



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta strojní



# Zjištění vlivu deformace na změnu tvrdosti

## Bakalářská práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství

*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:* **Daniel Čtvrtečka**

*Vedoucí práce:* Ing.et .Bc. Jiří Sobotka, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel Čtvrtečka**  
Osobní číslo: **S16000404**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Zjištění vlivu deformace na změnu tvrdosti**  
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Základy deformačního chování materiálu (zpevnění, odpevnění, mechanismy plastické deformace).
2. Metody měření tvrdosti kovových materiálů.
3. Experimentální zjištění vlivu velikosti deformace na změnu tvrdosti testovaného materiálu.
4. Vyhodnocení výsledků měření a doporučení pro další výzkum.
5. Závěr.

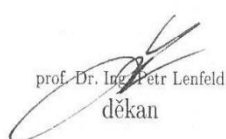
Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**  
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

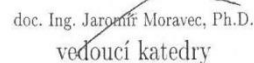
- [1] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.  
[2] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.  
[3] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. s. 350. ISBN 80-7204-130-4.  
[4] PÓHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. s. 226. ISBN 3-540-50651-9.  
[5] HERTZBERG, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie  
Konzultant bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



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

V Liberci dne 1. listopadu 2016

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tom-to případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. et. Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, cenné připomínky a obětavost při tvorbě této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům za neustálou podporu po dobu mého studia.

## Anotace

Cílem této bakalářské práce bylo nejenom zjištění vlivu deformace na tvrdosti materiálu, ale také sledování vlastního rozložení a průběhu tvrdosti na daném zkušebním materiálu (opět s vlivem deformace). V teoretické části je popsáno deformační chování materiálu, poruchy krystalové mřížky, základní mechanické zkoušky a zkoušky tvrdosti. Experimentální část je následně zaměřena na vlastní měření hodnot tvrdosti zkušebního materiálu pomocí metody dle Vickerse (HV<sub>2</sub>) v závislosti na deformaci vzorků. Naměřené hodnoty a sledování nárůstu hodnot tvrdosti v závislosti na velikosti skutečného přetvoření bylo vyhodnoceno pomocí tabulek a grafů. Zejména bylo sledováno rozložení tvrdosti v oblasti homogenní a nehomogenní (oblast krčku) deformace. Základní naměřené a popsané skutečnosti jsou nakonec shrnuty v závěru.

### **Klíčová slova**

Zkoušky tvrdosti, HV, deformační chování materiálu, deformace, skutečné přetvoření

## Annotation

The purpose of this bachelor thesis was not only to find the influence of deformation on the material hardness, but also to monitor the own distribution and course of hardness on the given material (again in dependence on deformation). In the theoretical part are described deformation behavior of material, crystal lattice defects, basic mechanical tests and hardness test. The experimental is subsequently focused on the determination of the tested material hardness values acc. to Vickers (HV<sub>2</sub>) in dependence on the samples deformation. Measured values and basic monitoring of the hardness values increase in dependence on the true strain magnitude are evaluated by means of tables and graphs. Especially there was monitored hardness distribution in the area of homogenous and nonhomogeneous (necking area) deformation. Basic measured and described facts are finally summarized in conclusion.

### **Key words**

Hardness Tests, HV, Deformation Behavior of Material, Deformation, True Strain



## Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>8</b>
<b>2 Teoretická část.....</b>	<b>9</b>
2.1 Deformační chování materiálu .....	9
2.1.1 Elastická deformace .....	9
2.1.2 Plastická deformace .....	10
2.2 Poruchy krystalové mřížky .....	11
2.2.1 Čarové poruchy.....	11
2.3 Deformační zpevnění materiálu.....	13
2.3.1 Odpevnění deformačně zpevněného kovu.....	13
2.4 Mechanické statické zkoušky materiálu .....	14
2.5 Měření tvrdosti.....	17
2.5.1 Vrypové zkoušky .....	17
2.5.2 Zkoušky vnikací.....	17
2.5.3 Zkoušky dynamické .....	20
<b>3 Experimentální část.....</b>	<b>22</b>
3.1 Materiál zkušebních vzorků.....	22
3.2 Příprava zkušebních vzorků pro měření tvrdosti.....	23
3.3 Měření tvrdosti .....	25
3.4 Postup měření a naměřené hodnoty .....	26
3.4.1 Ukázka postupu měření na vzorku s 10% deformací.....	26
3.4.2 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek bez deformace.....	30
3.4.3 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 10% deformací .....	31
3.4.4 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 20% deformací .....	32
3.4.5 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 30% deformací .....	33
3.4.6 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 40% deformací .....	34
3.4.7 Porovnání naměřených hodnot.....	35
<b>4 Závěr .....</b>	<b>38</b>
<b>5 Seznam použité literatury .....</b>	<b>39</b>

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení	Jednotky	Význam
$\vec{b}$	[1]	Burgesův vektor
A	[%]	Tažnost
$A_g$	[%]	Homogenní tažnost
$A_{80mm}$	[%]	Maximální tažnost
d	[mm]	Průměr vtisku
D	[mm]	Průměr vnikací kuličky
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
F	[N]	Zatěžující síla
$F_{max}$	[N]	Maximální zatěžující síla
l	[mm]	Délka po zkoušce
$l_0$	[mm]	Původní délka
R	[MPa]	Smluvní napětí
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
S	[mm <sup>2</sup> ]	Zatěžovaný průřez
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Počáteční plocha průřezu
$S_U$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha průřezu po přetržení
u	[mm]	Střední délka úhlopříčky
Z	[%]	Kontrakce
$\Delta l$	[mm]	Prodloužení
$\Delta l_F$	[mm]	Maximální prodloužení po přetržení
$\varepsilon$	[1]	Poměrné prodloužení
$\varphi$	[1]	Skutečná (logaritmická) deformace



# 1 Úvod

Tvrдость patří mezi nejdůležitější základní mechanické vlastnosti materiálu. Je definována jako odpor tělesa proti vnikání cizího tělesa. Díky tvrdosti materiálu lze určit i jeho další mechanické vlastnosti (např. pevnost materiálu).

Cílem této bakalářské práce bylo nejenom zjištění vlivu deformace na tvrdosti materiálu, který byl ve formě tenkých ocelových plechů, ale také sledování rozložení a průběhu tvrdosti zkušebního materiálu v závislosti na příslušné deformaci.

Měření tvrdosti zkušebních vzorků probíhalo na tvrdoměru Qness – Q30 (Obr. 1). Tvrдость byla zjištěna za pomoci metody podle Vickerse. Tato metoda patří mezi zkoušky vnikací. Vnikacím indentorem je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou podstavou a vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Jedná se o metodu přesnou a z hlediska přípravy povrchu nenáročnou. Další metody sloužící k určení tvrdosti materiálu se rozlišují dle charakteru zatěžovací síly na statické a dynamické, či vnikací, vrypové a odrazové.

Výstupem bakalářské práce je vyhodnocení a porovnání naměřených hodnot tvrdostí pro dané zkušební vzorky s odstupňovanou mírou deformace. Tato data jsou také popsána zejména s ohledem na změny tvrdosti v oblasti krčku za pomoci příslušných grafů. Z nejdůležitějších naměřených hodnot jsou nakonec vyvozeny příslušné závěry a také doporučení pro další výzkum. [1]



**Obr. 1** Univerzální tvrdoměr Qness [2]

## 2 Teoretická část

Teoretická část se zaměřuje na deformační chování materiálu, rozdělení poruch krystalové mřížky s důrazem na popis čárových poruch (dislokací).

### 2.1 Deformační chování materiálu

Deformace je definována jako proces, při kterém dochází ke změně tvaru mřížky. Změna se projevuje tvarovou obměnou bez vzniku trhlin. Na rozdíl od napětí je deformace viditelná a měřitelná. Rozsah deformace znázorňuje posuv jednotlivých atomů oproti sousedním bodům v daném tělese. Tento proces zapříčiňuje změnu tvaru tělesa.

Deformace se rozděluje dle povahy na pružnou (elastickou) a plastickou (trvalou). Základními mechanismy pružné deformace jsou skluz a dvojčatění. Dominujícím mechanismem je ten mechanismus, který pro své uskutečnění vyžaduje menší energii. Ve většině případů se za běžných podmínek jedná o skluz. [11] [13]

#### 2.1.1 Elastická deformace

Elastická deformace se definuje tak, že při zatížení tělesa a jeho odlehčení nedochází ke změně tvaru. Těleso se vrací do původního tvaru a rozměru. Při elastické deformaci je umožněn relativně malý posun atomů kolem jejich rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Výsledná síla na atomy působí v bezprostředním okolí rovnovážné polohy v krystalové mřížce, tudíž je možné určit přibližnou přímkovou závislost. Přímkovou závislost nejlépe vystihuje Hookeův zákon (1), kde jeho směrnici přímky je Youngův modul pružnosti  $E$  [MPa]. Hookeův zákon popisuje pružnou deformaci materiálu působením síly, za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí. Deformace je přímo úměrná napětí materiálu. [11]

#### Hookeův zákon

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

Kde:

$E$  - Youngův modul pružnosti v tahu [MPa],

$\varepsilon$  - poměrné délkové prodloužení [1],

$\sigma$  - mechanické napětí [MPa].

## 2.1.2 Plastická deformace

Plastická deformace je proces, při kterém změna tvaru přetrvává i po působení síly, která tuto deformaci vytvořila. Svou roli zde sehrává i napětí, které musí vzrůst nad určitou hodnotu (mez kluzu  $R_e$  [Mpa]). Při tváření kovů předchází plastické deformaci deformace elastická neboli pružná. Plastická deformace svým způsobem znamená pohyb jednotlivých atomů kovů vůči sobě, aniž by mezi nimi přestala působit koheze neboli adheze. Tato vlastnost dovoluje zpracovávat kovy technologickým způsobem tvářením (působením síly). Vznik plastické deformace lze vysvětlit pomocí mechanismu dislokační teorie, to znamená pohybem a vznikem mřížkových poruch, zejména hlavním vznikem dislokací. Hustota dislokací ovlivňuje pevnost kovu. Tvářením se počet dislokací zvětšuje a tím i odpor proti deformaci, tím dochází ke zpevnění a zvýšení pevnosti materiálu. [14] [15]

### Mechanismy plastické deformace

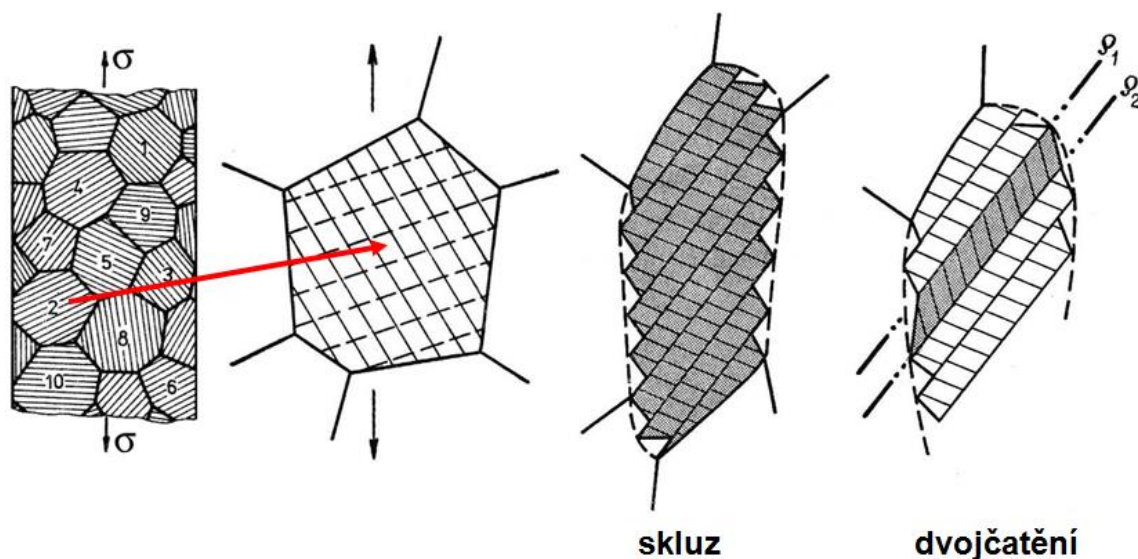
Rozeznáváme dva základní mechanismy plastické deformace – plastická deformace skluzem a dvojčatěním.

#### Plastické deformace skluzem

Skluzové mechanismy plastické deformace jsou amorfní, translační a složitý skluz. Mechanismy jsou ovlivňovány napětím, tudíž se rozvíjí ten mechanismus plastické deformace, který při daných podmínkách vyžaduje nejmenší skluz. U skluzového mechanismu se nadbytečná vrstva atomů pohybuje ve směru působícího napětí až vystoupí na povrch, pokud se nezachytí o překážky uvnitř krystalu. Atomy se posunují proti sobě, nikoliv však současně. Při zastavení pohybu dislokací je potřeba zvýšit napětí. Při tváření za studena kov klade stále větší odpor a dochází ke zpevnění. Přesuny atomů vážnou, tvárnost kovu se vyčerpává a může dojít k porušení materiálu. [14]

#### Dvojčatění

Dvojčatěním nastává nevratná změna krystalu. Jedná se o druhý nejvýznamnější mechanismus plastické deformace. Krystalová dvojčata vznikají i mechanickým účinkem vnějších sil při určité koncentraci napětí. V tomto případě hovoříme o mechanickém dvojčatění krystalu. Při tomto procesu jsou nejdůležitějšími faktory teplota a rychlost účinku vnější síly. S klesající teplotou a zvětšující se rychlostí silového působení pravděpodobnost vzniku krystalových dvojčat roste. [16]



Obr. 2 Schéma deformací skluzem a dvojčatěním

## 2.2 Poruchy krystalové mřížky

Stavba krystalové mřížky není v reálných kovech dokonalá. Podle velikosti a tvaru krystalografické neuspořádanosti atomů rozeznáváme následující mřížkové poruchy:

- |              |   |
|--------------|---|
| - Bodové     | - vakance, intersticie, substituce              |
| - Čárové     | - hranové, šroubové, kombinované                |
| - Plošné     | - vrstevné vady, hranice zrn, subzrn, dvojčatní |
| - Prostorové | - hranice krystalů, vměstky, amorfnní částice   |

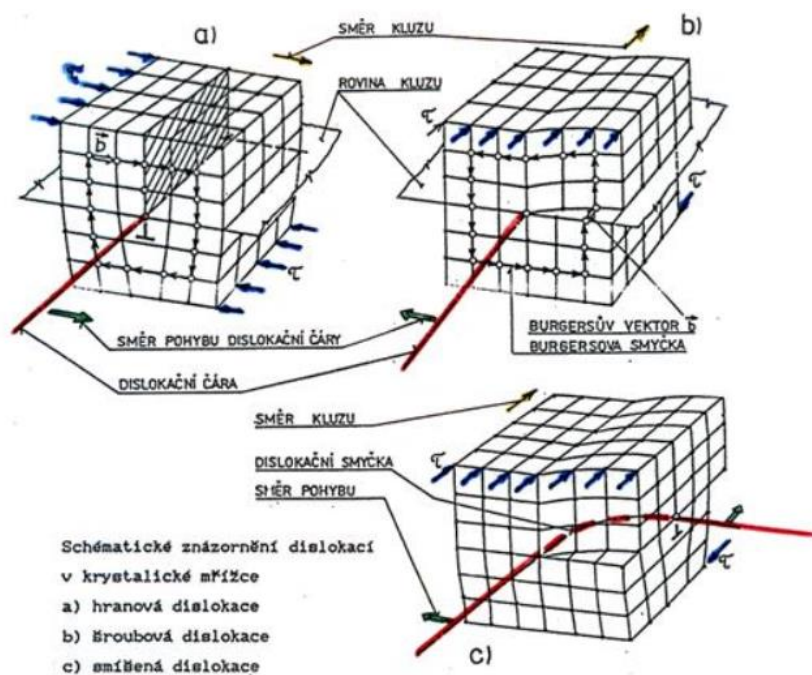
Z hlediska vlivu na plastickou deformaci jsou nejdůležitější čárové poruchy (dislokace).

### 2.2.1 Čárové poruchy

Z hlediska teorie plastických přetvoření mají největší vliv a význam právě poruchy čárové (dislokace). Dislokace jsou poruchy, které se projevují vysunutím atomů z pravidelných poloh krystalové mřížky a mohou se pohybovat, vznikat i zanikat. Dislokace během tváření mohou vznikat krystalizací kovů, růstem zrn do bloků, či změnou shluku vakancí na dislokace.

Obecně rozeznáváme typy dislokací hranové a šroubové, resp. kombinované. O charakteru dislokací rozhoduje vektor vzájemného posunutí, který se nazývá Burgersův

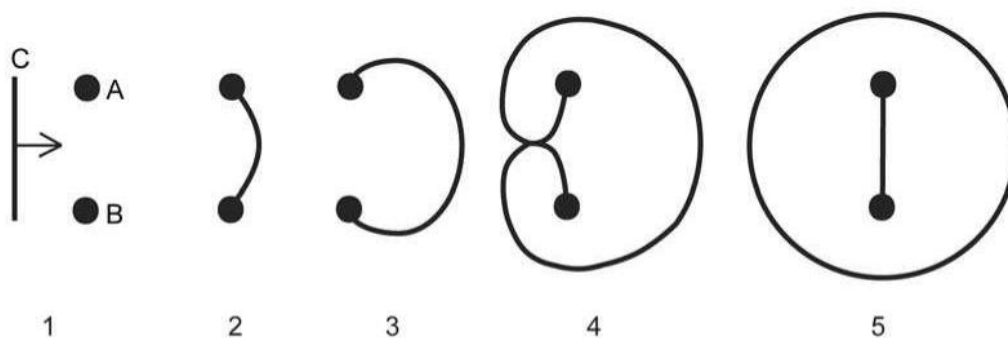
vektor  $\vec{b}$  a dále jeho vzájemná poloha vůči dislokační čáře (Obr. 3). Burgesův vektor je roven nejkratší vzdálenosti atomů v neporušené mřížce. Podle úhlu, který svírá Burgesův vektor s dislokační čarou rozeznáváme dislokaci hranovou či čarovou. Pro dislokace hranové je Burgesův vektor kolmý k dislokační čáře (Obr. 3), zatímco k šroubovým dislokacím je Burgesův vektor rovnoběžný s dislokační čarou. Pohyb dislokací je buď skluzový nebo difúzní (šplhání). Pohyb skluzem je uskutečněn tehdy, kdy se dislokace pohybuje v rovině skluzu za působením napětí. Rychlost pohybu závisí na typu krystalové mřížky a na množství poruch, neboť kritické skluzové napětí (napětí k vyvolání pohybu) je tím vyšší, čím více poruch brání pohybu (hranice zrn, počet dislokací). Difúzní pohyb je naopak pomalý pohyb spojený s vakancemi a intersticiálními atomy, které jsou závislé na teplotě a napětí. Čarové poruchy probíhají mřížkou podél určité čáry a lze je považovat za jednorozměrné. [3] [4] [14]



Obr. 3 Rozdělení dislokací

## 2.3 Deformační zpevnění materiálu

K deformačnímu zpevnění dochází, jestliže se kovový materiál plasticky deformuje. Tento proces převládá při tváření za studena, což znamená, že teplota je nižší, než je teplota rekrystalizace. Teplota rekrystalizace  $T_{\text{Rek}}$  [K] je empiricky stanovená na 35-40 % teploty tání daného kovu. Při plastické deformaci dochází ke skluzu dislokací, ale také vznikají nové dislokace z různých zdrojů (např. růstová spirála, srůst na malouhlových hranicích, Frank Readův zdroj). Při určitém stupni plastické deformace si dislokace začnou vzájemně překážet ve skluzovém pohybu, který je tak čím dál obtížnější a navenek se projeví v deformačním zpevněním materiálu. Takový materiál je již obtížně tvářitelný. [1] [5] [19]



A, B – překážky pohybu dislokace, C – skluz dislokace, 2,3,4 – prohýbání dislokace, 5 – vznik nové dislokační smyčky

**Obr. 4** Frank-Readův zdroj dislokací

### 2.3.1 Odpevnění deformačně zpevněného kovu

Deformační zpevnění je stav se zvýšenou vnitřní energií. Tato energie byla do materiálu vložena při jeho tváření a projevuje se vysokou koncentrací strukturních poruch. V řadě případů je deformační zpevnění nežádoucí. Tento problém nastává, pokud má být kov dále tvářen. Při tváření za studena odpevnění prakticky neprobíhá, proto se materiál zpevňuje. Při tváření za tepla naopak probíhá odpevnění okamžitě, tudíž nedochází ke zpevnění materiálu. Cílem odpevnění je minimalizovat vnitřní energii materiálu, přičemž dojde ke snížení koncentrace poruch. Odpevnění má tři stádia (zotavení a polygonizace, primární rekrystalizace, sekundární rekrystalizace). [5] [19]

## Zotavení

První stádium odpevnění je zotavení a polygonizace. K zotavení dochází u čistých kovů při teplotách od cca  $0,25 T_{\text{tání}}$  [K]. Při zotavení zůstává zachována původní deformační textura, nevznikají nová nedeformovatelná zrna. Dochází zejména ke snížení koncentrace bodových poruch a anihilací. [19]

## Primární rekrytalizace

Druhé stádium odpevnění je primární rekrytalizace, která u technicky čistých kovů začíná při teplotách cca  $0,4 T_{\text{tání}}$  [K]. V tomto stádiu již vznikají z původně deformovaných zrn nová nedeformovaná zrna polyedrických tvarů s nízkou koncentrací poruch. S procesem rekrytalizace je spojen výrazný pokles meze kluzu, meze pevnosti, tvrdosti materiálu, avšak nárůstu tažnosti materiálu. [19]

## Sekundární rekrytalizace

Třetí stádium zotavení je sekundární rekrytalizace. Velké krystaly rostou na úkor malých. Struktura se stává hrubozrnnou oproti výchozí struktuře před deformací. Tento proces je způsoben setrváním na rekrytalizační teplotě a neustálým dodáváním energie. Dochází k požírání deformované struktury, což je žádoucí, avšak neukončení tohoto procesu dochází k neustálenému růstu zrn.

## 2.4 Mechanické statické zkoušky materiálu

Mechanické statické zkoušky hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu spojitě se měnících sil. Zkušební těleso se zatěžuje zpravidla jen jednou, a to až do porušení. Měříme velikost zatěžující síly a odpovídající deformaci. Rozdělují se nejčastěji dle druhu namáhání na zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem nebo stříhem.

### Výpočtové vzorce nejdůležitějších veličin statických zkoušek

#### Poměrné prodloužení $\varepsilon$ [1]

Poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [1] je dáno podílem přírůstku délky a původní délky (viz. vzorec 2): [1] [7]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [1] \quad (2)$$

Kde:

$\varepsilon$  - poměrná deformace v podélném směru [1],

$\Delta l$  - prodloužení [mm],

$l_0$  - počáteční délka zkušební vzorku [mm].

### Tažnost A [%]

Tažnost A [%] je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech ve specifických bodech (okamžik porušení vzorku – celková tažnost, mez pevnosti – homogenní tažnost) – viz vzorec (3). Tažnost nám udává tvárnost daného materiálu. Na výslednou hodnotu tažnosti má také vliv délka zkušební tyče. Kratší zkušební vzorky mají tažnost větší. [1]

$$A = \frac{\Delta l_F}{l_0} \cdot 100 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Kde:

$\Delta l_F$  - maximální prodloužení při přetržení [mm].

### Kontrakce

Kontrakce Z [%], neboli zúžení profilu, je dána rozdílem ploch průřezu před a po zkoušce děleného původní plochou průřezu. U křehkých materiálů dojde k porušení téměř bez kontrakce. Kontrakce je ukazatelem tvárnosti a houževnatosti materiálu při prostorové napjatosti. [1] [7]

$$Z = \frac{S_0 - S_U}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

Kde:

$S_0$  - počáteční plocha průřezu [mm<sup>2</sup>],

$S_U$  - plocha průřezu po přetržení [mm<sup>2</sup>].



### Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]

Mez pevnosti v tahu  $R_m$  je dána hodnotou smluvního napětí, které je dáno podílem maximální zatěžující síly, která působí porušení a původní plochy průřezu. [1]

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Kde:

$F_{max}$  - maximální zatěžující síla [N],

$S_0$  - původní průřez zkušební tyče [mm<sup>2</sup>].

### Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$ [MPa]

Obecně je mez kluzu smluvní napětí, při kterém se zkušební tyč začne výrazně prodlužovat bez nárůstu zatěžující síly. Tato hodnota pro některé materiály je špatně určitelná. Proto je stanovena takzvaná smluvní mez kluzu. Smluvní mez kluzu definuje napětí, které vyvolá trvalé prodloužení zkušební tyče, její hodnota je nejčastěji 0,2 %. [7]

### Mez úměrnosti [MPa]

Mez úměrnosti ohraničuje oblast pružných (elastických) deformací materiálu. Do této hodnoty smluvního napětí platí Hookův zákon, tedy platí přímá úměrnost mezi napětím a prodloužením. [1] [7]

### Skutečná deformace

U velkých deformací dochází k značné odlišnosti okamžitého stavu zatěžovaného tělesa a výchozího stavu, proto vyjádření poměrnou deformací a smluvním napětím není dostatečně výstižné a přesné. Proto se používá skutečná deformace a skutečné napětí. [1]

### Skutečná deformace $\varphi$ [1]

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Kde:

$\varphi$  - skutečná (logaritmická) deformace [1]

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1]

## 2.5 Měření tvrdosti

Tvrdot je důležitá mechanická vlastnost, která je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti jsou v praxi velmi často používané pro svoji jednoduchost a rychlost provedení. Jsou vhodné jak pro zkoušení malých vzorků, tak i pro rozměrné kusy. Nedochází k porušení materiálu a nepatrně ovlivní pouze malý objem na povrchu. Tvrdot často slouží jako výchozí hodnota pro odhad ostatních mechanických vlastností.

### Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti se dělí podle použitého principu na metody vrypové, odrazové a vnikací. Nejvýznamnější a nejčastěji užívané jsou zkoušky vnikací. Dále se rozdělují dle rychlosti působení síly na statické a dynamické. Mezi zkoušky statické patří především vnikací metody a mezi dynamické zkoušky patří zkoušky odrazové, Poldi kladívko. Podle účelu měření se dělí na zkoušky makrotvrdoti a mikrotvrdoti. [1]

#### 2.5.1 Vrypové zkoušky

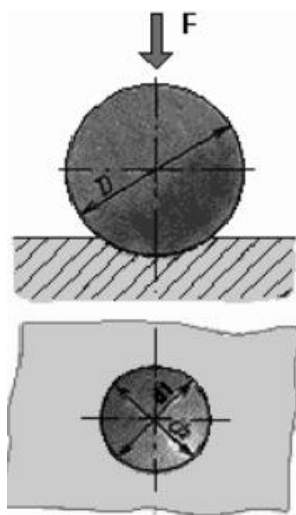
Vrypové zkoušky jsou založeny na principu Moshovy stupnice tvrdosti minerálů. Tato zkouška se využívá pouze pro křehké a tvrdé materiály (např. sklo, porcelán). Užívá se zkouška podle Martense a označuje se HMa. Tvrdot je zjišťována přitlačováním kuželového diamantového hrotu měnitelnou silou na leštěný povrch zkušební vzorku, kterým je pohybováno. Mírou tvrdosti je síla, která vytvoří vryp široký 0,01 mm. Další možností je použití stejné přitlačné síly a následně se porovnává šířka vrypů u měřených vzorků. Tento postup měření je nepřesný. [1] [7]

#### 2.5.2 Zkoušky vnikací

Zkoušky vnikací patří mezi nejrozšířenější zkoušky. Realizují se na principu vtlačování indentoru do povrchu zkoušeného materiálu. Indentor má pro každý typ zkoušky přesně definovaný rozměr a tvar. Nejpoužívanější tvary indentorů jsou jehlan, kulička a kužel. Měřítkem tvrdosti bývá velikost vzniklého vtisku. Zkoušky vnikací jsou přesné a dobře reprodukovatelné. [1]

## Zkouška vnikací podle Brinella

U této zkoušky je vnikací indentor kulička, která se vtiskne určitou silou do zkušebního materiálu. Tvrdost podle Brinella se označuje HB. Pro měkké materiály do 450HB se užívá ocelově kalená kulička. Při předpokladu vyšší tvrdosti materiálu se používá kulička ze slinutého karbidu. Výsledek zkoušky je ovlivněn velikostí zatížení pro daný průměr kuličky, dobou zatížení a velikostí vtisku s ohledem na rozměry zkoušeného předmětu. Zatěžovací síla je volena tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí 0,25x až 0,6x násobku průměru vnikací kuličky. Běžně volené násobky jsou pro ocel 30, pro neželezné kovy 10 a pro měkké materiály 2,5. Doba zatížení je dána normou. Pro oceli a litiny je doba zatížení 10 s. U měkčích materiálů (např. olovo, zinek) se doba zatížení prodlužuje do té doby, až není možné pozorovat u materiálu kluz. Vnikací zkouška podle Brinella je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů. Tuto zkoušku lze použít i na odlitky. [1] [7]



Obr. 5 Schéma zkoušky podle Brinella

### Výpočet tvrdosti podle Brinella

$$HB = \frac{0,102F}{\frac{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}} \quad [1] \quad (7)$$

Kde:

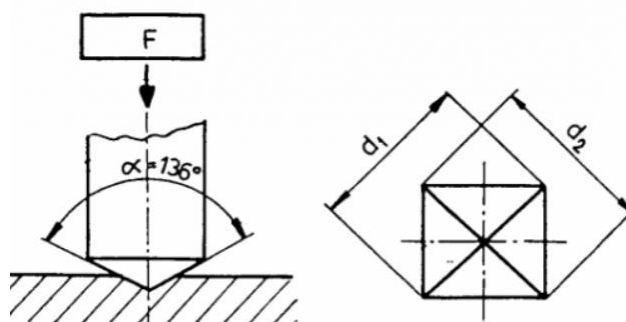
F	-	zatěžující síla	[N],
S	-	plocha vtisku	[mm <sup>2</sup> ],
D	-	průměr vnikací kuličky	[mm],
d	-	průměr vtisku	[mm].

## Zkouška vnikací podle Rockwella

Vnikací zkouška podle Rockwella užívá vnikací indentor diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  popřípadě ocelovou kuličku. Tato zkouška se značí HR, ale je nutné uvést stupnici Rockwellovy tvrdosti, která je závislá na typu vnikacího tělesa a velikosti maximálního zatížení. Mezi nejčastěji používané patří HRA, HRB, HRC. U stupnice tvrdosti HRA je vnikacím indentorem diamantový kužel, který má maximální zatížení 600 N. Využívá se pro křehké materiály a tenké povrchové vrstvy. Při HRB se užívá ocelová kulička s maximálním zatížením 1000 N. Tato metoda se uplatňuje pro měkké kovy. Metoda HRC používá diamantový kužel, který snese maximální zatížení 1500 N. Používá se pro materiály s tvrdostí v rozmezí 20÷67 HRC. Maximální hloubka vtisku je 0,2 mm. V této hloubce je Rockwellova tvrdost HRA a HRC rovná nule. Maximální hodnota tvrdosti HRA a HRC je 100. Rockwellova zkouška je velmi rychlá a jednoduchá, tudíž je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií. [1] [7] [9]

## Zkouška vnikací podle Vickerse

Vnikací zkouška podle Vickerse je založená na stejném principu, jako zkouška podle Brinella. Vnikací indentor je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Velikost vrcholového úhlu je zvolena proto, aby tření mezi vnikacím indentorem a zkušebním vzorkem ovlivňovalo výsledek zkoušky co nejméně. Vnikací zkouška podle Vickerse je velice přesná. Největší výhodou Vickersovy vnikací zkoušky je měření tvrdostí pro měkké i tvrdé materiály s jednotnou stupnicí. Tvrdost u této zkoušky se označuje HV. Pro určení tvrdosti se měří délka uhlopříček, pro které je pak užit vzorec aritmetického průměru. Tvrdost se určí pomocí tabulek, či je vypočtena ze vzorce. Hodnota tvrdosti je stejně jako u Brinellovy metody dána podílem zatěžující síly a plochy vtisku. Vickersova metoda není vhodná pro materiály s hrubou strukturou, kde by vzhledem k malým rozměrům vtisku mohlo dojít pouze k vytvoření vtisku v jedné struktuře. [1] [7] [9]



Obr. 6 Schéma zkoušky podle Vickerse

### Tvrдост podle Vickerse

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad [1] \quad (8)$$

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

Kde:

F - zatěžující síla [N]

u - střední hodnota úhlopříčky [mm]

### 2.5.3 Zkoušky dynamické

Dynamické zkoušky se vyznačují rychlým zatěžováním, které se mění buď skokem (rázem), nebo opakovaně v určitých cyklech. Při dynamickém namáhání dochází často k porušení soudržnosti materiálu, i když zatěžující síla zdaleka nedosahuje velikosti síly odpovídající statické pevnosti. Účel dynamické zkoušky je stanovit vlastnosti materiálu při působení dynamických sil. Rozdělují se na zkoušky elastické a plastické. Tvrđost u plastických zkoušek určujeme pomocí trvalých vtisků, zatímco u elastických zkoušek se tvrđost měří z pružných vlastností materiálu. Nejpoužívanější plastické zkoušky patří Baumannovo kladívko a Poldi kladívko. Pro elastické zkoušky jsou nejčastěji používané zkoušky tvrđosti podle Shorea a duroskop. [20]

#### Baumannovo kladívko

U Baumannova kladívka se dosahuje vtisku do zkušebního materiálu pomocí energie, která se vytvoří díky stlačené pružině. U této zkoušky je vnikacím indentorem kulička. Tato zkouška se využívá především pro odlitky. [21]

### **Poldi kladívko**

Principem zkoušky tvrdosti pomocí Poldi kladívka je porovnání známé pevnosti materiálu porovnávací tyčinky s pevností zkoušeného materiálu. Postup měření probíhá tak, že tvrdoměr přiložíme ke zkoušenému předmětu a kladívkem udeříme na úderník. Vnikacím indentorem je zde ocelová kulička, která se úderem kladívka zatlačí do zkušebního materiálu a vytvoří do něj vtisk. Zároveň se však kulička vtiskne i do porovnávací tyčinky. [21]

### **Zkouška tvrdosti podle Shorea**

Tato metoda zjišťuje tvrdost z velikosti odskoku závaží spuštěného z určité výše od zkušebního materiálu. Pro stanovení tvrdosti podle Shorea [HSh] se užívá Shoreův skleroskop. Tento způsob zjišťování hodnot tvrdosti se používá velmi zřídka, většinou jen pro měření tvrdosti velkých výrobků a konstrukcí. [21]

### **Duroskop**

Princip měření tvrdosti pomocí Duroskopu je nechat zkušební těleso padat z určitého úhlu kolmo na měřený povrch. Zkušební těleso se odrazí pod určitým úhlem. Tento úhel se změří a určí hodnota tvrdosti. [21]

### 3 Experimentální část

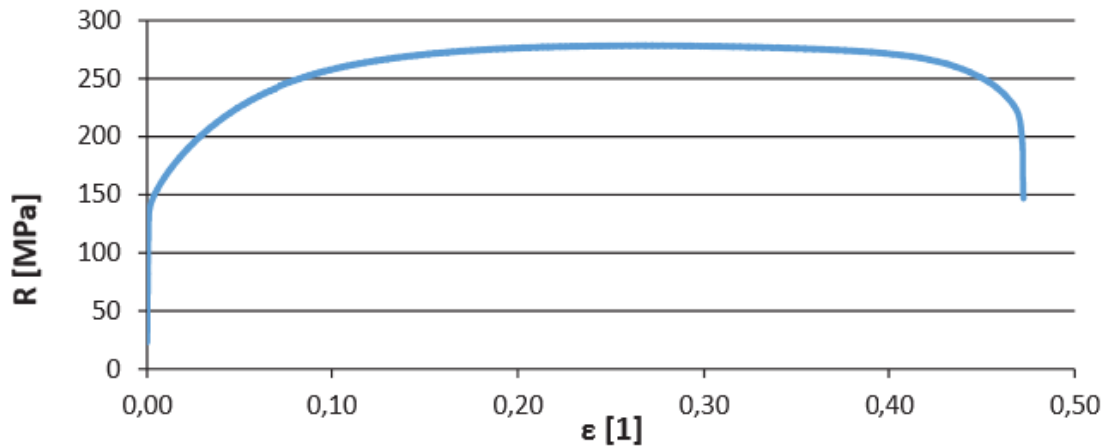
Cílem této bakalářské práce bylo nejenom zjištění vlivu deformace na tvrdost materiálu, který byl ve formě tenkých ocelových plechů, ale také sledování rozložení naměřených hodnot tvrdosti HV2 v důsledku rozdílných deformací (před-deformací) zkušebních vzorků. Zkušební vzorky byly použity ploché trhací tyče, které byly deformovány pomocí trhacího stroje. Měření tvrdosti probíhalo na těchto zkušebních vzorcích a zároveň došlo ke zkoumání rozložení tvrdosti na povrchu vzorku.

#### 3.1 Materiál zkušebních vzorků

Měření probíhalo na zkušebních vzorcích z hlubokotažného materiálu o označení DC05. Tento materiál se obecně nejvíce používá v automobilovém průmyslu na vnější části karosérie. Plechy z toho materiálu jsou vhodné zejména k středně hlubokému tažení, lakování, pokovování popř. smaltování. Pro vlastní experiment byly zkušební vzorky připraveny v jednom hlavním směru a to pro 0° vůči směru válcování. K získání mechanických vlastností zkušební vzorku byla provedena statická zkouška tahem. Statická zkouška tahem proběhla pro tři vybrané vzorky. Zkouška tahem proběhla na stroji TIRA test 2300 (Obr. 8). Výsledné mechanické vlastnosti zkušební materiálu DC05 ve směru 0° jsou uvedeny v Tab. 1.

**Tab. 1** Mechanické vlastnosti zkušebních materiálů DC05 ve směru 0° vůči směru válcování

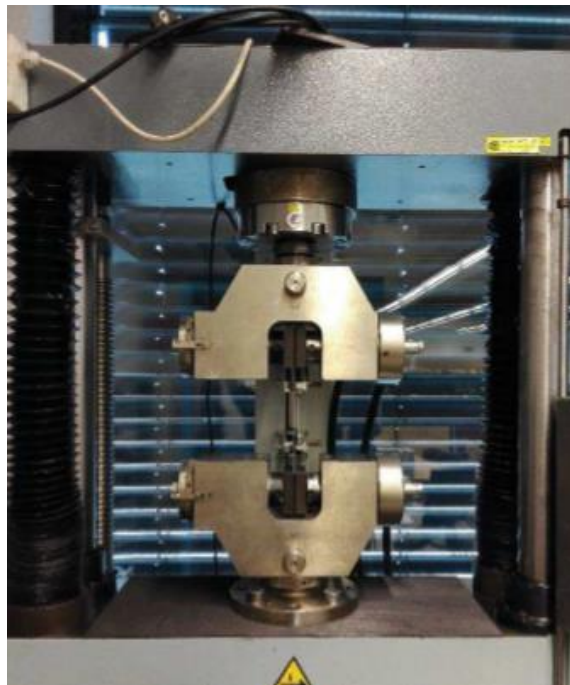
Číslo vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]
1.	146,4	278,5	26,2	47,2
2.	141,3	270,5	25,9	46,3
3.	142,7	270,6	26,9	45,3
$\bar{x}$	<b>143,5</b>	<b>273,2</b>	<b>26,3</b>	<b>46,2</b>



Obr. 7 Smluvní diagram pro zkušební materiál DC05 ve směru 0°

### 3.2 Příprava zkušebních vzorků pro měření tvrdosti

K dosažení požadovaných deformací na zkušebních vzorcích před měřením byl použit trhací stroj TIRA test 2300 (viz. Obr. 8).



Obr. 8 Trhací stroj TIRA test 2300

Zkušební vzorky (Obr. 9) byly pomocí trhacího stroje nataženy na hodnoty deformací 10 %, 20 %, 30 %, 40 % (Tab. 2). Měření tvrdosti proběhlo i na zkušebním



vzorku bez deformace. U zkušební vzorku, který byl deformován na 40 %, je znatelný krček. Tento jev naznačuje, že se již nejedná o homogenní deformaci. Počáteční délka zkušebních vzorků  $l_0$  byla rovna 80 mm (100 %).



a) 0 % deformace, b) 10 % deformace, c) 20 % deformace, d) 30 % deformace, e) 40 % deformace

**Obr. 9** Zkušební vzorky s deformací

**Tab. 2** Deformace vzorků (hodnoty poměrné deformace  $\varepsilon$  a absolutního prodloužení  $\Delta L$ )

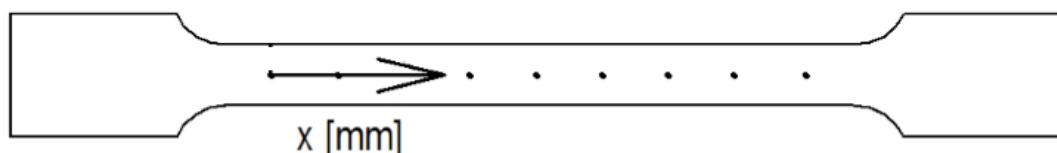
Vzorky	Deformace [%]	$\Delta L$ [mm]
<b>a</b>	0	0
<b>b</b>	10	13
<b>c</b>	20	25
<b>d</b>	30	35
<b>e</b>	40	44



Obr. 10 Tvrdoměr Qness – Q30 [2]

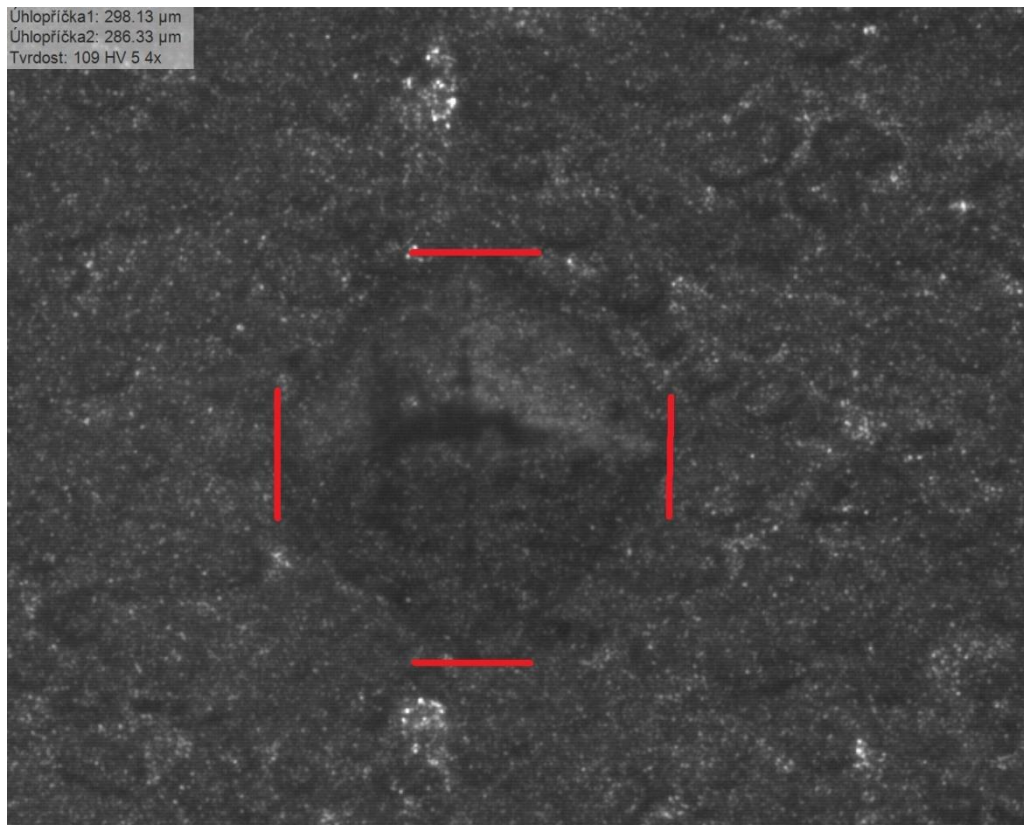
### 3.3 Měření tvrdosti

K určení hodnot tvrdosti na zkušebních vzorcích byla použita metoda podle Vickerse. Jak už bylo zmíněno, jedná se o vnikací zkoušku, kde vnikajícím indentorem je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou podstavou a vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Velikost zatěžovací síly se rovnala 2 kg. Doba zatížení byla 10 s. Tyto získané hodnoty tvrdosti pomocí metody podle Vickerse se označují jako HV2. Zjištění hodnot tvrdosti bylo prováděno na tvrdoměru značky Qness – Q30 (Obr. 10). Bylo nezbytné si rozvrhnout síť bodů, kde byl proveden vnik indentoru do zkušebního tělesa. Na zkušebním vzorku bylo deset měřících úseků. V každém úseku byly provedeny tři měření tvrdosti HV2. Pomocí vzorce pro výpočet aritmetického průměru byla určena střední hodnota tvrdost daného úseku (viz. Obr. 11).



Obr. 11 Znáznornění středních hodnot tvrdostí HV2 v příslušných úsecích

Tvrdoměr naměřil hodnoty tvrdosti HV2 zkušební vzorku dle zadaných souřadnic. Měření se uskutečnilo automaticky, avšak bylo nutné provést ruční nastavení uhlopříček vzniklých vpichů k zjištění výsledné tvrdosti HV2. Postup ručního nastavení je zobrazen na Obr. 12. Tento princip byl uplatněn u všech zkušebních vzorků.



**Obr. 12** Ruční nastavení uhlopříček k zjištění výsledné tvrdosti

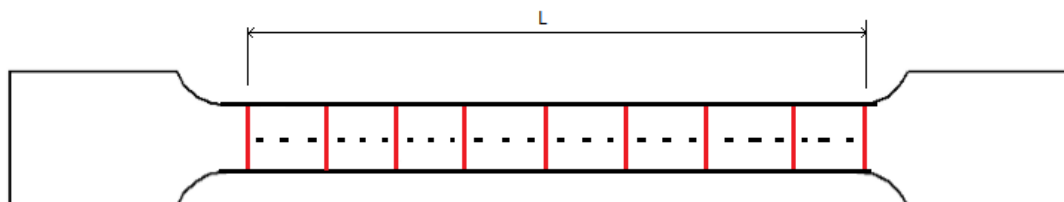
### 3.4 Postup měření a naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty tvrdosti HV2 pro zkušební materiály byly rozřazeny do tabulek podle stupňů deformace. K vyhodnocení příslušných hodnot bylo přistoupeno za pomoci tabulek a grafů. V grafech jsou zobrazeny hodnoty tvrdosti HV2 v závislosti na skutečném přetvoření pro každý úsek zvlášť. Tento způsob vyhodnocení byl použit na všechny zkušební vzorky.

#### 3.4.1 Ukázka postupu měření na vzorku s 10 % deformací

Celý postup měření je předveden na zkušebním vzorku s 10 % deformací. Tento popsaný postup měření byl následně aplikován na zbylé zkušební vzorky.

Prvním krokem bylo rozvržení sítě bodů na zkušební vzorku, kde došlo k měření tvrdosti HV2. Tyč byla rozdělena na osm úseků. Každý úsek byl rozdělen na tři body, ve kterých proběhlo měření tvrdosti (Obr. 13).



**Obr. 13** Schéma umístění bodů zkušební vzorku

Přesná poloha těchto bodů byla dána souřadnicemi - viz Tab. 3. Vlastní hodnoty byly vždy zvoleny dle naměřené délky úseku. Z tohoto důvodu se tyto souřadnice mírně liší.

**Tab. 3** Souřadnice bodů daného úseku

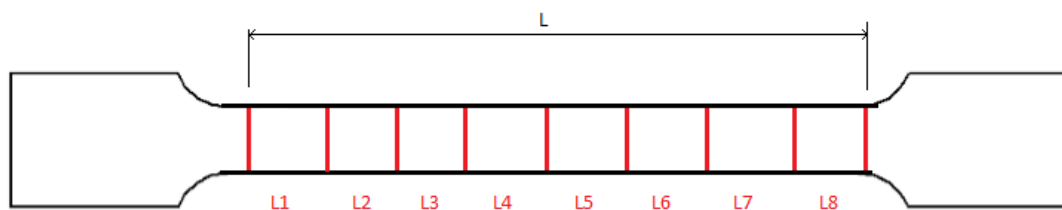
Úsek zkušební vzorku	Souřadnice bodů vpichu v daném úseku		
	První bod [mm]	Druhý bod [mm]	Třetí bod [mm]
L1	2,76	5,51	8,27
L2	2,74	5,48	8,21
L3	2,74	5,47	8,21
L4	2,74	5,48	8,23
L5	2,75	5,49	8,24
L6	2,74	5,49	8,23
L7	2,73	5,45	8,18
L8	2,73	5,47	8,20

V těchto souřadnicích byly změřeny hodnoty tvrdosti HV2 pro daný úsek. Výsledná hodnota tvrdosti pro daný úsek byla posléze spočítána a určena pomocí vzorce pro aritmetický průměr (viz. Tab. 4).

**Tab. 4** Hodnoty naměřených tvrdostí pro dané úseky

Úsek zkušebního vzorku	Hodnoty tvrdostí v souřadnicích			Výsledná hodnota tvrdosti pro daný úsek [HV2]
	První bod [HV2]	Druhý bod [HV2]	Třetí bod [HV2]	
L1	104	103	106	104
L2	101	102	101	101
L3	110	107	109	108
L4	110	111	112	111
L5	112	107	111	110
L6	109	110	109	109
L7	109	107	110	109
L8	107	107	108	107

Druhým krokem bylo změření délek daných úseků na zkušebním vzorku (Obr. 14). Jelikož se jednalo o zkušební vzorek s 10 % deformací, byly tyto délky následně použity k vypočítání velikosti hodnot skutečného přetvoření  $\varphi$  [1] pro dané úseky. Hodnoty délek daných úseků a skutečného přetvoření jsou zaznamenány v Tab. 5.



**Obr. 14** Schéma rozdělení zkušebního vzorku na úseky

Průměrná hodnota délky  $L_0$  zkušební vzorku bez deformace byla konstantní pro všechny výpočty. Její hodnota byla rovna 9,997 mm. Pomocí vzorce pro výpočet skutečného přetvoření (10) byly vypočítány jeho hodnoty pro dané úseky vzorku. Výsledné hodnoty skutečných přetvoření pro dané úseky jsou uvedeny rovněž v Tab. 5.

Skutečné přetvoření  $\varphi$  bylo vypočítáno podle vzorce:

$$\varphi = \ln \frac{L}{L_0} \quad [1] \quad (10)$$

Kde:

L - délka daného úseku [mm]

$L_0$  - průměrná hodnota délek úseků bez deformace [mm]

**Tab. 5** Hodnoty délek úseků pro zkušební vzorek s 10 % deformací

Úsek	Délka daného úseku L [mm]	Hodnota skutečného přetvoření $\varphi$ [1]
L1	11,020	0,097
L2	10,953	0,091
L3	10,947	0,091
L4	10,967	0,093
L5	10,981	0,094
L6	10,976	0,093
L7	10,905	0,087
L8	10,932	0,089

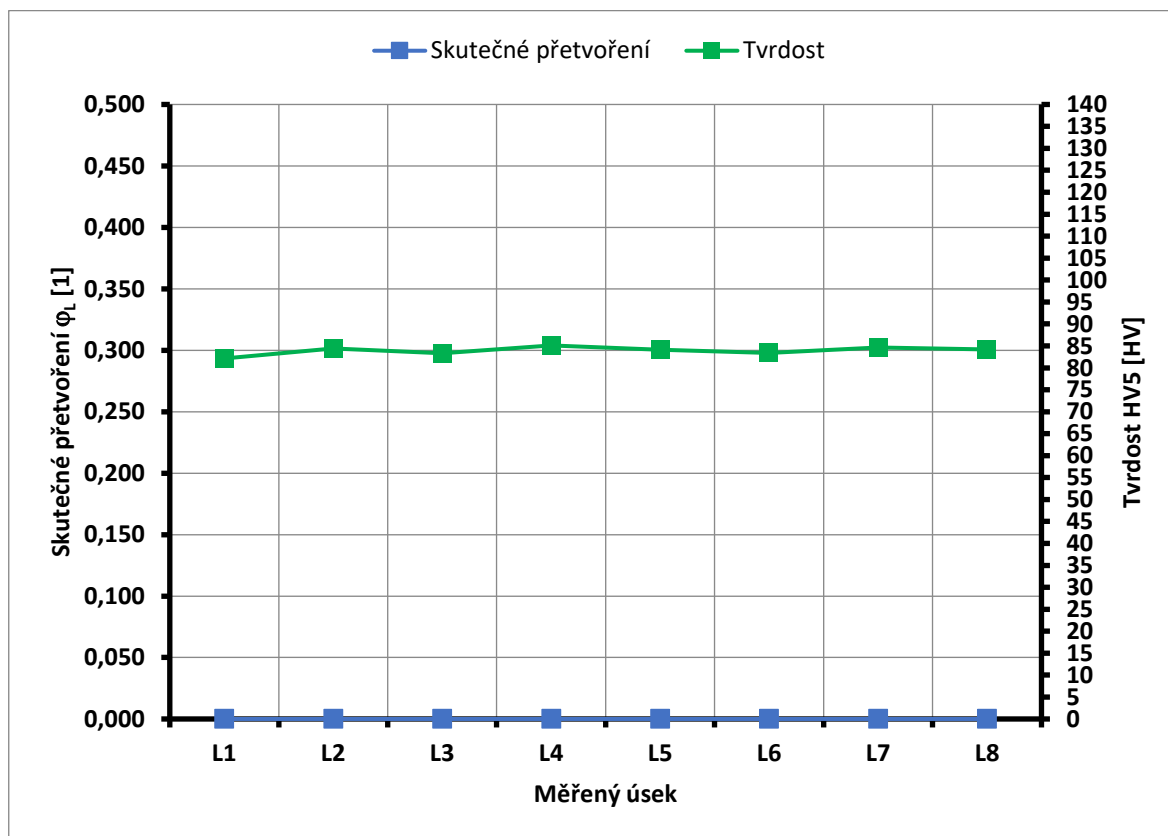
### 3.4.2 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek bez deformace

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek bez deformace jsou zaznamenány v příslušné tabulce (Tab. 6). Jelikož se jednalo o zkušební vzorek bez deformace, je v tomto případě skutečné přetvoření rovno nule, což lze odečíst z grafu (Graf 1).

**Tab. 6** Hodnoty HV2 a  $\phi$  pro zkušební vzorek bez deformace

	Délkové úseky zkušební vzorku							
	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	L5 [mm]	L6 [mm]	L7 [mm]	L8 [mm]
<b>Tvrđost HV2</b>	82,1	84,4	83,1	85,1	84,1	83,4	84,6	84,2
<b>Skutečné přetvoření <math>\phi</math> [1]</b>	0	0	0	0	0	0	0	0

Graf 1 znázorňuje závislost skutečného přetvoření  $\phi$  na tvrdosti HV2 v daném úseku měření zkušební vzorku bez deformace.



**Graf 1** Porovnání hodnot pro zkušební vzorek bez deformace

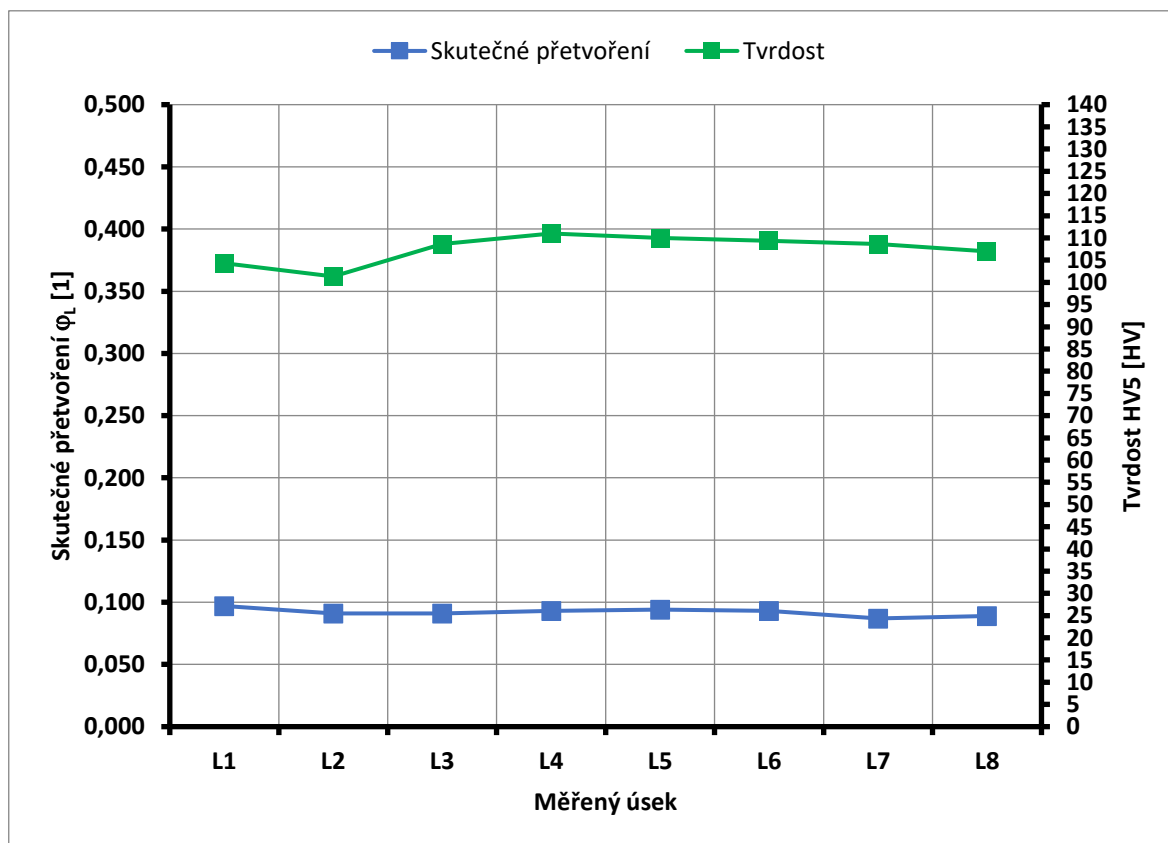
### 3.4.3 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 10 % deformací

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 10 % deformací jsou zaznamenány v příslušné tabulce (Tab. 8).

**Tab. 7** Hodnoty HV2 a  $\phi$  pro zkušební vzorek s 10 % deformace

	Délkové úseky zkušební vzorku							
	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	L5 [mm]	L6 [mm]	L7 [mm]	L8 [mm]
<b>Tvrdość HV2</b>	104,3	101,3	108,7	111,0	110,0	109,3	108,7	107,3
<b>Skutečné přetvoření <math>\phi</math> [1]</b>	0,097	0,091	0,091	0,093	0,094	0,093	0,087	0,089

Graf 2 znázorňuje závislost skutečného přetvoření  $\phi$  na tvrdosti HV2 v daném úseku měření zkušební vzorku s 10 % deformace.



**Graf 2** Porovnání hodnot pro zkušební vzorek s 10 % deformací



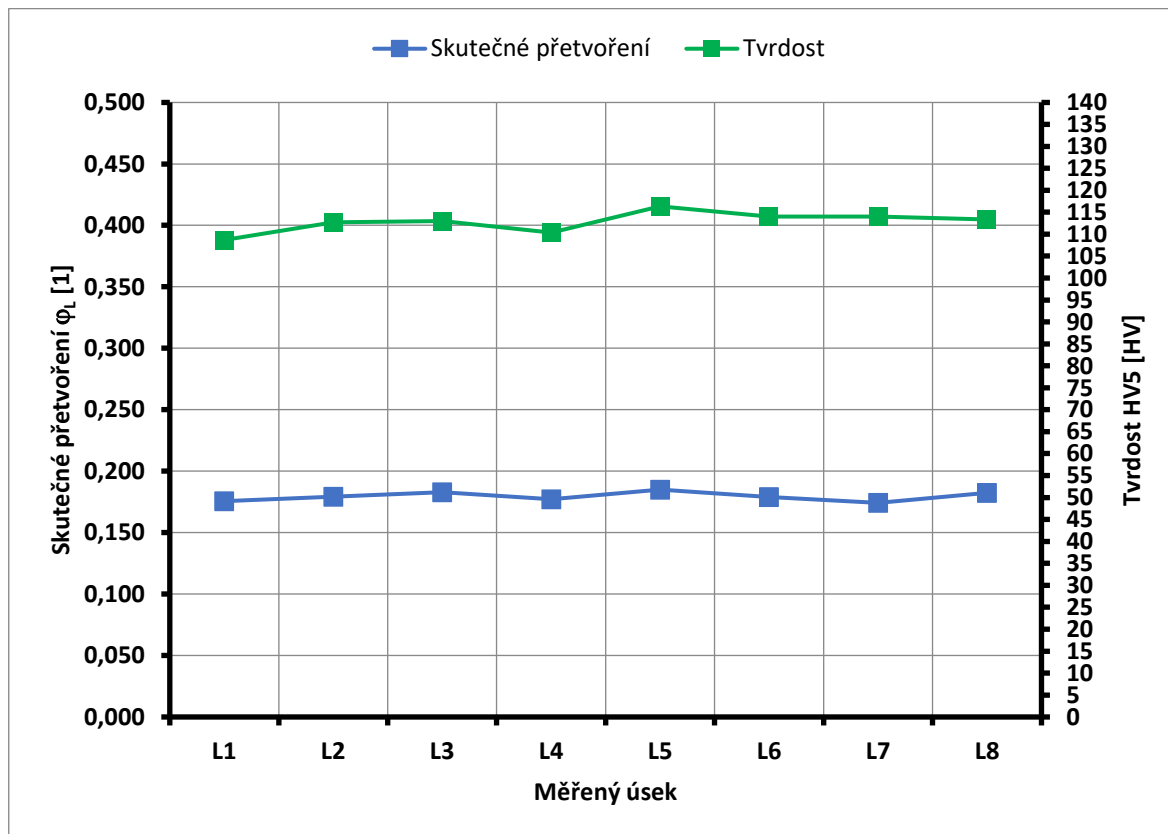
### 3.4.4 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 20 % deformací

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 20 % deformací jsou zaznamenány v příslušné tabulce (Tab. 8).

**Tab. 8** Hodnoty HV2 a  $\phi$  pro zkušební vzorek s 20 % deformace

	Délkové úseky zkušební vzorku							
	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	L5 [mm]	L6 [mm]	L7 [mm]	L8 [mm]
<b>Tvrdość HV2</b>	108,7	112,7	113,0	110,3	116,3	114,0	114,0	113,3
<b>Skutečné přetvoření <math>\phi</math> [1]</b>	0,176	0,179	0,183	0,177	0,185	,0179	0,174	0,183

Graf 3 znázorňuje závislost skutečného přetvoření  $\phi$  na tvrdosti HV2 v daném úseku měření zkušební vzorku s 20 % deformace.



**Graf 3** Porovnání hodnot pro zkušební vzorek s 20 % deformací

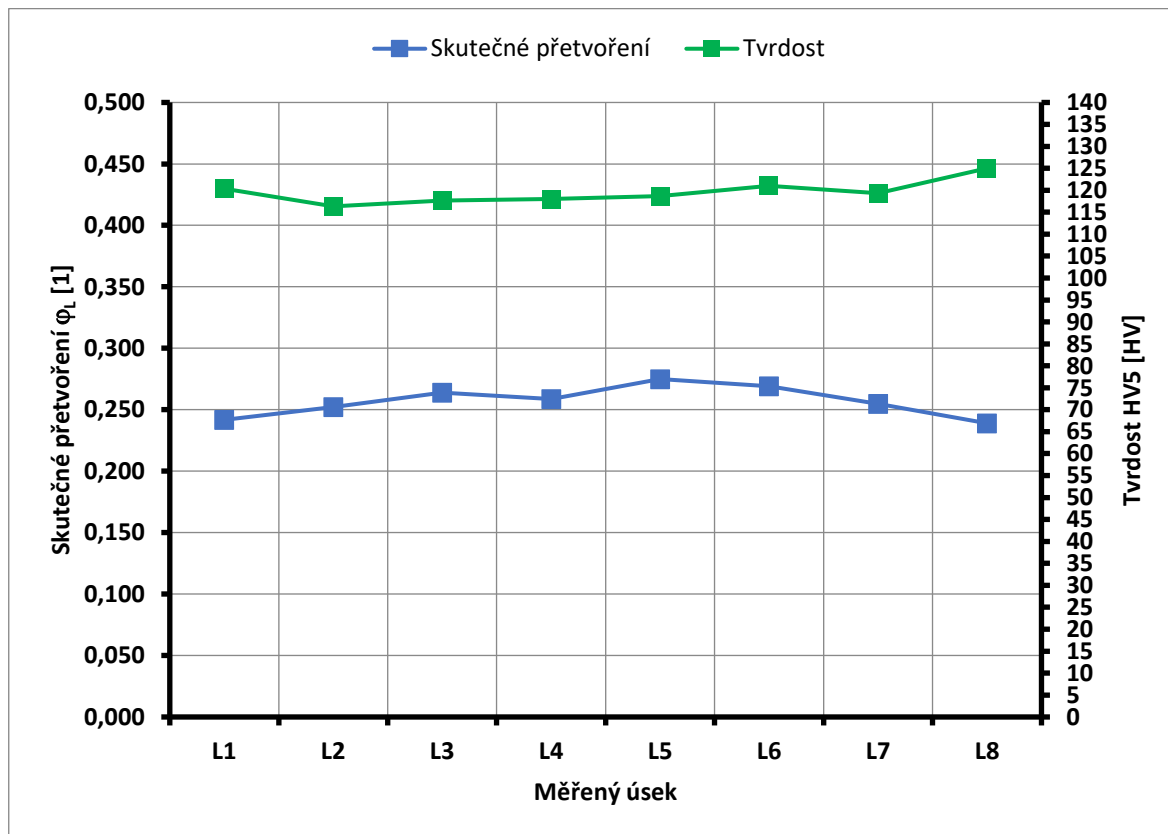
### 3.4.5 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 30 % deformací

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 30 % deformací jsou zaznamenány v příslušné tabulce (Tab. 9).

**Tab. 9** Hodnoty HV2 a  $\phi$  pro zkušební vzorek s 30 % deformace

	Délkové úseky zkušební vzorku							
	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	L5 [mm]	L6 [mm]	L7 [mm]	L8 [mm]
<b>Tvrdość HV2</b>	120,3	116,3	117,7	118,0	118,7	121,0	119,3	110,5
<b>Skutečné přetvoření <math>\phi</math> [1]</b>	0,242	0,252	0,264	0,259	0,275	0,269	0,255	0,239

Graf 4 znázorňuje závislost skutečného přetvoření  $\phi$  na tvrdosti HV2 v daném úseku měření zkušební vzorku s 30 % deformace.



**Graf 4** Porovnání hodnot pro zkušební vzorek s 30 % deformací

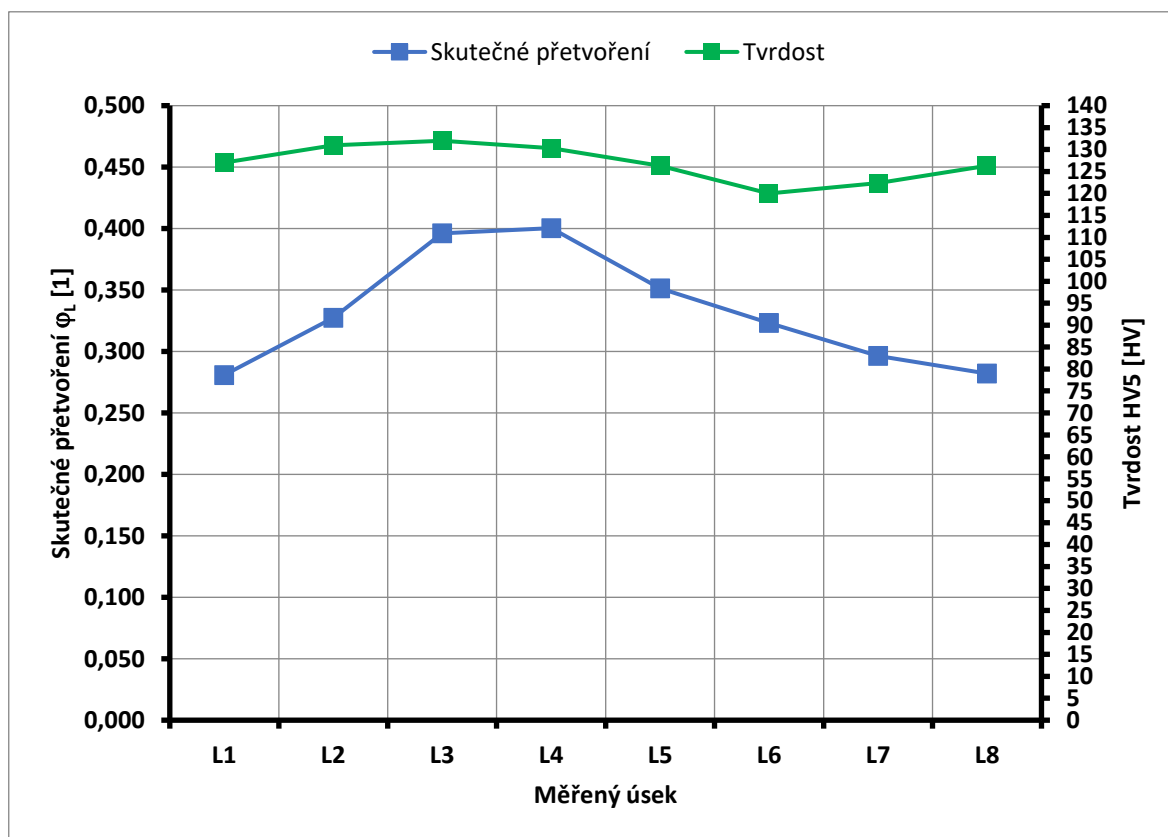
### 3.4.6 Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 40 % deformací

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorek s 40 % deformací jsou zaznamenány v příslušné tabulce (Tab. 10). Je třeba zdůraznit, že v tomto případě byla již patrná nehomogenní deformace (tvorba krčku) a bylo důležité sledovat nárůst hodnot tvrdosti HV2 v krčku a mimo tuto oblast.

**Tab. 10** Hodnoty HV2 a  $\phi$  pro zkušební vzorek s 40 % deformace

	Délkové úseky zkušební vzorku							
	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	L5 [mm]	L6 [mm]	L7 [mm]	L8 [mm]
<b>Tvrdość HV2</b>	127,0	131,1	132,0	130,3	126,3	120,0	122,3	126,3
<b>Skutečné přetvoření <math>\phi</math> [1]</b>	0,281	0,327	0,396	0,400	0,351	0,323	0,296	0,282

Graf 5 znázorňuje závislost skutečného přetvoření  $\phi$  na tvrdosti HV2 v daném úseku měření zkušební vzorku s 40 % deformace.



**Graf 5** Porovnání hodnot pro zkušební vzorek s 40 % deformací

### 3.4.7 Porovnání naměřených hodnot

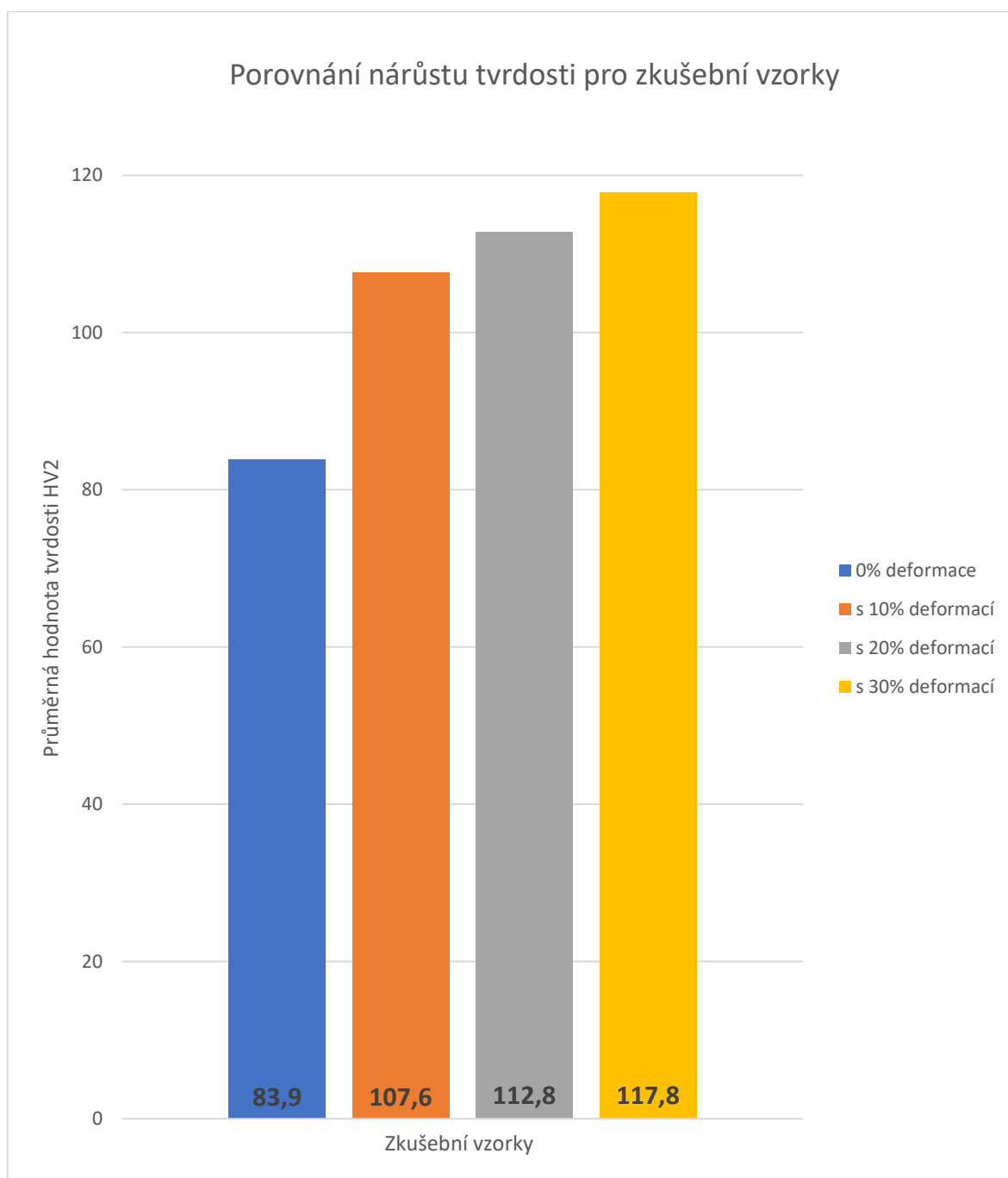
#### Porovnání hodnot tvrdostí HV2 pro 0 %, 10 %, 20 %, 30 % deformaci

Pro porovnání naměřených hodnot byla vytvořena Tab.11, ve které jsou uvedeny hodnoty tvrdosti v jednotlivých úsecích seřazené dle stupně deformace. Porovnány jsou zkušební vzorky s deformací 0 %, 10 %, 20 % a 30 %. Cílem tohoto srovnání bylo sledovat nárůst tvrdostí v daných úsecích v oblasti homogenní deformace. Výchozí hodnotou pro výpočet procentuálního nárůstu tvrdosti byla určena průměrná hodnota tvrdosti zkušební vzorku bez deformace.

**Tab. 11** Hodnoty tvrdosti HV2 pro jednotlivé úseky

Deformace [%]	Tvrdost v délkových úsecích zkušební vzorku								$\bar{x}$ HV2	Nárůst tvrdosti HV2 [%]
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8		
<b>0</b>	82,2	84,5	83,3	85,1	84,1	83,4	84,6	84,2	<b>83,9</b>	<b>0</b>
<b>10</b>	104,3	101,3	108,7	111	110	109,3	108,6	107,3	<b>107,6</b>	<b>29 %</b>
<b>20</b>	108,7	112,7	113	110,3	116,3	114,0	114,0	113,3	<b>112,8</b>	<b>35 %</b>
<b>30</b>	120,3	116,3	117,7	118	118,7	121,	119,3	110,5	<b>117,8</b>	<b>41 %</b>

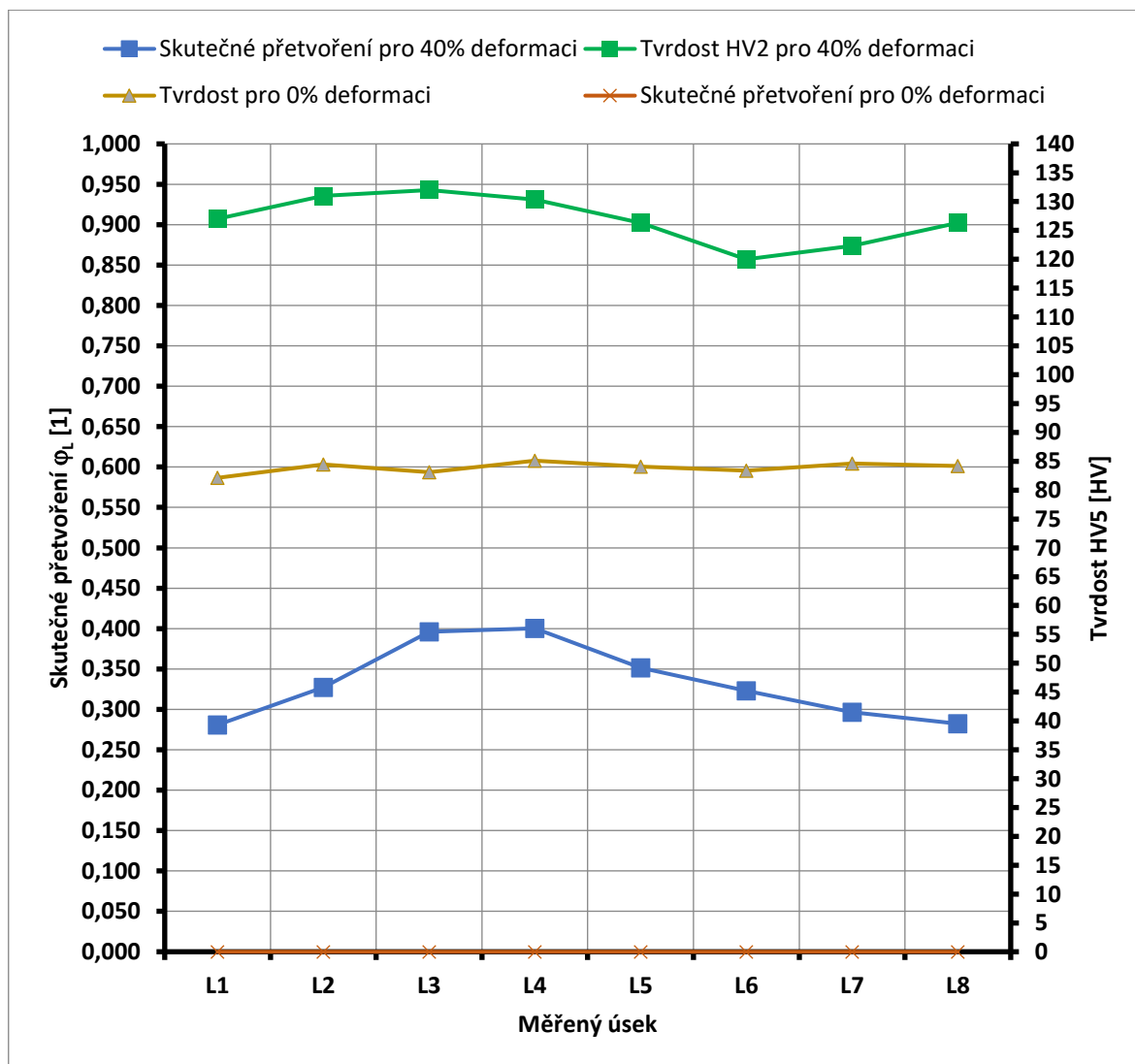
Z Tab. 11 jsou patrné nárůsty průměrných hodnot tvrdosti zkušebních vzorků z hodnoty 83,9 HV2 o 29 % na hodnotu 107,6 HV2 pro zkušební vzorek s 10 % deformací. U zkušebního vzorku s 20 % deformací je nárůst tvrdosti o 35 % na hodnotu 112,8 HV2. Poslední porovnávaný vzorek je s 30% deformací. U něho došlo k nárůstu tvrdosti o 41% na hodnotu 117,8 HV2. Hodnoty uvedené v tabulce jsou přehledně vykresleny v grafu 6.



**Graf. 6** Rozložení průměrných hodnot tvrdosti na zkušebních vzorcích s 0%, 10%, 20%, 30% deformací

## Porovnání hodnot tvrdosti pro 0 % a 40 % deformací

U zkušební vzorku se 40 % deformací se již nejedná o homogenní deformaci. K nárůstu deformace zde dochází pouze v oblasti krčku. Tato oblast je podle hodnot skutečného přetvoření zhruba vymezena úseky L3 a L4. Vlastní porovnání vzorku bez deformace a s 40 % deformací z hlediska hodnot tvrdosti HV2 a skutečného přetvoření je zobrazeno v grafu 7.



Graf. 7 Porovnání hodnot pro zkušební vzorek s 0 % a 40 % deformací

Z grafu 7 (porovnání vzorku bez deformace a s 40% deformací) je patrný výsledný nárůst tvrdosti HV2 cca o 52 %. Je také patrné, že v oblasti krčku (zhruba úseky L3 a L4) jsou hodnoty deformace nejvyšší. V oblastech mimo krček již k takovému nárůstu nedošlo, což je dané nehomogenním rozložením tvrdosti HV2 po ploše vzorku. Bylo by jistě velice zajímavé naměřit toto plošné rozložení tvrdosti pomocí 3D povrchového grafu.

## 4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zjištění vlivu deformace na tvrdosti materiálu a to zejména s ohledem na rozložení tvrdosti a průběh nárůstu tvrdosti podle deformace vzorků. Tvrdost byla měřena metodou podle Vickerse. Jedná se o metodu vnikací, kde vnikacím indentorem je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou podstavou a vrcholovým úhlem  $136^\circ$ . Hodnota zatěžování byla 2 kg a doba zatížení se rovnala 10s (tedy tvrdosti HV2). Zkušební vzorek byl z hlubokotažného materiálu označen podle EN normy jako DC05. Měření bylo provedeno ve směru  $0^\circ$  vůči směru válcování plechu. Mechanické vlastnosti materiálu byly získány pomocí trhacího stroje TIRA test 2300. Na základě získaných mechanických vlastností byly stanoveny hodnoty deformace zkušebních vzorků. Následovalo měření HV2. V Tab. 12 jsou již zobrazeny průměrné hodnoty tvrdosti HV2 a jejich procentuální nárůst vůči vzorku s 0% deformací.

**Tab. 12** Souhrn naměřených hodnot

Deformace [%]	Tvrdost [HV2]	Nárůst tvrdosti [%]
0	83,9	0
10	107,6	29
20	112,8	35
30	117,8	41
40	126,9	52

Z tab. 12 je patrné, že s rostoucí deformací roste také tvrdost zkušebního vzorku. (dochází ke zpevnování materiálu) Největší nárůst tvrdosti byl změřen u vzorků se 40 % deformací, a to o 52 %. Tento nárůst byl však pozorován pouze v oblasti tzv. krčku, kde došlo také k nejvyššímu nárůstu skutečného přetvoření. V oblasti mimo krček se tvrdost v takové míře nezvyšovala, popř. zůstala stejná jako u homogenní deformace (cca 30 %).

V pokračování výzkumu vlivu deformace na tvrdosti materiálu a rozložení tvrdosti ve zkušebním materiálu bych doporučil zejména přesnější změřením rozložení tvrdosti v závislosti na deformaci (zejména v oblasti krčku) pomocí 3D povrchových grafů, které by velmi názorně vykreslily tento vliv. Bylo by také velmi přínosné provést toho měření pro širší skupinu materiálu jako např. nezelezné materiály či vysokopevnostní materiály.

## 5 Seznam použité literatury

- [1] PLUHAŘ, J. a kol. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989.
- [2] *Tvrdoměr Qness* [online]. [cit. 24. 6. 2017] Dostupné na:  
<http://www.bpress.cn/im/author/algous/page/30439/>
- [3] LOUDA, P.; ODEHNALOVÁ D. *Nauka o materiálu I – Vnitřní stavba pevných látek* [online]. Dokument ve formátu ppt dostupný na:  
[http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm)
- [4] PLUHAŘ, J. a kol. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: SNTL, 1987. 420 s.
- [5] HLUHÝ, M.; MODRÁČEK, O.; PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 1 – Metalografie a tepelné zpracování 2. díl*. Vyd. 3. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-265-0
- [6] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1 – Nauka o materiálu 1. díl*. Vyd. 4. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5
- [7] HLUCHÝ, M. a kol. *Strojírenská technologie 1 - Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: SNTL, 1978. 360 s.
- [8] LOUDA, P.; ODEHNALOVÁ, D. *Nauka o materiálu I - Vlastnosti kovů a jejich zkoušení* [online]. Dokument ve formátu ppt dostupný na:  
[http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/NOM1/Vlastnosti\\_podklady.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/Vlastnosti_podklady.pdf)
- [9] FRISCHHERZ, A.; PAUL S. *Technologie zpracování kovů 1 - Základní poznatky*. Vyd. 5. Praha: STNL, 2004. ISBN 80-902655-5-3.
- [10] HANDBOOK, A. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. Vyd. 10. Materials Park: ASM International, 2000. 998 s. ISBN 0-87170-389-0.
- [11] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I. a II.* Brno: Cerm, 2001. 854 s.
- [12] HERTZBERG, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. Vyd. 4. New York: John Wiley & Sons, 1996. 786 s. ISBN 0-471-01214-9.





- [13] *Deformace* [online]. © 5. 9. 2014 [cit. 2017-09-27]. Dostupné na:  
<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Deformace&oldid=11816377>
- [14] *Technologie II* [online]. Dostupné na:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [15] NOVOTNÝ, J. a kol. *TECHNOLOGIE I. (Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2006. 227 s. ISBN 80-701-02351-6.
- [16] BLAŠČÍK, F. et al. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania*. Vyd. 1. Bratislava: Alfa, 1988. 832 s.
- [17] PÖHLANDT, K. *Materials Testing for the Metal Forming Industry*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 226 s. ISBN 3-540-50651-9.
- [18] HERTZBERG, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. Vyd. 4. New York: John Wiley & Sons, 1996. 786 s. ISBN 0-471-01214-9.
- [19] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [20] *Dynamické zkoušky* [online]. Dokument ve formátu pdf dostupný na:  
[http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/dynamicke\\_zkousky.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/dynamicke_zkousky.pdf)
- [21] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Dokument ve formátu pdf dostupný na:  
[https://www.opi.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)