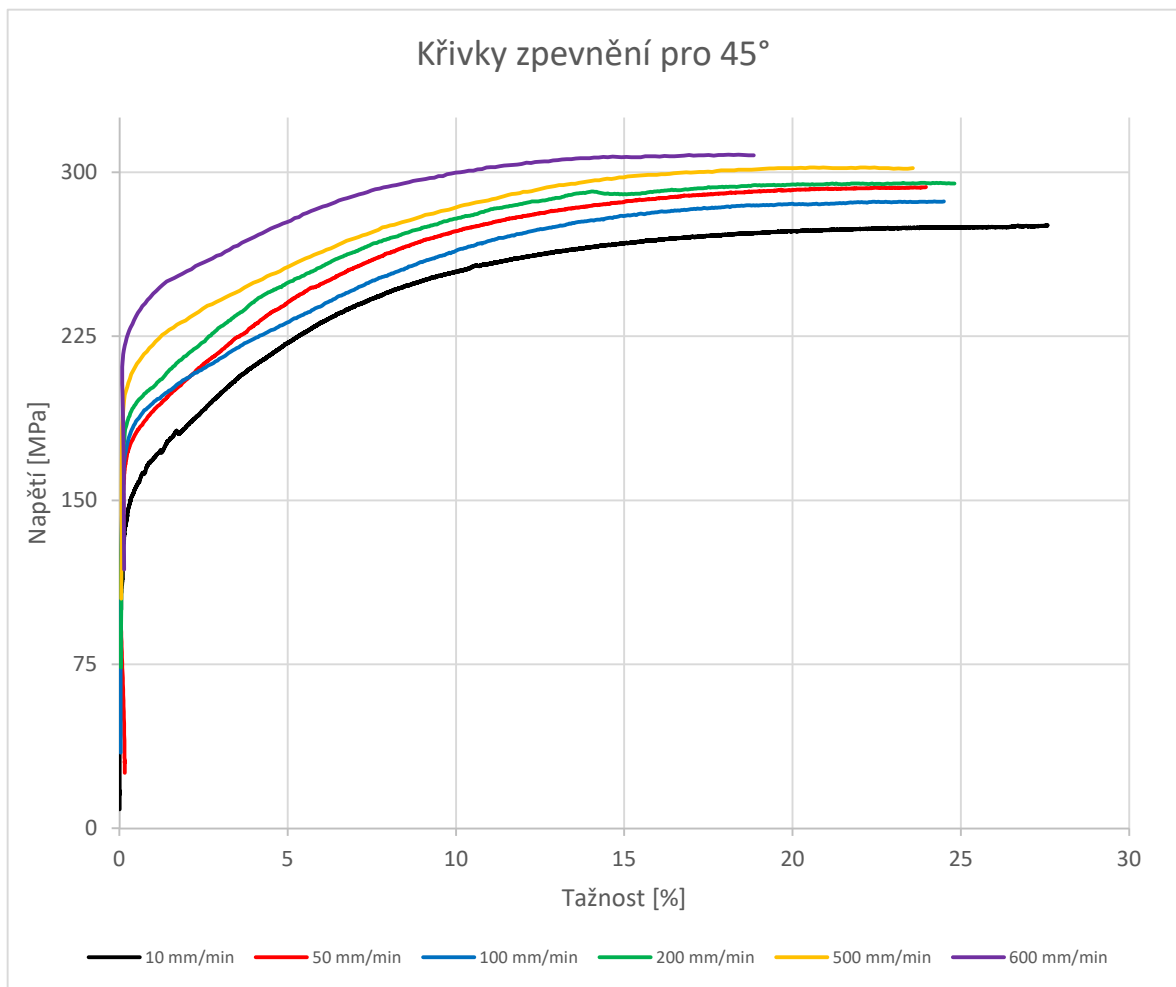
Naměřené hodnoty z tabulky 9 byly použity k vytvoření grafu křivek zpevnění a grafu podílu  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro vzorky s úhlem válcování  $0^\circ$ . Maximální průměrné hodnoty smluvní meze kluzu (221 MPa a meze pevnosti (311 MPa) byly naměřeny při rychlosti zatěžování 500 mm/min. Homogenní tažnost vzorků klesala podle rostoucí rychlosti zatěžování, což odpovídá snižující se zásobě plasticity podle grafu 3. Průměrná hodnota exponentu deformačního zpevnění byla 0,230. Hodnoty součinitele plastické anizotropie se pohybovala blízko 2.

## 9.1.2 Výsledky pro úhel válcování 45°

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty pro úhel válcování 45°

Úhel válcování = 45°								
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm]	$R_m$ [N/mm]	$A_g$ [%]	$A_{gt}$ [%]	n [-]	r [-]
10 [mm/min]/ 0,0019 [s <sup>-1</sup> ]	1	193,536	147	276	27,43	27,57	0,232	1,625
	2	199,659	140	279	25,15	25,31	0,232	1,577
	3	196,679	143	287	24,52	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
	∅	202,775	157,00	288,80	25,10	25,25	0,223	1,591
	s	9,884	17,239	10,889	1,397	1,397	0,010	0,024
50 [mm/min]/ 0,0059 [s <sup>-1</sup> ]	1	219,727	185	301	22,49	22,63	-	-
	2	208,688	174	293	23,82	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	43,06	0,209	1,622
	5	216,835	159	287	23,57	23,70	0,219	1,553
	6	221,440	194	309	22,09	22,22	0,207	1,568
	∅	211,332	178,50	297,67	23,24	26,72	0,214	1,566
	s	8,560	10,874	6,992	0,839	7,357	0,005	0,035
100 [mm/min]/ 0,0119 [s <sup>-1</sup> ]	1	218,199	182	289	22,54	22,75	0,228	2,263
	2	199,475	164	269	21,93	22,20	0,224	2,210
	3	220,342	192	288	30,63	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	24,49	0,220	2,261
	∅	211,291	183,60	285,20	23,89	24,06	0,223	2,259
	s	7,683	12,159	8,352	3,650	3,621	0,005	0,026
200 [mm/min]/ 0,0238 [s <sup>-1</sup> ]	1	219,719	186	282	19,82	19,94	0,221	1,534
	2	213,080	188	300	20,87	21,01	0,222	1,498
	3	205,516	189	295	24,01	24,16	0,210	1,523
	4	208,645	184	287	20,18	20,32	0,219	1,581
	5	218,106	193	311	17,78	17,92	0,212	1,520
	∅	213,013	188,00	295,00	20,53	20,67	0,217	1,531
	s	5,407	3,033	10,139	2,021	2,026	0,005	0,028
500 [mm/min]/ 0,0595 [s <sup>-1</sup> ]	1	209,773	209	294	18,36	18,50	0,225	1,592
	2	221,729	206	302	20,38	20,51	0,234	1,586
	3	199,981	193	285	21,37	21,51	0,223	1,523
	4	205,827	213	298	18,19	18,33	0,237	1,513
	5	224,026	209	294	19,21	19,34	0,219	1,601
	∅	212,267	206,00	294,60	19,50	19,64	0,228	1,563
	s	9,235	6,870	5,643	1,214	1,213	0,007	0,037

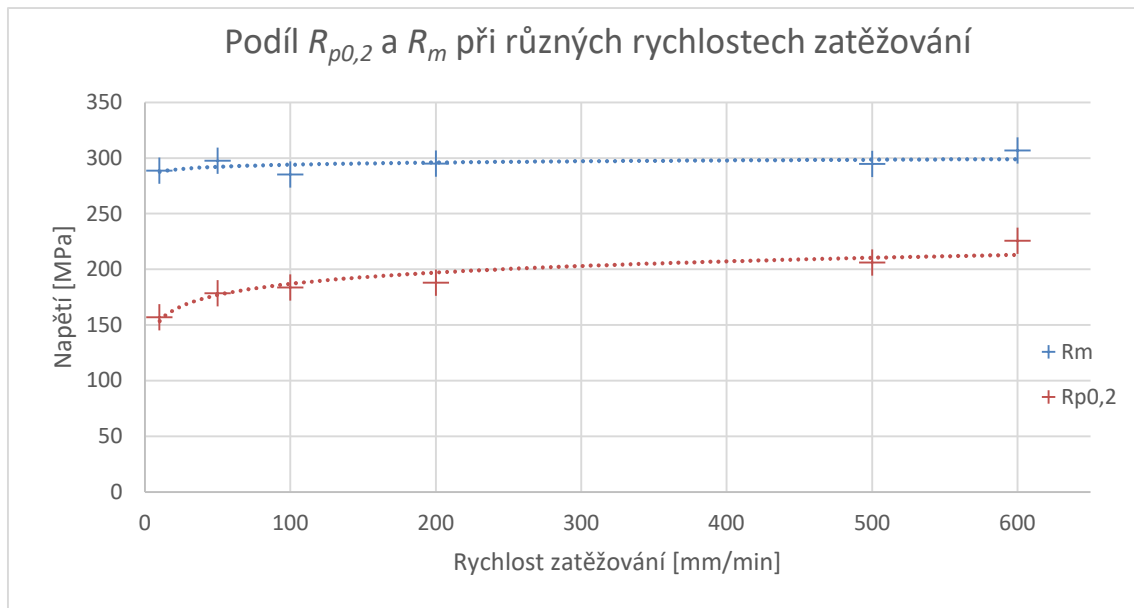
Úhel válcování = 45°								
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm]	$R_m$ [N/mm]	$A_g$ [%]	$A_{gt}$ [%]	n [-]	r [-]
600 [mm/min]/ 0,0714 [s-1]	1	205,627	227	311	19,19	19,34	-	-
	2	191,877	229	308	17,93	18,09	0,216	1,556
	3	195,676	231	319	18,99	19,18	0,206	1,567
	4	205,260	226	303	19,52	19,70	0,209	1,499
	5	205,270	215	295	18,41	18,58	-	-
	6	197,718	226	304	18,91	19,26	-	1,596
	Ø	200,238	225,67	306,67	18,83	19,03	0,210	1,555
	s	5,426	5,088	7,409	0,520	0,533	0,004	0,035



Graf 4 - Křivky zpevnění pro úhel válcování 45°

*Tabulka 12 - Podíl  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro úhel válcování  $45^\circ$* 

Rychlost zatěžování [mm/min]	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [Mpa]	Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ [MPa]
10	289	157	0,544
50	298	179	0,600
100	285	184	0,644
200	295	188	0,637
500	295	206	0,699
600	307	226	0,736


*Graf 5 - Podíl  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro úhel válcování  $45^\circ$* 

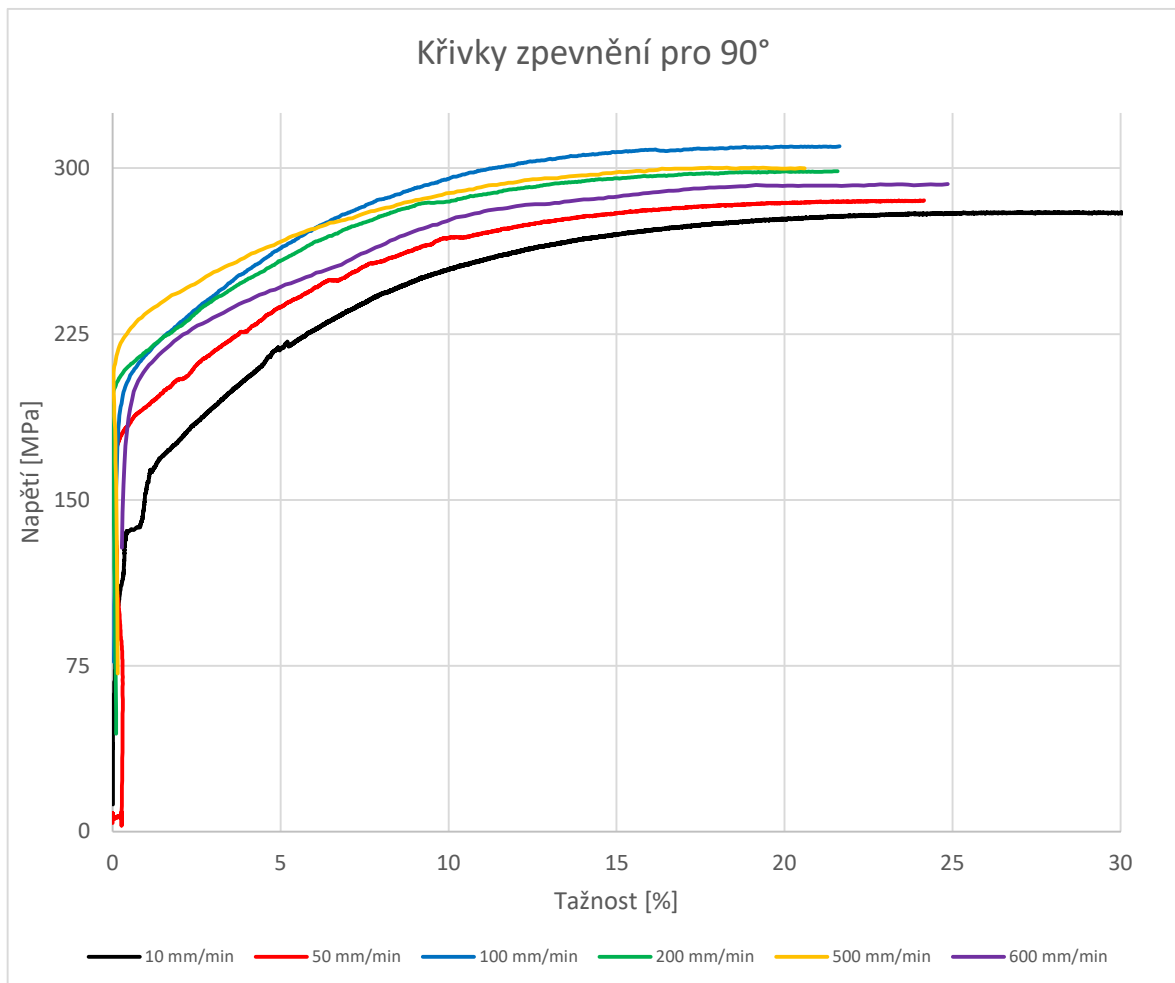
Z naměřených hodnot (viz. tabulka 11) byly vytvořeny grafy (křivky zpevnění a podíl smluvní meze kluzu a meze pevnosti) pro vzorky s úhlem válcování  $45^\circ$ . Maximální průměrná hodnota  $R_{p0,2} = 226$  MPa a  $R_m = 307$  MPa při rychlosti zatěžování 600 mm/min. Podle grafu 3 se s rostoucí rychlostí zatěžování blížil podíl smluvní meze kluzu a meze pevnosti k jedné, tudíž klesala zásoba plasticity. Hodnoty pružnosti v tahu se pohybovaly kolem 210 kN/mm.

### 9.1.3 Výsledky pro úhel válcování 90°

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty pro úhel válcování 90°

Úhel válcování = 90°								
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm]	$R_m$ [N/mm]	$A_g$ [%]	$A_{gt}$ [%]	n [-]	r [-]
<b>10 [mm/min]/ 0,0019 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	197,505	170	281	26,08	26,23	-	-
	2	215,574	155	288	29,40	29,52	0,227	2,282
	3	214,857	150	278	28,03	28,15	-	-
	4	209,782	145	264	28,11	28,23	0,241	2,307
	5	209,695	160	280	28,53	28,66	-	-
	6	203,360	165	281	25,02	25,15	-	-
	7	224,512	175	287	25,06	25,19	-	-
	8	213,622	169	288	25,25	25,38	-	-
	9	207,263	179	293	23,58	23,72	0,219	2,208
	Ø	210,686	163,11	282,22	26,56	26,69	0,229	2,266
	s	7,318	10,826	7,913	1,884	1,879	0,009	0,042
	<b>50 [mm/min]/ 0,0059 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	205,368	177	291	25,12	25,26	-
2		211,666	161	286	23,00	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	22,18	0,219	2,201
	8	202,550	175	298	24,32	24,53	0,221	2,179
	9	196,754	167	298	24,29	24,45	0,227	2,213
	10	195,756	203	301	23,09	23,25	0,216	2,278
	Ø	205,737	171,80	293,60	24,64	24,81	0,218	2,229
	s	7,742	25,258	5,851	3,864	3,850	0,007	0,040
<b>100 [mm/min]/ 0,0119 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	217,106	168	304	20,97	21,11	0,221	1,510
	2	203,257	199	310	21,46	21,63	0,205	1,601
	3	209,647	190	307	22,80	23,02	-	-
	4	218,065	205	318	19,38	19,53	-	-
	5	195,310	188	307	22,85	23,00	0,209	1,586
	6	209,768	205	299	20,09	20,23	-	2,252
	Ø	208,677	192,50	307,50	21,26	21,42	0,212	1,737
	s	8,581	12,790	5,795	1,286	1,303	0,007	0,299
<b>200 [mm/min]/ 0,0238 [s<sup>-1</sup>]</b>	1	201,590	191	287	21,34	21,49	0,225	2,266
	2	210,701	185	281	21,45	21,57	0,219	2,255
	3	213,542	227	309	20,24	20,38	-	-
	4	213,825	208	299	21,44	21,57	0,224	2,252
	5	197,939	201	290	22,75	22,90	0,218	2,260
	6	215,551	218	302	20,87	21,01	0,208	2,242
	Ø	208,858	205,00	294,67	21,35	21,49	0,219	2,255
	s	6,669	14,572	9,534	0,757	0,760	0,006	0,008

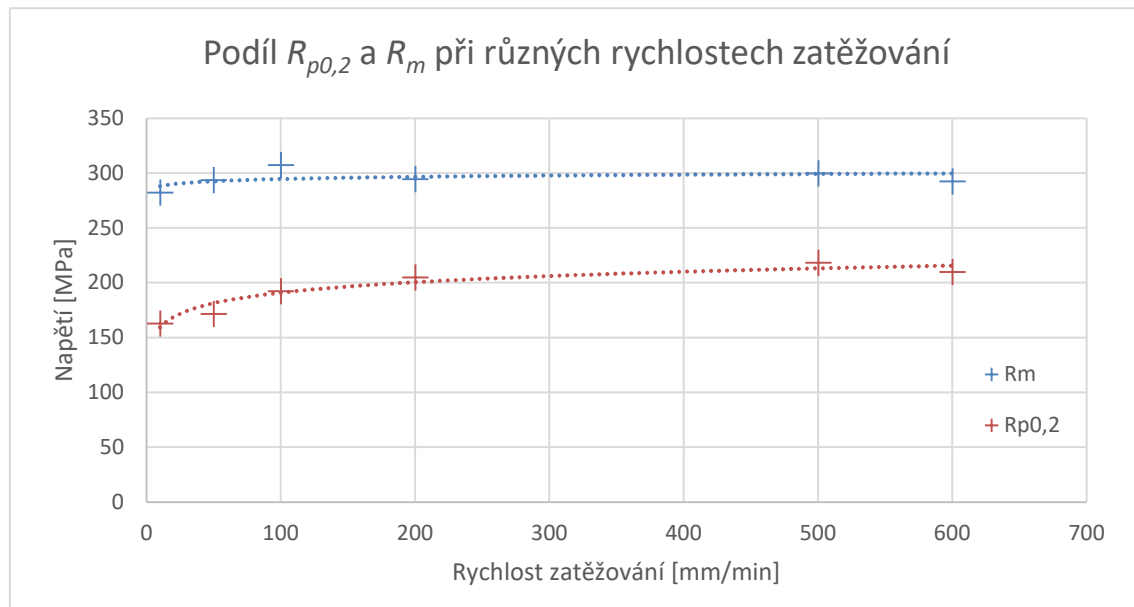
Úhel válcování = 90°								
Rychlost zatěžování/ deformace	Číslo vzorku	E [kN/mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm]	$R_m$ [N/mm]	$A_g$ [%]	$A_{gt}$ [%]	n [-]	r [-]
500 [mm/min]/ 0,0595 [s-1]	1	207,346	216	293	-	-	0,218	2,244
	2	209,479	200	288	19,42	19,56	0,227	2,251
	3	206,675	229	305	19,98	20,12	0,227	2,183
	4	197,300	223	300	18,93	19,08	0,221	2,257
	5	203,568	225	314	21,49	21,54	0,197	2,215
	Ø	204,874	218,60	300,00	19,96	20,08	0,218	2,230
	s	4,234	10,210	9,099	0,961	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	18,09	0,234	2,178
	3	207,712	206	288	18,24	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	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	24,85	0,184	2,231
	Ø	204,802	210,14	292,71	19,11	19,32	0,217	2,204
	s	8,047	9,877	6,452	2,499	2,636	0,016	0,033



Graf 6 - Křivky zpevnění pro úhel válcování 90°

*Tabulka 14 - Podíl  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro úhel válcování  $90^\circ$* 

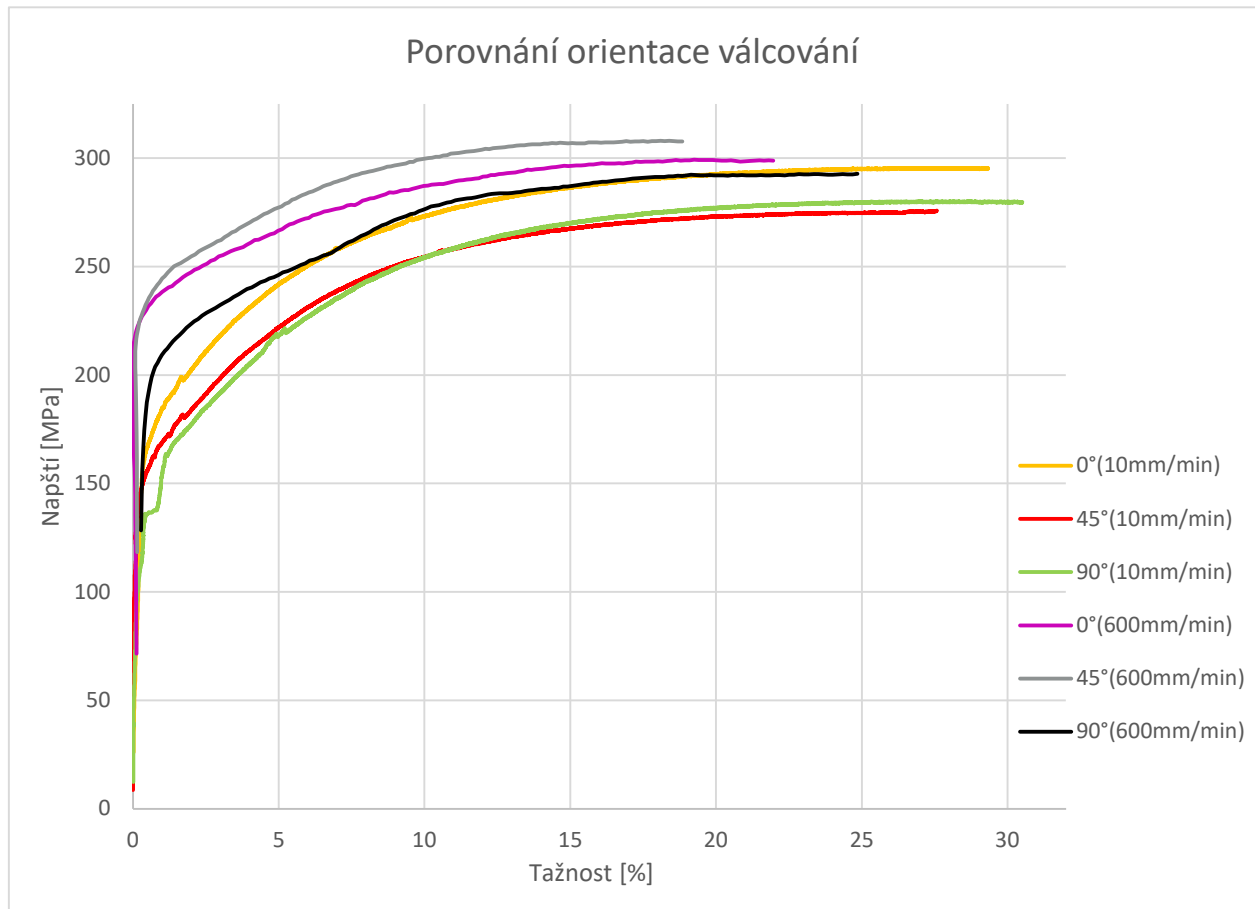
Rychlost zatěžování [mm/min]	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ [MPa]
10	282	163	0,578
50	294	172	0,585
100	308	193	0,626
200	295	205	0,696
500	300	219	0,729
600	293	210	0,718


*Graf 7 - Podíl  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro úhel válcování  $90^\circ$* 

Ze získaných hodnot (viz. tabulka 13) byly zkompletované grafy křivek zpevnění a podílu  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  pro orientaci válcování  $90^\circ$ . Hodnota exponentu deformačního zpevnění se průměrně pohybovala okolo 0,220. Maximální průměrná hodnota  $R_m = 308$  MPa při rychlosti zatěžování 100 mm/min a hodnota smluvní meze kluzu  $R_{p0,2} = 219$  MPa při rychlosti 500 mm/min. Součinitel plastické anizotropie byl u většiny rychlostí podobný a pohyboval se kolem hodnoty 2,22. Pouze při rychlosti zatěžování 100 mm/min průměrně činil 1,65.



### 9.1.4 Výsledné porovnání orientace válcování



Graf 8 - Porovnání orientace válcování

Pro lépe viditelný rozdíl orientací válcování byly v grafu 8 znázorněny pouze vzorky zatěžované rychlostí 10 a 600 mm/min. Největší zásoba plasticity byla zjištěna u vzorků válcovaných pod úhlem 0° a zatěžovaných rychlostí 10 mm/min. Tyto vzorky se také vyznačovali největší mezí pevnosti. Naopak nejmenší mez pevnosti byla naměřena u vzorků válcovaných pod úhlem 45°.

Při rychlosti zatěžování 600 mm/min byla největší mez pevnosti naměřena u vzorků válcovaných pod úhlem 45°. Naopak největší zásobu plasticity se vyznačovaly vzorky válcované pod úhlem 90°. U těchto vzorků byla ale naměřena nejmenší dosažená mez pevnosti.

## 9.2 Vyhodnocení

Z naměřených hodnot (viz tabulky 9, 10, 13) byly vytvořeny grafy křivek zpevnění pro jednotlivé úhly válcování a grafy znázorňující podíl smluvní meze kluzu a meze pevnosti. Z grafů vyplývá, že s rostoucí rychlostí zatěžování se zvyšuje smluvní mez kluzu i mez pevnosti, ale zároveň dochází ke zvýšení jejich podílů. Tato skutečnost má za následek, že při vyšších rychlostech zatěžování dochází k poklesu zásoby plasticity daného materiálu. Čím více se podíl smluvní meze kluzu a meze pevnosti blíží k jedné, tím je zásoba plasticity materiálu menší.

Všechny grafy 10, 12, 14 znázorňující podíl smluvní meze kluzu a meze pevnosti potvrzují, že s rostoucí rychlostí zatěžování se zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti a tím klesá zásoba plasticity. Ovšem ve všech případech byly maximální průměrné hodnoty meze kluzu a meze pevnosti dosaženy při různých rychlostech zatěžování. V případě zkušebních vzorků válcovaných pod úhlem  $0^\circ$  vyšly maximální hodnoty  $R_{p0,2} = 221$  MPa a  $R_m = 311$  MPa pro rychlost zatěžování 500 mm/min. U vzorků s úhlem válcování  $45^\circ$  byly maximální hodnoty  $R_{p0,2} = 226$  MPa a  $R_m = 307$  MPa pro rychlost zatěžování 600 mm/min. Poslední vzorek byl válcován pod úhlem  $90^\circ$  a maximální naměřená hodnota smluvní meze kluzu  $R_{p0,2}$  byla 210 MPa při rychlosti zatěžování 500 mm/min a hodnota meze pevnosti  $R_m$  byla 308 MPa při rychlosti zatěžování 100 mm/min.

## 10 Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřena na zjištění mechanických vlastností plechů s různou orientací válcování ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) vyrobených z oceli CR4. Plechy pro experiment dodala společnost ŠKODA AUTO. Tyto plechy byly měřeny pomocí zkoušky tahem při rychlostech zatěžování 10, 50, 100, 200, 500, 600 mm/min, aby se podmínky experimentu co nejvíce přiblížily reálnému tváření.

V teoretické části bylo nejprve popsáno rozdělení tvářecích procesů a způsob jejich vyhodnocení. Další kapitola byla zaměřena na zkoušku tahem a popisem mechanických vlastností, které je možné touto zkouškou vyhodnotit. Následně byl popsán optický měřicí systém ARAMIS, který funguje na principu DIC (digital image correlation) a slouží ke sledování průběhu deformace u zkušebního vzorku v reálném čase. Na závěr teoretické části bylo uvedeno chemické složení a mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí.

Experimentální část byla nejprve zaměřena na kalibraci systému ARAMIS a jeho propojení s trhacím zařízením. Kalibrace systému byla prováděna pomocí kalibrační destičky CP20 a spočívala v polohování destičky vůči kamerám dle uživatelského návodu, což je možné podrobněji vidět v tabulce 5. Propojení trhacího systému se systémem ARAMIS bylo provedeno přes převodníkový faktor. Jelikož systémy mezi sebou komunikují pouze napěťovým signálem, bylo nutné tomuto signálu přiřadit hodnotu síly.

Další část byla zaměřena na přípravu zkušebních vzorků z materiálu CR4. Konce plechů byly nejprve zbroušeny, aby se při zkoušce tahem předešlo prokluzu v upínacích hlavách stroje. Poté byly vzorky označeny podle orientace válcování a následně dojít k jejich odmaštění. K odmaštění bylo použité odmašťovač CL07 a technický líh ADR: 3 UN 1170. Tento proces byl velmi důležitý pro správnou soudržnost barevného nástřiku při deformaci. Pro aplikaci barevného nástřiku byly vyzkoušeny laky na akrylové bázi a laky na bázi vody. Při zkoušce tahem se daleko více prokázaly laky na bázi vody, neboť lépe držely při deformaci a jejich nanášení bylo jednodušší. Po přípravě vzorku proběhlo nastavení rychlosti snímání frekvence systému ARAMIS. Jelikož při měření zkoušky tahem je důležité získat co nejvíce dat před začátkem plastické deformace a těsně před lomem, tak byla nastavena vyšší rychlost frekvence než ve zbylých částech zkoušky tahem.

Vyhodnocení bylo prováděno na dvou systémech (ARAMIS a Test&Motion). Naměřené hodnoty z těchto systémů byly mezi sebou porovnány a následně z nich byly vytvořeny grafy křivek zpevnění, podílu  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  a graf porovnání orientace válcování.

Z těchto grafů je možné vidět, že s rostoucí rychlostí deformace se zvyšuje smluvní mez kluzu a mez pevnosti, ale čím více se podíl těchto vlastností blíží jedné, tím má materiál menší zásobu plasticity, a tudíž klesá tažnost. Naměřená data budou ve ŠKODA AUTO sloužit ke zpřesnění materiálové karty materiálu CR4.

Doporučením pro další výzkum je zaměření se na mechanické vlastnosti materiálu v závislosti na poloze svitku (začátek, střed, konec). Dle normy může být svitek svařen na dvou místech, proto by mohl vykazovat rozdílné mechanické vlastnosti. Nebo další varianta výzkumu je naměřit vlastnosti stejného materiálu, který má různé tavby a je od jiných výrobců.

## Seznam použité literatury

- [1] Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy). Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [2] PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. Výpočetní metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2000. [171] s. ISBN 80-7078-728-7.
- [3] LENFELD, Petr. Technologie II [online]. Liberec : Technická univerzita v Liberci. Katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovu a plastu, 2005 [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/index.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm)
- [4] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. Úvod do tváření I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-877-1.
- [5] TATÍČEK, František. Akademie tváření: Hluboké tažení. MMspektrum [online]. Praha, 2011, [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hlubo-ke-tazeni>
- [6] BASAK, Shamik, Sushanta Kumar PANDA a Myoung-Gyu LEE. Formability and fracture in deep drawing sheet metals: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets. International Journal of Mechanical Sciences [online]. 2020, 170 [cit. 2022-08-07]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2019.105346
- [7] BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9
- [8] TATÍČEK, František. Akademie tváření: Stríhání. MMspektrum [online]. Praha, 2010, [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-strihani>
- [9] ČADA, Radek. Technologie tváření a slévání–teoretický základ [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská–Technická univerzita, 2013 [cit. 2022-08-07]. ISBN 978-80-248-3015-5.
- [10] ZHAI, Ruixue, Xuehui DING, Shuman YU a Chungue WANG. Stretch bending and springback of profile in the loading method of prebending and tension. International Journal of Mechanical Sciences [online]. 2018, 144, 746-764 [cit. 2022-08-07]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.06.028

- [11] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. Nauka o materiálu I. a II.: cvičení. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [12] ČSN EN ISO 6892-1 - Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty
- [13] MACHEK, Václav. Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 139 s. ISBN 978-80-01-05527-4.
- [14] DOUBEK, Pavel. Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace. 2006. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci.
- [15] KHUDHAIR, Saleh, Maher K. TAHER a Mortda MOHAMMED. Strain rate effect on mechanical properties of 0.24% carbon steel using artificial neural network. International Journal of Mechanical Sciences [online]. 2021, 12 [cit. 2022-08-07]. ISSN 2214-7853. Dostupné z: [doi:doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.514](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.514).
- [16] KOTOUČ, Jiří. Teorie a metodika tváření: návody ke cvičení. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992. 84 s. ISBN 80-01-00842-8
- [17] TATÍČEK, František. Vliv materiálu na kvalitu výlisku. MMspektrum [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku>
- [18] Metrology systems [online]. GOM [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems.html>
- [19] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. In: Correlated Solutions [online]. s. 56 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [20] PAVEL, Krejsa. Stanovení křivek mezní tvářitelnosti pomocí zkoušky tahem a systému ARAMIS. 2020. Master's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [21] PAN, Bing, QIAN, Kemao, XIE, Huimin a Anand ASUNDI. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science and Technology [online]. 2009, 20(6), 062001- [cit. 2022-08-09]. DOI: 10.1088/0957-0233/20/6/062001. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/6/062001>

- [22] Metrology systems: ARAMIS for Education [online]. GOM [cit. 2022-08-09].  
Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/education/aramis-for-education.html>
- [23] DUCHÁČ, Alfred. Analýza tvařitelnosti uhlíkových ocelí. 2017. Bachelor's Thesis.  
České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [24] THYSENKRUPP. Product information deep-drawing steels DD,DC und DX., May  
2016, version 1
- [25] ARAMIS - Use Information - Hardware: GOM GmbH [online]. In: . [cit. 2022-08-09]  
Dostupné z: <https://www.gom.com/3d-software/gom-system-software/aramisprofessional.html>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdělení tvářecích procesů .....	- 4 -
Obrázek 2 - Popis hlubokého tažení plechů .....	- 7 -
Obrázek 3 - Rozdělení ohýbání .....	- 8 -
Obrázek 4 - Přeměna krystalické mřížky vlivem plastické deformace [ .....	- 9 -
Obrázek 5 - Diagram zkoušky tahem .....	- 10 -
Obrázek 6 - Zkušební tyč před a po zkoušce tahem .....	- 11 -
Obrázek 7 - Zásoba plasticity .....	- 12 -
Obrázek 8 - Teplotní mapa zkoušeného vzorku .....	- 14 -
Obrázek 9 - Sledování zvoleného bodu .....	- 15 -
Obrázek 10 - Princip dvourozměrné korelace .....	- 15 -
Obrázek 11 - Posuv fazety .....	- 15 -
Obrázek 12 - Výpočet korelační funkce .....	- 16 -
Obrázek 13 - Princip třírozměrné korelace .....	- 16 -
Obrázek 14 - Kamerový systém ARAMIS .....	- 17 -
Obrázek 15 - Zvolení správného patternu .....	- 17 -
Obrázek 16 - Barevný nástřík na vzorku .....	- 17 -
Obrázek 17 - Trhací zařízení .....	- 20 -
Obrázek 18 - Kalibrace systému ARAMIS .....	- 20 -
Obrázek 19 - Výsledky z kalibračního protokolu.....	- 23 -
Obrázek 20 - Výkres zkušební vzorku .....	- 25 -
Obrázek 21 - Zkušební vzorek po broušení.....	- 25 -
Obrázek 22 - Odmašťovadlo CL07 .....	- 26 -
Obrázek 23 - Vzorky po odmaštění.....	- 26 -
Obrázek 24 - Technický líh .....	- 26 -
Obrázek 25 - Akrylový lak (bílý) .....	- 27 -
Obrázek 26 - Akrylový lak (černý).....	- 27 -
Obrázek 27 - Lak na vodní bázi Montana .....	- 28 -
Obrázek 28 - Lak na vodní bázi belton.....	- 28 -
Obrázek 29 - Vzorek s akrylovým nástříkem.....	- 28 -
Obrázek 30 - Vzorek s nástříkem na bázi vody.....	- 28 -
Obrázek 31 - Snímací frekvence v průběhu zkoušky tahem .....	- 29 -
Obrázek 32 - Připravený vzorek pro měření .....	- 30 -



Obrázek 33 - Výsledné protokoly (vlevo Test&Motion, vpravo ARAMIS)..... - 31 -

## Seznam grafů

Graf 1 - Kalibrace ARAMIS - analog .....	- 23 -
Graf 2 - Křivky zpevnění pro úhel válcování 0° .....	- 33 -
Graf 3 - Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ pro úhel válcování 0° .....	- 34 -
Graf 4 - Křivky zpevnění pro úhel válcování 45° .....	- 36 -
Graf 5 - Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ pro úhel válcování 45° .....	- 37 -
Graf 6 - Křivky zpevnění pro úhel válcování 90° .....	- 39 -
Graf 7 - Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ pro úhel válcování 90° .....	- 40 -
Graf 8 - Porovnání orientace válcování .....	- 41 -

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Vliv exponentu deformačního zpevnění na tvářitelnost materiálů [17].....	- 13 -
Tabulka 2 - Chemické složení hlubokotažných ocelí .....	- 18 -
Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti hlubokotažných ocelí.....	- 18 -
Tabulka 4 - Parametry trhačích zařízení LabTest Model 5.100SP1.....	- 19 -
Tabulka 5 - Postup kalibrace kamer ARAMIS [25] .....	- 21 -
Tabulka 6 - Převodníkový faktor .....	- 23 -
Tabulka 7 - Vlastnosti CR4 dle VW 50065 a VDA 239-100.....	- 24 -
Tabulka 8 - Chemické složení CR4 dle VW 50065 a VDA 239-100.....	- 24 -
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty pro úhel válcování 0° .....	- 32 -
Tabulka 10 - podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ pro úhel válcování 0° .....	- 34 -
Tabulka 11 - Naměřené hodnoty pro úhel válcování 45° .....	- 35 -
Tabulka 12 - Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ pro úhel válcování 45° .....	- 37 -
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty pro úhel válcování 90° .....	- 38 -
Tabulka 14 - Podíl $R_{p0,2}$ a $R_m$ pro úhel válcování 90° .....	- 40 -



## Seznam použitých programů

Autodek AutoCAD 2021

Microsoft Office Word 2021

Microsoft Office Excel 2021

## Seznam příloh

Příloha 1 - Kalibrace kamer ARAMIS

Příloha 2 - ARAMIS – analog