



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**

Hodnocení kvality tvrdoměrných  
destiček

Evaluation of the quality of hardness plates

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:** Jan Potůček

**VEDOUcí PRÁCE:** Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

**STUDIJNÍ PROGRAM:** Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:** Technologie, materiály a ekonomika  
strojírenství

**Praha 2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Potůček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484003**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Hodnocení kvality tvrdoměrných deštiček**

Název bakalářské práce anglicky:

**Evaluation of the quality of hardness plates**

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretická část
2. Experimentální část  
- měření tvrdosti  
- metalografická analýza
3. Zpracování výsledků a diskuze
4. Závěry

Seznam doporučené literatury:

1. VELES, PavoI. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov: celoštátna vysokoškolská učebnica pre hutnicke a strojárské fakulty vysokých škôl. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
2. 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.
3. MACEK, Karel a Petr ZUNA. Strojírenské materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Elena Čížmárová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Elena Čížmárová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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 tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Jan Potůček

## Poděkování

Děkuji mé vedoucí bakalářské práce, Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D, za veškerou pomoc, svědomité a trpělivé vedení s cennými radami a připomínkami. Chtěl bych také poděkovat panu Vilémovi Truhlaříkovi z firmy Medet za cenné informace a za poskytnutí tvrdoměrných destiček pro experiment.

# Anotace

Bakalářská práce zkoumá kvalitu tvrdoměrných destiček. Teoretická část se v první kapitole zabývá samotným měřením tvrdosti podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoop. V další kapitole je rozebráno tepelné zpracování ocelí, přesněji žíhání, kalení a popouštění. V předposlední kapitole teoretické části jsou uvedeny informace o tvrdoměrných destičkách vyráběných ve firmě Medet. Na závěr teoretické části je rozebrána mikrostruktura ocelí s popisem jednotlivých fází vyskytujících se v mikrostruktuře. V experimentální části je popsán postup výroby tvrdoměrných destiček, jsou zde mapy s hodnotami tvrdosti a je rozebrána struktura jednotlivých destiček.

## Klíčová slova

tvrdost, tvrdoměrné destičky, měření tvrdosti, tepelné zpracování, mikrostruktura

# Annotation

The bachelor thesis examines the quality of hardness test blocks. In the first chapter, the theoretical part deals with the measurement of hardness according to Brinell, Rockwell, Vickers and Knoop. The next chapter discusses the heat treatment of steels, more precisely annealing, hardening and tempering. The penultimate chapter of the theoretical part contains information about hardness test blocks manufactured by Medet. At the end of the theoretical part, the microstructure of steels is analyzed with a description of the individual phases occurring in the microstructure. The experimental part describes the process of production of hardness test blocks, there are maps with hardness values and the structure of individual test blocks is analyzed.

## Keywords

hardness, hardness test blocks, hardness measurement, heat treatment, microstructure

## Zkratky

OTK	Odbor technické kontroly
N	Newton
°C	Stupeň Celsia
ČSN	České státní normy
EN	Evropské normy
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
Obr.	Obrázek
F [N]	Síla
kp	Kilopond
d [mm]	Průměr
h [mm]	Výška, hloubka
D [mm]	Průměr
mm	Milimetr
HB	Tvrdost dle Brinella
HR	Tvrdost dle Rockwella
HV	Tvrdost dle Vickerse
s	Sekunda
μm	Mikrometr
HK	Tvrdost dle Knoop
Ac <sub>1</sub> [°C]	Kritická teplota
Ac <sub>3</sub> [°C]	Kritická teplota
Ac <sub>m</sub> [°C]	Kritická teplota
Fe <sub>2,4</sub> C	Přechodný hexagonální karbid
Cr	Chrom
Mn	Mangan
Ni	Nikl
P	Fosfor
ČKD	Českomoravská-Kolben-Daněk
Tab.	Tabulka
C	Uhlík
Si	Křemík
S	Síra
W	Wolfram
Cu	Měď
V	Vanad
Fe <sub>3</sub> C	Karbid železa
ARA	Anizotermický rozpad austenit
SiO <sub>2</sub>	Oxid křemičitý

# Obsah

1. Úvod .....	9
2. Zkoušky tvrdosti.....	10
2.1 Rozdělení zkoušek tvrdosti .....	10
2.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	11
2.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella .....	13
2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse .....	15
2.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoopu .....	17
3. Tepelné zpracování ocelí.....	18
3.1 Žíhání .....	18
3.1.1 Homogenizační žíhání .....	19
3.1.2 Normalizační žíhání .....	19
3.1.3 Žíhání na měkko .....	20
3.1.4 Žíhání ke snížení pnutí.....	20
3.1.5 Žíhání rekrytalizační .....	20
3.2 Kalení .....	21
3.3 Popouštění.....	23
4. Tvrdoměrné destičky.....	25
4.1 K čemu slouží tvrdoměrné destičky.....	25
4.2 Tvar tvrdoměrných destiček .....	28
4.3 Materiály tvrdoměrných destiček .....	29
5. Mikrostruktura ocelí .....	30
5.1 Ferit .....	30
5.2 Cementit.....	31
5.3 Perlit .....	31
5.4 Martenzit.....	32
5.5 Bainit .....	32
6. Experimentální část.....	34
6.1 Výroba tvrdoměrných destiček .....	34
6.2 Postup experimentu .....	37
6.2.1 Měření tvrdosti.....	37
6.2.2 Hodnocení mikrostruktury .....	43
7. Diskuze .....	47
8. Závěr.....	48
Seznam literatury.....	49



# 1.Úvod

Současná strojírenská výrobní technologie, reprezentující jeden z hlavních článků růstu a rozvoje průmyslu, je z hlediska efektivního využití výroby, stále zdrojem dosud existujících rezerv. Řešením těchto problémů při současných podmínkách omezování zdrojů, energie, materiálu a surovin se stávají aktuální a řeší jednu z podmínek dalších cílů rozvoje průmyslu.

Jednou z oblastí, kde dosud existují značné rezervy v úsporách energie i surovin, jsou technologická zařízení provozovaná pro tepelné zpracování kovů. S tímto úzce souvisí kontrola zpracování všech kovových výrobků, zejména pak jejich mechanické vlastnosti. V návaznosti na tyto skutečnosti je i nepřetržitá kontrola tepelného a chemicko-tepelného zpracování. Výrobky jsou často provázeny řadou závad, což vede ke zvýšené zmetkovitosti a haváriím. Dokonalý rozbor a ověření mechanických vlastností, je celý proces velmi nákladný (mez pevnosti, mez průtažnosti, kontrakce materiálu atd.) a často u hotových výrobků těžko proveditelné. Mnohem rychlejší a méně nákladné jsou zkoušky tvrdosti, které lze provést na hotových výrobcích a jejich metoda je nedestruktivní, relativně velmi levná a často v kompetenci OTK a mechanických zkušeben výrobce.

Cílem bakalářské práce bylo posoudit kvalitu vyrobených tvrdoměrných destiček, na základě proměření tvrdosti a hodnocení mikrostruktury.

## 2. Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je velmi důležitá mechanická vlastnost materiálu. Definujeme jí jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Nelze jí však jednoznačně definovat jako fyzikální veličinu, jelikož je její hodnota závislá na zkušebních podmínkách, které jsou odlišné pro jednotlivé metody. Z tvrdosti materiálu se dají velmi často odhadnout i ostatní mechanické vlastnosti. [1,2]

Zkoušky tvrdosti materiálu se vždy provádí na povrchu materiálu, neporušují zkoušený materiál a nepatrně ovlivňují pouze malý objem povrchu, řadí se do zkoušek nedestruktivních. Z toho vyplývá, že se dají provádět na již vyrobených výrobcích malých i velkých rozměrů. V praxi jsou velmi často využívány kvůli své jednoduchosti a rychlosti provedení. [1,3,4]

### 2.1 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti lze rozdělit mnoha způsoby. Jedním způsobem je rozdělení dle rychlosti zátěžné síly na zkoušky statické, statickou sílu využívá většina vnikacích metod, a zkoušky dynamické, kam patří odrazové metody. Dále lze rozdělit zkoušky tvrdosti podle účelu měření na makrotvrdoti, pro zhodnocení tvrdosti celého materiálu za použití síly větší než 10 N, mikrotvrdoti, při níž se stanovují lokální vlastnosti při síle v rozmezí od 0,1 N do síly 10 N a nanotvrdoti, která se využívá pro měření tvrdosti povlaků silou menší než 0,1 N. [1,3]

Nejdůležitější rozdělení měření tvrdosti je podle jejich použitého principu a dělí se na:

- Metody vrypové, které jako jedny z prvních hodnotily rozměry vrypu. Vryp byl vytvořen diamantovým tělískem určitého tvaru zatíženým určitou silou na hladce vybroušeném povrchu zkoušeného materiálu. Měrou tvrdosti je šíře vrypu. Tento princip využívají zkoušky Martensova a Zeissův diritest. [2,3]

- Metody odrazové, které užívají tělísko definovaného tvaru a váhy, které se spustí z určité výšky na povrch zkoušeného materiálu. Část energie je spotřebována na vytvoření důlku na povrchu a zbytek síly se projeví jako odskok tělíska do určité výšky. Výška tohoto odskoku je pak měrou tvrdosti. Tento princip využívá zkouška Shoreho skleroskop. [2,3]
- Metody vnikací nebo také vtiskové, fungují na principu vtlačování vnikacího tělíska neboli indentoru určitým zatížením do povrchu materiálu. Pro stanovení hodnoty tvrdosti se vyhodnocují rozměry i tvar vzniklého vtisku. Tento princip využívají zkoušky dle Brinella, Rockwella a Vickerse. [2,3]

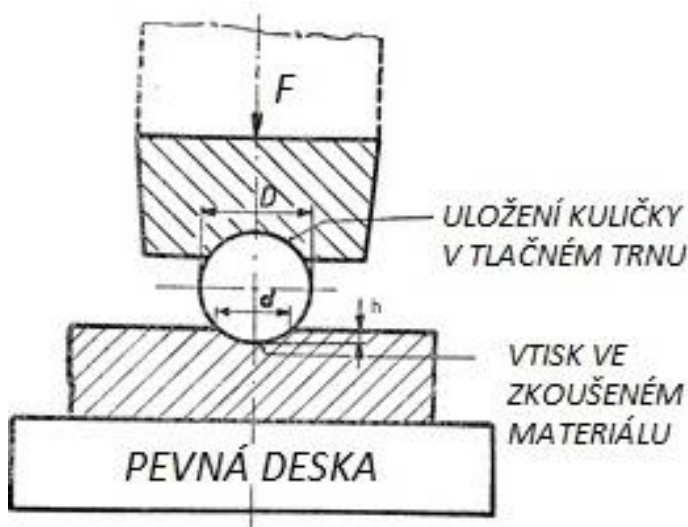
Pro všechny tyto uvedené principy zkoušení tvrdosti platí, že se provádí na rovném a vyleštěně hladkém povrchu, bez přítomnosti cizích látek, zejména bez mazadel, a především bez okují. Zkoušený materiál musí ležet na tuhé podložce, tak aby zkušební plocha byla kolmo k ose vnikacího tělíska a zároveň aby se zabránilo k jeho posuvu. Zkoušky se provádějí při okolních teplotách od 10°C do 35°C, v kontrolovaných podmínkách jako jsou arbitrážní případy se provádějí při teplotě (23±5) °C. [1]

### 2.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

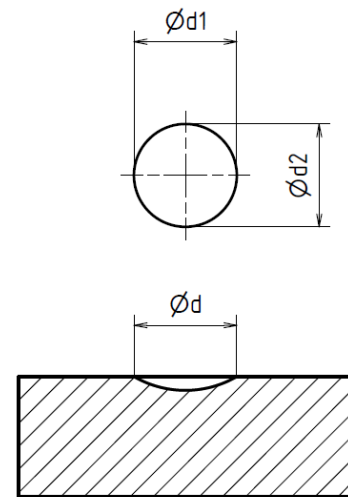
Zkouška patří do metod vnikacích a je normalizována normou ČSN EN ISO 6506 [5]

Principem zkoušky dle Brinella (viz. obr. 1) je vtlačování indentoru za stálého normalizovaného zkušebního zatížení  $F$  o velikosti 1 kp až 3000 kp, neboli 9,81 N až 29420 N, do rovného hladkého povrchu zkoumaného materiálu. Zatížení se nechá působit 10 až 15 vteřin, u některých materiálů je potřeba nechat zatížení působit i déle. Pro vyhodnocení tvrdosti zkoušeného materiálu se měří průměr vtisku  $d$ , který zanechal indenter na povrchu, jak je zobrazeno na obr. 2. Průměr vtisku se vždy měří ve dvou na sebe kolmých směrech, které se zprůměrují a dají velikost  $d$ . Zkoušený vzorek musí mít tloušťku minimálně osminásobnou hodnoty hloubky vtisku  $h$ . Vzdálenost

středu vtisku musí být nejméně 2,5 násobek průměru vtisku. Pro vzdálenost mezi jednotlivými vtisky platí vzdálenost třínásobku průměru vtisku. [1,5,6]

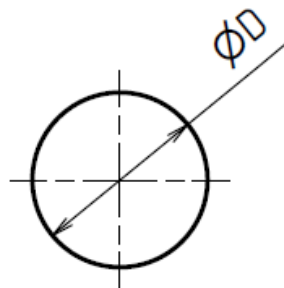


Obr. 1 Princip zkoušky podle Brinella [4]



Obr. 2 Tvar vtisku ve zkoušeném materiálu u zkoušky podle Brinella

Indentorem je kulička (viz. obr. 3) z tvrdokovu nebo se slinutého karbidu, jejíž průměr  $D$  je daný normou a může být (1; 2; 2,5; 5 a 10) mm, dovolují-li to rozměry tělesa, je nejpoužívanější průměr  $D = 10$  mm. [7]



Obr. 3 Tvar indentoru pro zkoušku dle Brinella

Označování tvrdosti podle Brinella obsahuje informace o průběhu zkoušky. Jako první se uvádí naměřená hodnota tvrdosti, dále se uvádí tři písmena, HB je stálé, znamená Brinellovo tvrdostní číslo (Hardness Brinell) a třetí písmeno se liší druhem použitého materiálu pro indenter, S pro kalenou ocel (steel), která se již nepoužívá, a W pro slinuté karbidy. Následuje průměr indentoru v milimetrech, velikost zátěžné síly v kilopondech a doba působení zatížení v sekundách. Za standardní podmínky se bere  $D = 10$  mm,  $F = 3000$  kp (29420 N) a  $t = 10-15$  s.

Příklady označení: 200 HBS – indentor byl vyroben z oceli o průměru 10 mm, síla  $F$  byla 29420 N a doba působení byla 10 – 15 vteřin.

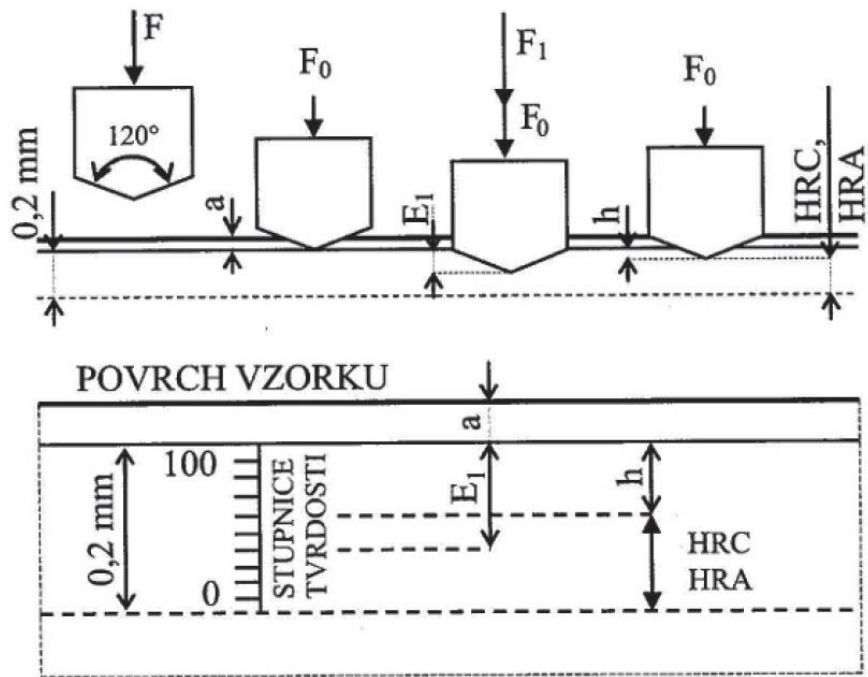
168 HBW 5/750/20 – indentor byl vyroben se slinutého karbidu o průměru 5 mm, síla  $F$  byla 750 kp (7355 N) a doba působení byla 20 vteřin. Hodnota tvrdosti se vypočítá jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku (1). [8-11]

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

### 2.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

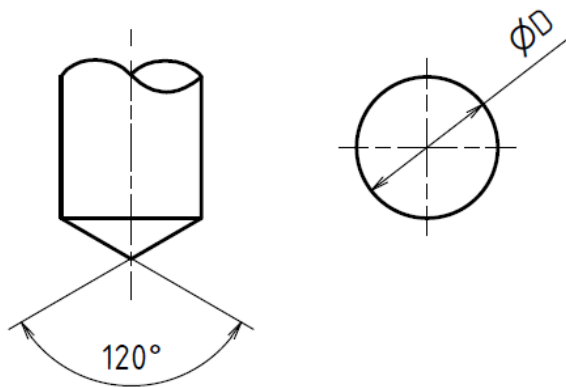
Zkouška patří do metod vnikacích a je normalizována normou ČSN EN ISO 6508 [12]

Principem zkoušky dle Rockwella je vtlačování indentoru do povrchu zkoušeného materiálu (viz. obr. 4), narozdíl od ostatních vnikacích zkoušek, se měří hloubka trvalého vtisku  $h$ . Hodnota tvrdosti se odečítá přímo z tvrdoměru. U této zkoušky se zkoušený materiál zatíží předběžným zatížením  $F_0$ , čímž se zamezí vlivu povrchové vrstvy a nastaví se výchozí pozice hloubkoměru. Předběžné zatížení je pro všechny stupnice stejné, a to  $F_0 = 10$  kp (98 N). Celkové zatížení  $F$  se skládá z předběžného a přídatného zatížení ( $F = F_0 + F_1$ ). Zkušební vzorek musí mít předepsanou tloušťku, ta je závislá na použitém indentoru. Pokud je indentor kužel, je tloušťka vzorku minimálně desetinásobek hloubky trvalého vtisku, a pokud je indentor kulička, je tloušťka vzorku minimálně patnáctinásobek hloubky trvalého vtisku. Vzdálenost středu vtisku od okraje vzorku musí být nejméně 2,5násobkem průměru vtisku, nejméně však 1 mm. Podobné pravidlo platí i pro vzdálenosti mezi samotnými vtisky, vzdálenost ale musí být čtyřnásobek průměru vtisku, minimálně 2 mm. Zkoušku lze použít pro široký rozsah tvrdosti, je velice rychlá a jednoduchá, využívá se i k automatické kontrole tepelného zpracování. [1,3,13,14]



Obr. 4 Princip zkoušky podle Rockwella [1]

Jako indentor se používá diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  nebo kalená ocelová kulička o průměru  $D = 1,6 \text{ mm}$  ( $1/16''$ ) nebo  $D = 3,2 \text{ mm}$  ( $1/8''$ ), volí se podle použitého přídavného zatížení. Tvary indentorů jsou vyobrazeny na obr. 5. [7]



Obr. 5 Tvar indetorů zkoušky podle Rockwella [7]

Označování je podobné tomu podle Brinella, první je hodnota tvrdosti, HR znamená Rockwellovo tvrdostní číslo (Hardness Rockwell), třetí písmeno značí stupnici. Nejpoužívanější jsou: HRA – použitý indentor je jehlan, celkové zatížení je 60 kp (580 N) a je určené pro tvrdé materiály. HRB – použitý indentor je kulička o rozměru 1,6 mm, celkové zatížení je 100 kp (980 N) a používá se pro oceli nižší pevnosti. HRC – použitý indentor

je jehlan, celkové zatížení je 150 kp (1470 N) a používá se pro vysoko pevné oceli. HRE – použitý indentor je kulička o rozměru 3,2 mm, celkové zatížení je 100 kp (980 N) a používá se pro velmi měkké materiály. Dále se používají Super-Rockwelly, označují se HR, velikost zatížení (15 nebo 30 nebo 45 kp) a písmenko N pro diamantový kužel nebo T pro kuličku a průměru 1,6 mm, např. HR15T. [4,7]

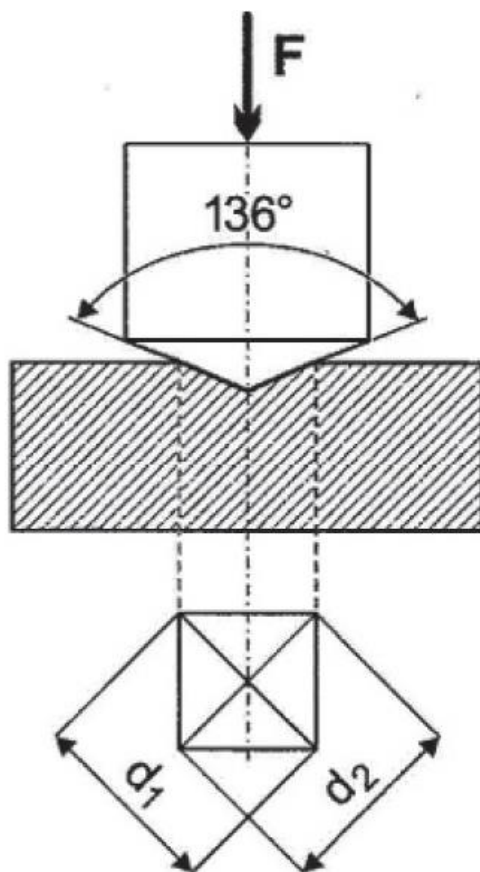
### 2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška patří do metod vnikacích a je normalizována normou ČSN EN ISO 6507 [15]

Princip zkoušky podle Vickerse je obdobný jako u zkoušky tvrdosti podle Brinella, vtlačování indentoru zatěžující zkušební silou  $F$ , která se nechá působit 10 až 15 vteřin. Podle zvolené síly se dělí na obvyklé měření tvrdosti podle Vickerse, v rozmezí od 5 kp do 100 kp (49,03 až 980,7 N), měření tvrdosti pro nízká zatížení 0,2 kp až 5 kp (1,92 až 49,03 N). Speciální skupinou jsou pak měření mikrotvrdosti podle Vickerse pro zatížení od 0,01 kp až 0,2 kp (0,098 až 1,92 N). Pro vypočtení tvrdosti je potřeba změřit úhlopříčky  $d_1$  a  $d_2$  vzniklého vtisku (viz obr. 6) a zprůměrovat jejich hodnotu. Měří se s přesností 0,0001 mm. Výsledná hodnota  $d$  se dosadí do vzorce (2) a vypočte se hodnota tvrdosti podle Vickerse.

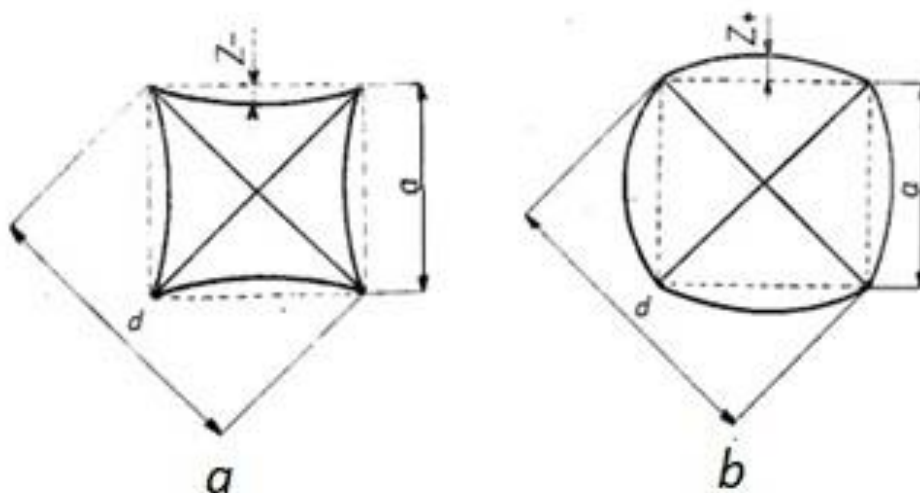
$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Zkoušený vzorek musí mít minimální tloušťku jeden a půl násobku hodnoty  $d$ , vzdálenost mezi středy jednotlivých vtisků je třínásobek hodnoty  $d$ . Zkouška je velmi náročná na kvalitu povrchu, ale za to je velmi přesná. [1,3,10,16]



Obr. 6 Princip zkoušky podle Vickerse [1]

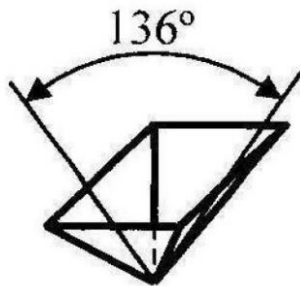
Při zkoušce podle Vickerse vznikají deformace vtisku, jejichž tvar můžeme vidět na obr. 7. Jsou závislé na tom, zda je materiál nezpevněný, například měkké železo a měď, nebo zpevněný. [4]



Obr. 7 Deformace vtisku podle Vickerse, a - nezpevněný materiál, b - zpevněný materiál [4]



Indentor je diamantový pravidelný čtyřboký jehlan jehož vrcholový úhel stěn je  $136^\circ$ , tak jak je na obr. 8, jehož ostatní rozměry nejsou předepsány. [3]



Obr. 8 Tvar indentoru zkoušky podle Vickerse [8]

Označování je obdobné jako u předešlých zkoušek, hodnota tvrdosti následovaná Vickersovým tvrdostním číslem (hardness Vickers) HV, zde už se ale žádné třetí písmenko neobjevuje. Za písmenky HV se objevuje číselná velikost použitého zatížení a za lomítkem čas působení zkušebního zatížení. Výjimkou jsou hodnoty  $F = 30 \text{ kp}$  (294,2 N) a  $t = 10 - 15 \text{ s}$ , které se označují jako normalizované podmínky. Příklady označení: 200 HV – použité normalizované zatížení i čas.

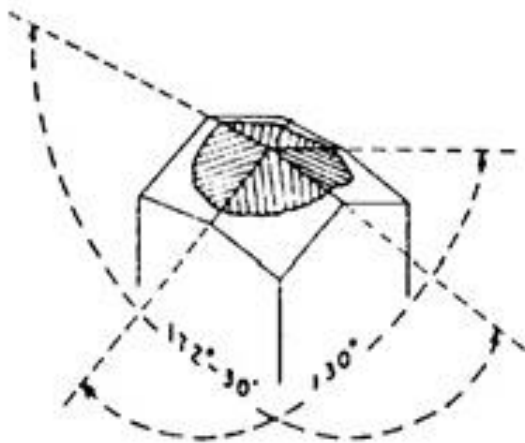
680 HV 1/30 – použité zatížení mělo velikost 1 kp (9,81 N) a čas působení byl 30 vteřin. [1,8,13]

#### 2.1.4 Zkouška tvrdosti podle Knoop

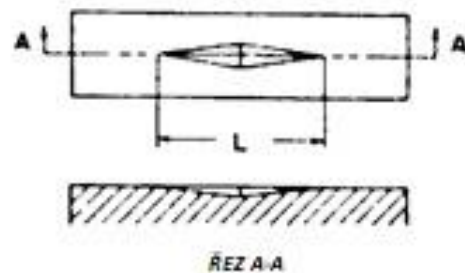
Zkouška tvrdosti podle Knoop (ČSN EN ISO 4545) vychází z Vickersovy metody měření tvrdosti. Rozdílný je tvar diamantového jehlanu neboli indentoru (obr. 9), jehož základnu tvoří podlouhlý kosodélník. Poměr úhlopříček vzniklého vtisku je 7,11:1 (obr. 10). Výhodou tohoto tvaru indentoru je, že hloubka vzniklého vtisku je pouze 1/30 délky delší úhlopříčky  $L$ , tudíž když je délka úhlopříčky 0,1 mm je hloubka vtisku 3  $\mu\text{m}$ . Hodnota tvrdosti se vypočítá dle vzorce (3).

$$HK = \frac{F}{0,07028 \cdot L^2} \quad (3)$$

Zkouška tvrdosti podle Knoop se pro své vlastnosti nejčastěji používá pro měření mikrotvrdosti, kde se použité zatížení volí v rozmezí 0,01 až 1 kp (0,098 až 9,8 N). [4,17]



Obr. 9 Tvar indentoru zkoušky podle Knoop [17]



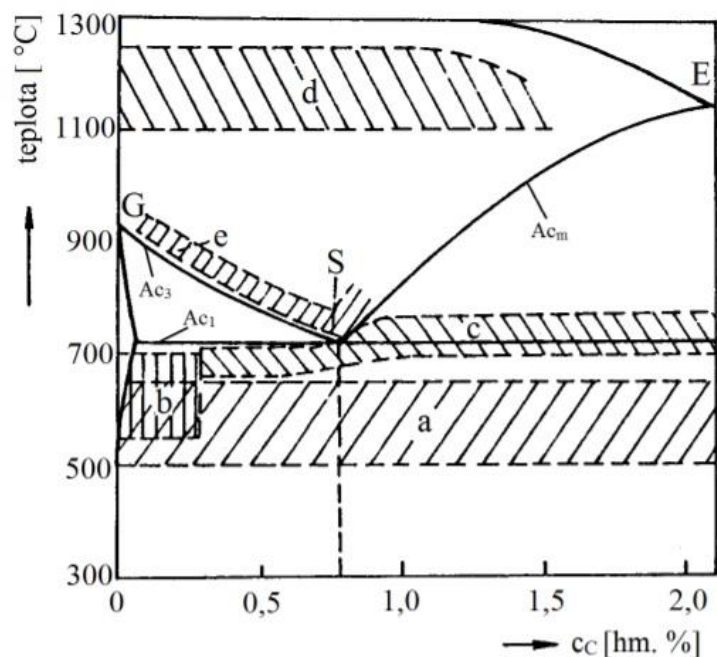
Obr. 10 Tvar vtisku zkoušky podle Knoop [17]

### 3. Tepelné zpracování ocelí

Tepelné zpracování je velmi důležitou technologickou složkou při výrobě, neboť při něm dochází ke změnám vlastností a struktury v důsledku fázových přeměn v matici. Tepelným zpracováním se obecně rozumí jako ohřev kovu na určitou teplotu, výdrž na této teplotě a následné ochlazování určitou rychlostí v určitém médiu. Tento postup lze aplikovat i vícekrát za sebou. Tepelné zpracování se provádí pro dosažení určité definované krystalizace a tím i pro dosažení určitých vlastností kovů. [18-20]

#### 3.1 Žíhání

Žíhání je velmi důležitá složka tepelného zpracování. Základní dělení se provádí dle teploty. Teploty jednotlivých žíhání jsou zakresleny v diagramu na obr. 11. Pokud je teplota žíhání pod čarou  $A_{c1}$  jedná se o žíhání bez překrytí a pokud je teplota nad  $A_{c1}$  jedná se o žíhání s překrytím, při němž dochází k austenitizaci. To znamená, že při výdrži na teplotě intenzivně probíhají difuzní děje jako je rozpouštění karbidů a dochází k vyrovnávání koncentračních rozdílů a při ochlazování se austenit přeměňuje na feriticko-cementitickou strukturu. Z toho vyplývá, že žíhání s překrytím zásadně ovlivňuje strukturu a mechanické vlastnosti oceli. [18,21]



Obr.11 Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [23]

a) ke snížení pnutí, b) rekrytalizační, c) na měkko, d) homogenizační, e) normalizační

### 3.1.1 Homogenizační žíhání

Homogenizační žíhání je žíhání s překrytalizací a provádí se pro snížení nebo odstranění heterogenity mikrostruktury nebo chemického složení oceli, které vzniká už během chladnutí oceli, která byla odlévána mezi teplotami solidu a likvidu. Teplota homogenizačního žíhání se volí značně vyšší, než jsou teploty  $Ac_3$  a  $Ac_m$ , to odpovídá teplotám mezi 1 000 a 1 250°C. Výdrž na této teplotě trvá 6 a více hodin. Ochlazování je pomalé na klidném vzduchu. [18,22]

### 3.1.2 Normalizační žíhání

Normalizační žíhání je žíhání s překrytalizací, jehož účelem je zjemnění hrubého zrna. Provádí se především pro podeutektoidní oceli, pro nadeutektoidní se provádí jen ve výjimečných případech, jako je odstranění sekundárního cementitu, který je nevhodným způsobem vyloučen po hranicích zrn. Teplota pro podeutektoidní oceli se volí 30 až 50°C nad teplotou  $Ac_3$  a pozvolné ochlazování na vzduchu. [20-22]

### 3.1.3 Žíhání na měkko

Žíhání na měkko se provádí pro snížení tvrdosti oceli pro následné obrábění nebo tváření za studena. Dále se používá pro získání vyšší houževnatosti a jiných mechanických či fyzikálních vlastností a pro přípravu vhodné výchozí mikrostruktury pro následné kalení. Teplota žíhání na měkko se volí kolem teploty  $A_{c1}$ , a to v rozmezí 600 až 780 °C v závislosti na mikrostruktuře oceli. Pokud má ocel ve struktuře martenzit nebo bainit, volí se teplota pod  $A_{c1}$ , ale pokud je struktura tvořena lamelárním perlitem je potřeba volit teplotu nad  $A_{c1}$ , jelikož z hrubého lamelárního perlitu, při tomto žíhání, vzniká hrubý globulární perlit, který je nevhodný pro následné kalení. Doba žíhání je závislá na perlitu, čím jemnější lamely má, tím se rychleji sbalují. Teplota nad  $A_{c1}$  se volí i pro nadeutektoidní oceli, jelikož čím více uhlíku ve struktuře, tím déle se rozpouštějí karbidy. [20,22]

### 3.1.4 Žíhání ke snížení pnutí

Žíhání ke snížení pnutí, se také označuje jako žíhání k odstranění pnutí, a jedná se o žíhání bez překrytalizace, tudíž pod teplotou  $A_{c1}$ . Jak už je jasné z názvu, účel je odstranit, nebo alespoň snížit vnitřní pnutí v oceli, které mohlo vzniknout nerovnoměrným ohříváním či chladnutím nebo po tváření za tepla, ale také po tváření za studena. Teplota žíhání se volí v některých případech už od 400 °C, nejčastěji se však používá teplota v rozmezí 600 až 650 °C. Velký důraz je potřeba dbát na rovnoměrný ohřev, proto se doporučuje používat elektrické komorové pece s nucenou cirkulací. Výdrž na této teplotě se volí od 1 až do 10 hodin. Ochlazování probíhá pomalu na vzduchu, v některých případech se ocel chladí v peci do teploty 250 až 300 °C a až poté se dochlazuje na vzduchu. [20,22,23]

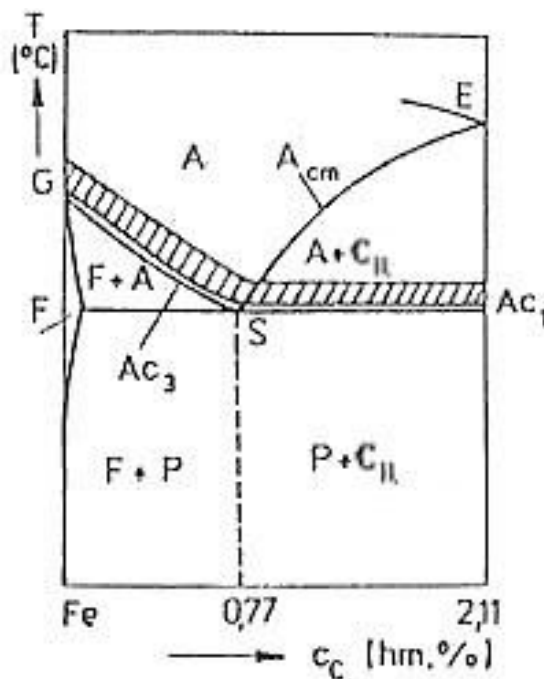
### 3.1.5 Žíhání rekrystalizační

Žíhání rekrystalizační je žíhání bez překrytalizace, jde v něm o obnovení tvárných vlastností po tváření za studena, odstraňují se deformovaná zrna a deformační zpevnění a vznikají nová nedeformovaná zrna. Teplota se volí v oblasti teploty rekrystalizace a nesmí překročit teplotu  $A_{c1}$ , jinak by došlo

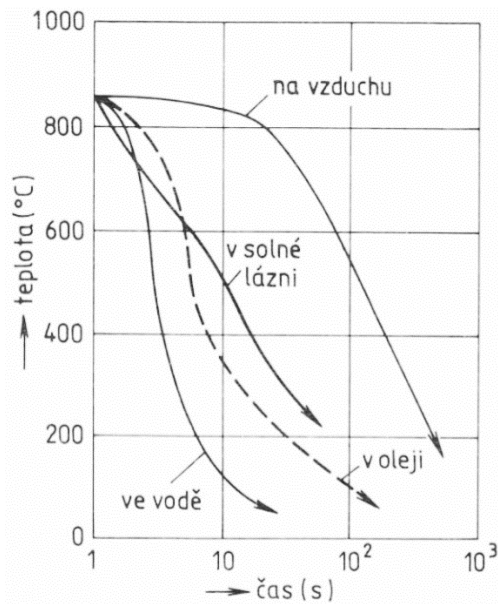
k překrytalizaci, tudíž teplota mezi 550 až 700 °C. Výdrž se volí mezi 1 až 5 hodinami a následuje pomalé ochlazování. [22, 23]

### 3.2 Kalení

Kalení je druh tepelného zpracování, které se provádí pro zvýšení tvrdosti oceli, zároveň se ale snižuje houževnatost a zvyšuje křehkost. Oceli s obsahem uhlíku menším než 0,2 % se označují jako nekalitelné, až od obsahu uhlíku 0,35 % se označují jako dobře kalitelné. Kalení je ohřátí materiálu na kalící teplotu, kalící teplota se volí 30 až 50 °C nad teplotami  $Ac_1$  pro podeutektoidní a nad  $Ac_3$  pro nadeutektoidní (viz. Obr. 12). Následuje krátká výdrž na této teplotě, a poté následuje nejdůležitější část, a to ochlazení nadkritickou rychlostí v chladícím médiu. Jako chladící médium se od nejpomalejšího po nejrychlejší volí vzduch, fluidní sůl, olej, roztoky polymerů, voda a solný roztok. Rychlost některých kalících médií je zobrazena na obr. 13. Rychlým ochlazením se v mikrostruktuře přeměňuje austenit na martenzit nebo bainit, zároveň v některých případech vzniká nežádoucí jemný lamelární perlit neboli troostit. V zakalené struktuře vždy zůstává zbytkový austenit. [21, 22, 24, 25]

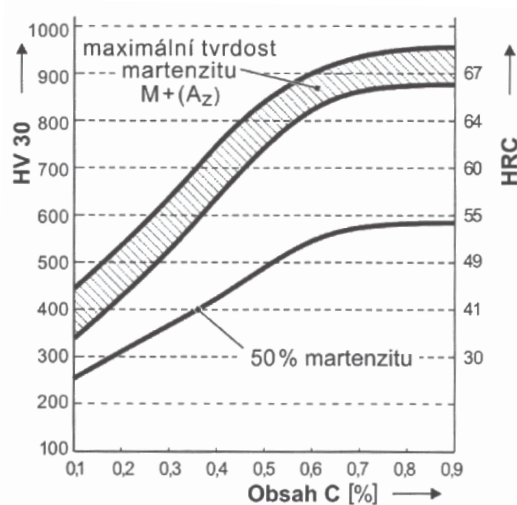


Obr. 12 Oblast kalících teplot [23]



Obr. 13 Graf rychlosti ochlazování kalících médií [23]

Při tepelném zpracování zvaném kalení, se často používají pojmy jako je kalitelnost, zakalitelnost a prokalitelnost. Kalitelnost je schopnost oceli transformovat austenit na martenzit a tím získat martenzitickou strukturu, tato schopnost je dána chemickým složením oceli. Pro zakalitelnost platí, že je to schopnost oceli po kalení dosáhnout výrazného zvýšení tvrdosti a dosáhnout minimálně 50 % martenzitu v mikrostruktuře jádra zakalené oceli. Zakalitelnost je ovlivněna množstvím uhlíku ve struktuře oceli, tato závislost je znázorněna na obr. 14. Poslední z těchto pojmů, prokalitelnost, je schopnost oceli dosáhnout tvrdosti odpovídající struktuře s 50 % martenzitu v určité vzdálenosti od povrchu. Prokalitelností se definuje hloubka zakalení. [1,22]



Obr. 14 Vliv množství obsahu C na tvrdost martenzitu [1]

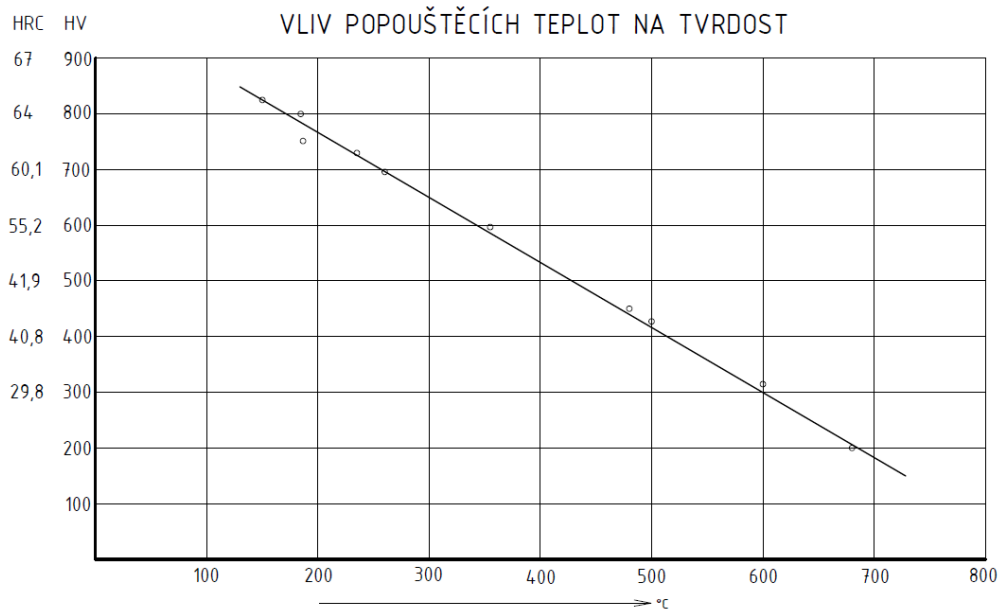
Kalení se dá rozdělit do dvou hlavních skupin podle vzniklé struktury. První z nich je martenzitické, které má po zakalení pouze martenzitickou strukturu s určitým podílem zbytkového austenitu. Druhé z nich je bainitické, zde po zakalení převládá bainitická struktura. Ty se dále dělí podle technologie na nepřetržité, přetržité, izotermické, termální a mnohé další. [21,22]

- Nepřetržité kalení se označuje jako základní kalení. Ochlazování probíhá poměrně rychle a plynule až do teploty kalícího média, která je podobná teplotě místnosti. Je to nejjednodušší a nejčastěji používaný způsob kalení. [21,22]
- Přetržité nebo také přerušované či lomené kalení se používá pro potlačení vzniku trhlin. Ochlazování je rozděleno do dvou fází. V první fázi se ochlazuje velmi rychle, aby se potlačila perlitická přeměna, v druhé fázi, v intervalu teplot martenzitické přeměny, se volí mírnější ochlazování. [21,22]
- Izotermické kalení má výhodu v tom, že se po něm nepopouští. Zakalený materiál má již požadované mechanické vlastnosti, také se minimalizuje riziko trhlin na minimum. [20-22]
- Termální kalení se snaží vyrovnat teploty na povrchu a v jádře. Nejprve se ochlazuje v médiu, jehož teplota je o málo větší, než je teplota začátku martenzitické přeměny, následuje výdrž na této teplotě, která je kratší než doba počátku izotermické přeměny na bainit. Poté se pomalu ochlazuje v intervalu martenzitické přeměny. [22]

### 3.3 Popouštění

Popouštění se provádí po kalení, a to především za účelem snížení vnitřního pnutí. Dále se popouštěním snižuje tvrdost a křehkost a zvyšuje houževnatost, v některých případech, jako jsou nástrojové oceli, se však tvrdost popouštěním dá zvýšit, tzv. druhá tvrdost. Teplota popouštění se volí vyšší než 100 °C a nesmí překročit teplotu  $A_{c1}$ , podle velikosti popouštěcí teploty se rozlišuje popouštění na nízkoteplotní, to je od 100 do 350°C,

a vysokoteplotní, kde se teplota pohybuje od 350°C do teploty  $A_{c1}$ . Popouštěcí teploty mají vliv na tvrdost zakalené oceli, čím vyšší je teplota, tím více se sníží tvrdost, pro zachování tvrdosti nesmí překročit teplota popouštění 150°C, závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě je na obr. 15. Kalení na martenzitickou strukturu spojené s vysokoteplotním popouštěním se u konstrukčních ocelí nazývá zušlechťování. [18, 19, 21, 22, 25]



Obr. 15 Vliv popouštěcí teploty na tvrdost oceli 100Cr6 (ČSN 14 109)

Podle pochodů probíhajících v zakalené oceli lze popouštění rozdělit do čtyř stádií.

- První stádium je v rozmezí teplot 100 až 200°C. Rozpadá se vysokouhlíkový tetragonální martenzit na nízkouhlíkový kubický martenzit a přechodný hexagonální  $\epsilon$ -karbid ( $Fe_{2,4}C$ ). Vzniklý karbid má přednostní precipitační vytvrzovací účinek, tím kompenzuje pokles tvrdosti způsobený přeměnou martenzitu. Dochází také k zmenšení měrného objemu. [21,26]
- Druhé stádium probíhá v rozmezí teplot 200 do přibližně 280°C. Rozpadá se zbytkový austenit na ferit a na cementit nebo karbidy. I přes rovnoměrné snižování tvrdosti se snižuje i houževnatost. Dále se snižuje vnitřní pnutí, roste měrný objem a uvolňuje se teplo. [21,26]



- Třetí stádium je v rozmezí teplot 300 až 400°C. Zbytkový austenit se úplně rozpadá na ferit a karbidy, rozpouští se  $\epsilon$ -karbid a vzniká cementit, tato struktura se nazývá sorbit. Dochází k sferoidizaci karbidů, tudíž se mění tyčinkové nebo deskové karbidy na globulární. Klesá obsah uhlíku v matrici a vnitřní pnutí. Klesá i tvrdost a pevnost, zatímco se zvyšuje tvárnost a houževnatost. [21,26]
- Čtvrté stádium probíhá nad teplotou 450°C. Rostou feritická zrna a mění se velikost karbidů. Hrubne sorbitická struktura, která se nazývá zrnitý perlit. Roste tvárnost a houževnatost. [26]

Při popouštění může vznikat popouštěcí křehkost, ta souvisí s probíhajícími změnami na hranicích zrn austenitu. Projevuje se snížením houževnatosti za pokojové a posunutím přechodové teploty k vyšším hodnotám. Jako samotné popouštění, tak i popouštěcí křehkost se dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní popouštěcí křehkost se objevuje u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí s přísadami chromu (Cr), manganu (Mn) a niklu (Ni), a to v rozmezí teplot 250 až 400°C a jedná se o trvalou neboli nevratnou popouštěcí křehkost. Vysokoteplotní popouštěcí křehkost se objevuje zejména u vysokolegovaných ocelí v rozmezí teplot 450 až 600°C, je odstranitelná neboli vratná a lze jí předejít pomocí legujících prvků jako je molybden, wolfram a hliník. Bylo zjištěno, že největší podíl na přítomnosti popouštěcí křehkosti má fosfor (P), a to už při 0,005 % jeho obsahu v oceli. [20,21,25]

## 4. Tvrdoměrné destičky

### 4.1 K čemu slouží tvrdoměrné destičky

Jednou z rozhodujících kontrolních činností v oblasti metrologie mechanických veličin u uživatelů kovových materiálů je ucelený systém měření tvrdosti, který k ověření a kontrole vstupních materiálů vyžaduje dostatečnou zásobu tvrdoměrných destiček všech rozsahů. Požadavky

vyšších mechanických a užitných vlastností nových materiálů, zejména se zvyšováním kvality technologických procesů speciální výroby, vyžaduje vyvíjet i tvrdoměrné destičky pro oblast malých zatížení, neboť v podstatě větší míře se uplatňují progresivní technologie povrchových úprav, kde tvrdost povrchových vrstev má často rozhodující vliv na zvyšování technologické úrovně výrobků, což vyžaduje stále více měření v oblasti nízkých zatížení, eventuálně měření mikrotvrdosti (např. měření povrchových vrstev, strukturních složek, materiálových charakteristik, řezné břity obráběcích nástrojů atd.). Z uvedeného je patrné, že se stále více budou uplatňovat tvrdoměrné destičky jako referenční materiály pro zabezpečení metrologie mechanických veličin.

Tvrdoměrné destičky nebo také kontrolní destičky slouží k pravidelné kontrole tvrdoměrů, ale i ke kontrole samotných indentorů, jelikož jejich hroty bývají nepřesně vyrobeny. Velký význam mají v tom, že měření destičky a materiálu výrobku probíhá za stejných podmínek, takže jsou zahrnuty všechny zdroje chyb. Destičky jsou cejchovány na určitou tvrdost s velice malým rozptylem. [9]

V tab. 1 jsou vypsány rozsahy vyráběných tvrdoměrných destiček. Pro běžně užívané materiály lze v zásadě rozdělit výrobu tvrdoměrných destiček do těchto kategorií [27]

#### 1) Makro Tvrdoměrné destičky

a) ocelové	110-200 HV
b) ocelové	200-900 HV
c) slitiny hliníku	30-150 HB
d) slitiny barevných kovů	70-110 HB

#### 2) Mikro Tvrdoměrné destičky

a) ocelové	110-200 HV
b) ocelové	70-900 HV

Tab. 1 Přehled rozsahů vyráběných tvrdoměrných destiček [28]

Kategorie	Stupnice	Soubor tvrdoměrných destiček				
		1	2	3	4	5
Brinell	HBS 10/3000	100-200	200-300	300-350	350-450	-
	HBW 10/3000	100-200	200-300	300-350	350-450	450-650
	HBS 5/750	100-200	200-300	300-350	350-450	-
	HBW 5/750	100-200	200-300	300-350	350-450	450-650
	HBS 2,5/187,5	100-200	200-300	300-350	350-450	-
	HBW 2,5/187,5	100-200	200-300	300-350	350-450	450-650
Vickers	HV 0,025	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 0,1	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 0,2	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 0,3	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 0,5	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 1	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 3	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 5	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 10	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 30	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 50	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HV 100	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
Knoop	HK 0,025	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HK 0,1	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HK 0,2	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HK 0,3	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HK 0,5	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
	HK 1	200-300	300-400	400-550	550-700	700-900
Rockwell	HRA	-	-	70-75	-	75-85
	HRB	60-80	80-90	90-100	-	-
	HRC	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
	HRF	90-100	-	100-110	-	-
Super Rockwell	HR 15 N	70-75	75-80	80-85	85-90	90-93
	HR 30 N	42-50	50-60	60-68	68-77	77-84
	HR 45 N	20-31	31-43	43-55	55-66	66-75
	HR 15 T	80-86	86-90	90-93	-	-
	HR 30 T	56-70	70-76	76-82	-	-
	HR 45 T	32-53	53-62	62-72	-	-

## 4.2 Tvar tvrdoměrných destiček

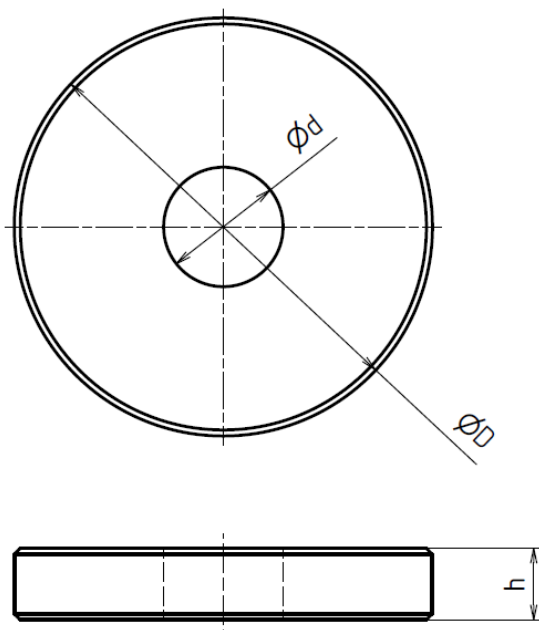
Tvrdoměrné destičky jsou vyráběny nejčastěji v kruhovém tvaru viz. obr. 16, ve třech základních rozměrech, a to jsou:

Průměr  $D = 35$  mm s dírou  $d = 7$  mm a výškou  $h = 7$  mm

Průměr  $D = 60$  mm s dírou  $d = 10,5$  mm a výškou  $h = 8,5$  mm

Průměr  $D = 120$  mm s dírou  $d = 12,5$  mm a výškou  $h = 12,5$  mm

Tvrdoměrné destičky lze vyrábět i v jiném nestandardním rozměru, například kruhový tvar jako je na obr. 16, ale bez vnitřního otvoru  $d$ , dále do tvaru obdélníku, čtverce nebo trojúhelníku a hranoly o rozměrech  $10 \times 10 \times 100$  mm ( $\text{Š} \times \text{V} \times \text{D}$ ). Podmínkou je, že musí být dvě paralelní plochy. Jedna plocha je zkušební a druhá je podkladová s opěrnou plochou. [27,28]



Obr. 16 Nejčastější tvar tvrdoměrné destičky

Standardní kruhový tvar s dírou uprostřed se pro své výhody prokázal jako optimální. Z pohledu ekonomického, jelikož výroba je jednoduchá a nenákladná a z technologického pohledu se při tomto tvaru lépe odvádí teplo při ochlazování, a tím vzniká rovnoměrnější struktura, která je podstatná při homogenitě tvrdosti. [27]

## 4.3 Materiály tvrdoměrných destiček

Výběr vhodných ocelí, které byly jak z hlediska chemického složení, tak z hlediska mechanických vlastností odzkoušeny ve speciálních slévárnách a laboratořích tepelného zpracování a mechanických zkušebnách ČKD, jsou uvedeny v tab. 2. Ocel musí mít nejen požadované chemické složení, ale musí být tavena pod struskou a odlévána ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. Jako optimální se osvědčila ocel s chemickým složením označeným VIII v tab. 2. Označení oceli je dle ČSN EN ISO 100Cr6 a dle ČSN 14 109. Je vhodná pro tvrdosti v rozsahu 190 až 890 HV. Další používaná ocel je EN C15 (ČSN 12 020), jejíž složení je v tab. 3. Tato ocel se používá pro tvrdosti od 120 HV. Z těchto ocelí se běžně vyrábějí tvrdoměrné destičky ve firmě Medet dle Brinella, Rockwella a Vickerse. [27]

Tab. 2 Chemické složení ocelí [27]

Chemické složení	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Cu	V
I	0,9-1,0	0,35	0,9-1,2	0,03	0,03	-	0,5-1,0	0,5-1,0	-	-
II	0,9-1,0	0,35	0,50	0,03	0,03	0,25	0,20	-	0,30	-
III	0,8-0,9	0,35	0,50	0,03	0,03	0,25	0,20	-	0,30	-
IV	0,9-1,0	0,15-0,35	0,50	0,025	0,025	0,25	1,3-1,6	-	0,30	-
V	1,0	0,20	1,20	0,03	0,01	0,50	0,60	0,40	-	0,20
VI	1,0-1,1	0,35	0,50	0,03	0,03	0,25	0,20	-	0,30	-
VII	1,0-1,1	0,35	0,80	0,03	0,03	-	0,5-1,0	1,0-5,0	-	-
VIII	0,9-1,1	0,15-0,35	0,30-0,50	max. 0,027	max. 0,030	max. 0,30	1,30-1,65	-	max. 0,25	-

Tab. 3 Chemické složení oceli C15 (12 020) [29]

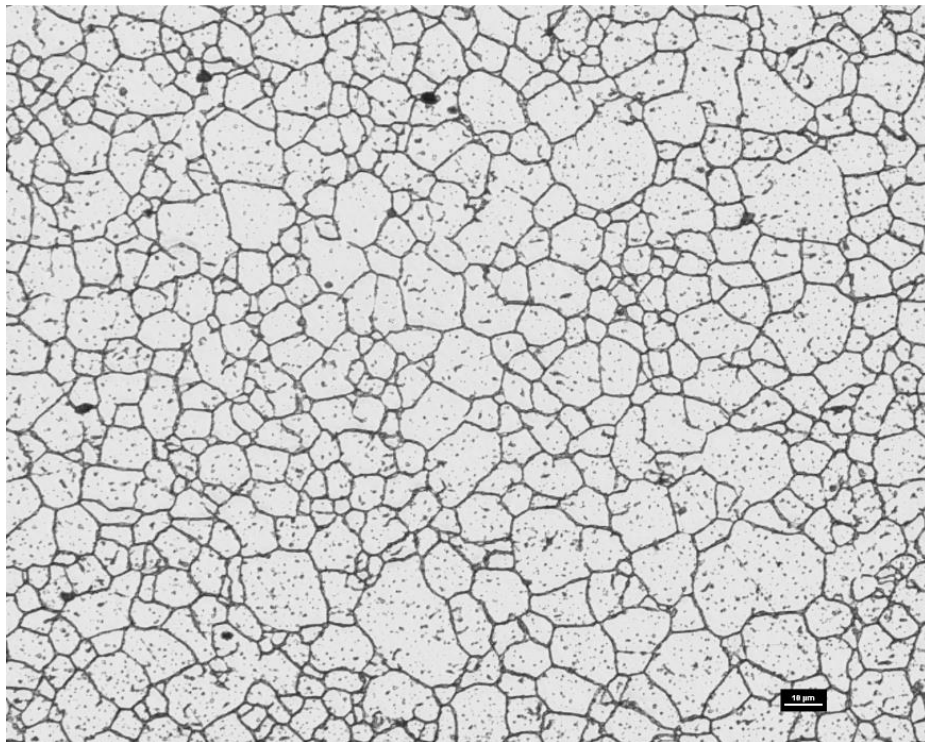
Prvky	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Cu
Hmotnostní podíl [%]	0,13 - 0,2	0,15 - 0,4	0,6 - 0,9	max. 0,04	max. 0,3	max. 0,25	max. 0,3

Tvrdoměrné destičky nejsou vyráběny pouze z oceli, ale i z neželezných barevných kovů. Největší zástupce v této kategorii je hliník Al, který zabírá asi 19% celkové výroby tvrdoměrných destiček ve firmě Medet, zbylé procento zastupují měď a bronz.

## 5. Mikrostruktura ocelí

### 5.1 Ferit

Ferit je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe. Jedná se o velmi měkkou, málo pevnou, feromagnetickou a tvárnou složku. Vyskytuje se v oceli, a to ve tvaru zrn (krystalů) nebo tvoří základní hmotu, která obsahuje ostatní strukturní složky. Při pozorování pod mikroskopem ve světlém poli, se ferit vyobrazí jako polyedrická bílá zrna, jako je na obr. 17. [1,19]



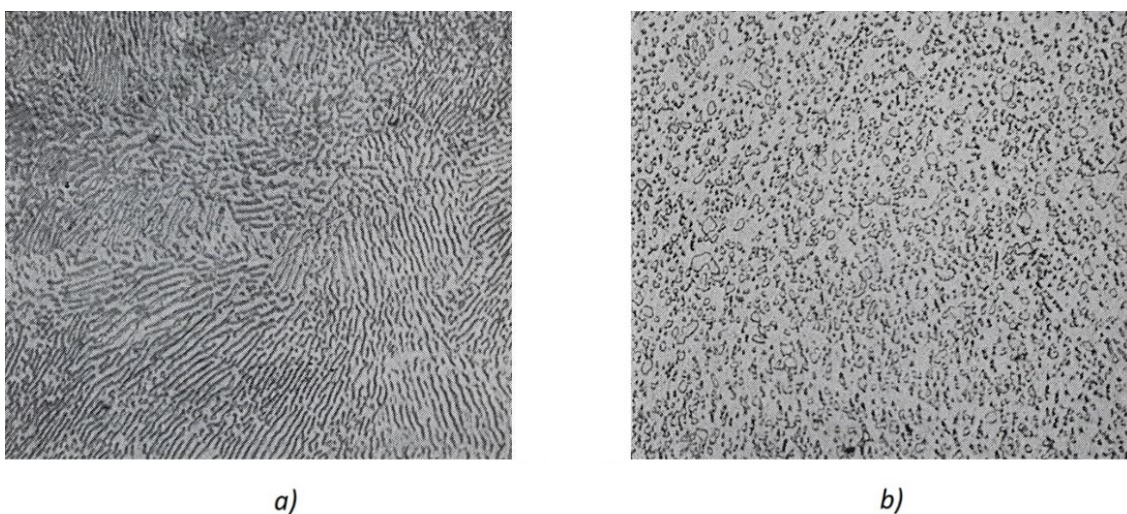
Obr. 17 Mikrostruktura feritu

## 5.2 Cementit

Cementit je karbid železa  $\text{Fe}_3\text{C}$  – intermediární fáze, který obsahuje více uhlíku než ferit a austenit, a to až 6,67% C. Vzhledem ke zvýšenému obsahu uhlíku je cementit tvrdý a křehký a jeho přítomnost je obvykle spíše vedlejším produktem než konstrukčním prvkem. Vyskytuje se z pravidla ve tvaru kuliček, jehlic, tenkých destiček nebo i tenkých obalů perlitických zrn. Cementit se běžně vyskytuje v ocelích, když se přebytečný uhlík, který nemůže být absorbován do feritu, využije pro tvorbu krystalů. Cementit má při pozorování pod mikroskopem bílou barvu. [1,19,30]

## 5.3 Perlit

Perlit je eutektoid metastabilní soustavy, nejčastěji se skládá ze svazků jemných destiček cementitu a feritu, tomuto tvaru se říká páskový nebo spíše lamelární a je vidět na obr. 18 a). Po tepelném zpracování se cementitové destičky shlukují do kuliček, které jsou stejnosměrně uloženy ve feritu, tomu tvaru perlitu se říká globulární, který je na obr. 18 b). Při pozorování pod mikroskopem s menším zvětšením se perlit vyobrazí jako tmavá strukturní složka. Lamelární perlit je poměrně tvrdý a těžko obrobitelný, zatímco globulární je měkký a snadno obrobitelný. [1,19]



Obr. 18 Mikrostruktura oceli s 0,9% C a) lamelární perlit b) globulární perlit [19]

## 5.4 Martenzit

Martenzit je nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku a jednofázová struktura, která je výsledkem difúzní transformace austenitu. Má typický tvar jehlic neboli čočkovitých destiček viz obr. 19. Vzniká, když jsou austenitizované slitiny železa a uhlíku rychle ochlazovány na relativně nízkou teplotu (teplotu okolního prostředí). Lze jej považovat za produkt transformace, který konkuruje perlitu a bainitu. K martenzitické transformaci dochází, když je rychlost kalení dostatečně rychlá, aby se zabránilo difúzi uhlíku. Jakákoli difúze bude mít za následek tvorbu feritových a cementitových fází. [20,31,32]



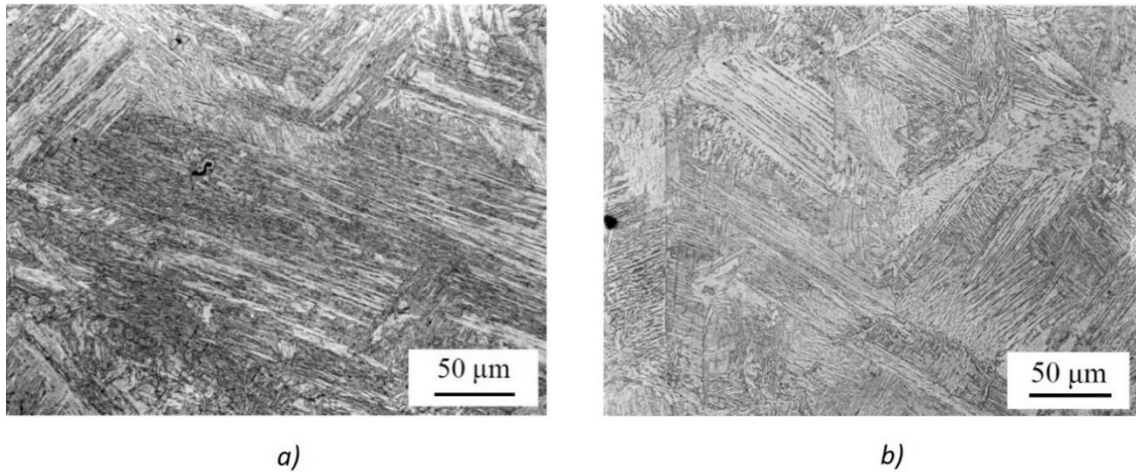
Obr. 19 Mikroskopický snímek martenzitické struktury.

## 5.5 Bainit

Bainit je produkt austenitické transformace. Mikrostruktura bainitu se skládá z feritových a cementitových fází, a tak se podílejí na jeho tvorbě difúzní procesy. Bainit se tvoří jako jehly nebo desky, v závislosti na teplotě transformace. Čím nižší byla teplota vzniku, tím jsou jehlice obvykle výraznější. Teplotou vzniku lze bainit rozdělit na dolní bainit, který vzniká při



dolních teplotách jeho vzniku, a horní bainit, který vzniká v rozmezí teplot 350 až 500°C. Na obr. 20 je vidět a) dolní a b) horní bainit. Mikrostrukturní detaily bainitu jsou tak jemné, že jejich rozlišení je možné pouze pomocí elektronového mikroskopu. [20,31]



Obr. 20 Mikrostruktura a) dolní bainit b) horní bainit [32]

Perlitická a bainitická transformace jsou navzájem velice konkurenceschopné. V případě, kdy se určitá část slitiny transformuje na perlit nebo bainit, není transformace na další mikrostrukturu možná bez opětovného zahřátí za vzniku austenitu. [31]

## 6. Experimentální část

Pro experiment byly vybrány dvě destičky rozdílných tvrdostí, ale ze stejného materiálu 100Cr6. Chemické složení materiálu je v tab. 4. Destičky nám poskytla firma Medet. Tvrdoměrné destičky byly vybrány po proměření v akreditované laboratoři. Destička 1, vyráběna na tvrdost  $800 \pm 30$  HV1, byla dodána s naměřeným rozptylem tvrdosti 8,9 %. Destička 2, vyráběná na tvrdost 347 HV0,5, byla dodána i s kalibračním listem.

Tab. 4 Chemické složení oceli 100Cr6 [27]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Hm. [%]	0,9 - 1,1	0,15 - 0,35	0,3 - 0,5	max 0,027	max 0,03	max 0,3	1,30 - 1,65	max 0,25

### 6.1 Výroba tvrdoměrných destiček

#### Slévání

Celý technologický postup výroby tvrdoměrných destiček začíná ve slévárně, kde byla ocel odlévána ve vakuu nebo pod ochrannou atmosférou, a především dodržet předepsané chemické složení (viz. tab. 4) v celém objemu. Materiál se dodává ve formě tyčí.

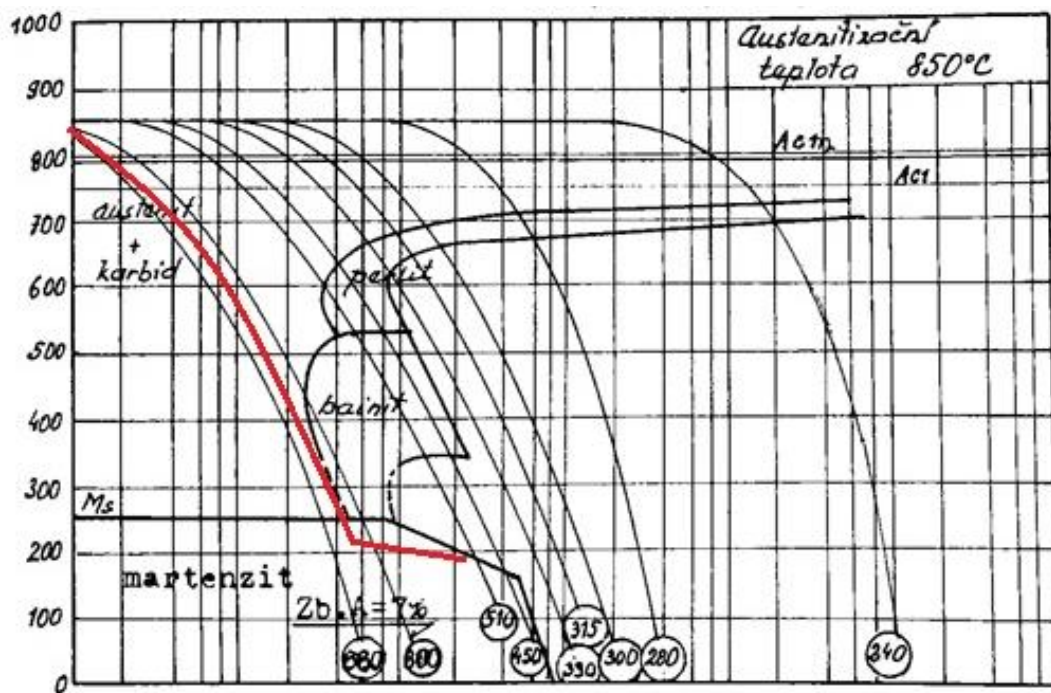
#### Obrábění

Tyče byly nařezány na poloautomatické pásové pile na přibližný rozměr s přídavky, v případě destiček použitých na experiment byly řezány na 8 mm. Poté se destičky přesouvají k soustruhu, kde byla nejdříve vyvrtána díra o průměru 7 mm, vnější průměr byl osoustružen na přesný rozměr, poté byla obrobena tloušťka na rozměry s přídavky na broušení, to je přibližně 7,3 mm a poté následuje zkosení všech hran.

#### Tepelné zpracování

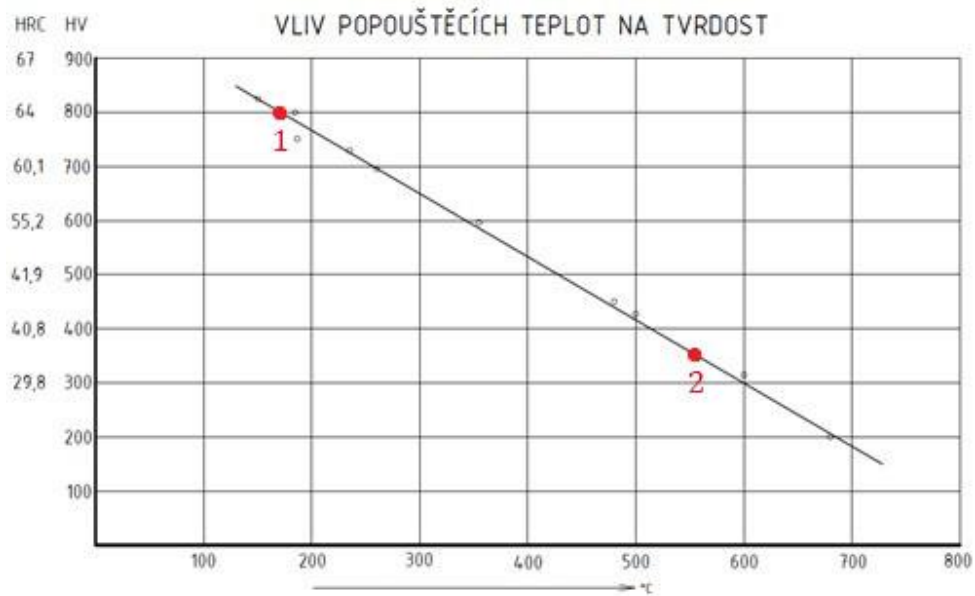
První fází je kalení, destičky byly vloženy do přípravku, kde leží po  $45^\circ$  úhlem a s mezerami mezi sebou tak, aby došlo k co nejrovnoměrnějšímu prohřátí materiálu a nevznikly tak rozdíly ve struktuře. Destičky byly ohřívány na kalící

teplotu v elektrické peci předehřáté na  $830 \pm 5$  °C po dobu 55 minut. Po vytažení z pece byly destičky ponořeny do kalícího oleje. Zde však nesmí staticky stát na jednom místě, jelikož by mohl vzniknout parní polštář. Parní polštář jsou bublinky vytvořené párou vzniklé rychlým odpařováním se oleje a výrazně by ovlivnil teplotu okolí destiček a tím i celý proces kalení, tudíž se musí s destičkami v oleji různě hýbat. Po překročení kritické teploty, kolem 220 °C (viz. obr. 21, zlom červeně vyznačené čáry) byly destičky z oleje vytaženy ven a nechaly se okapat. Po okapání byly destičky čištěny v technickém benzínu, pro odstranění zbytků kalícího oleje a zároveň se odstraňují okuje vzniklé při kalení. Kalící křivka je červeně vyznačena v ARA diagramu na obr. 21.



Obr. 21 ARA diagram oceli 100Cr6 [MEDET]

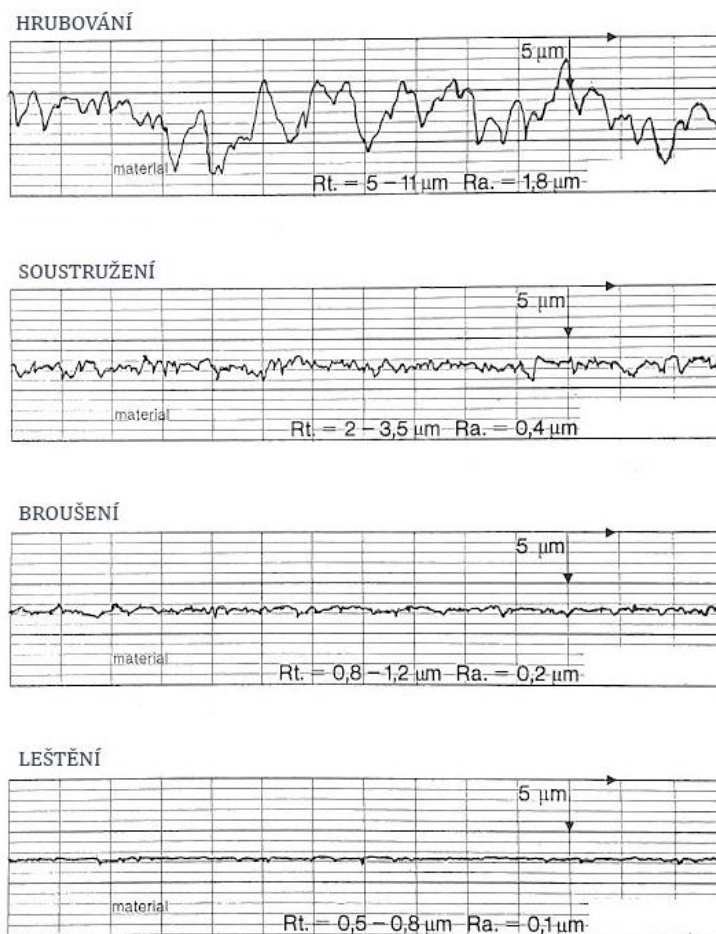
Po kalení následuje popouštění, které je pro dosažení požadované tvrdosti nejdůležitější. První zkoumaná destička byla popouštěna na teplotu 170 °C, to odpovídá první fázi popouštění viz kapitola 3.3 Popouštění. Druhá ze zkoumaných destiček byla popouštěná na teplotu 550 °C, to odpovídá čtvrté fázi popouštění. Teploty jsou zakresleny do diagramu na obr. 22.



Obr. 22 Vliv popouštěcí teploty na tvrdost

## Broušení a leštění

Broušení bylo provedeno na rovinné brusce za použití brusného kotouče K100. Destičky se brousí z obou stran, aby se zajistila rovnoběžnost měrné roviny s podstavou. Po broušení na rovinné brusce má již destička požadované rozměry. Následuje leštící proces, který se provádí pouze na jedné straně destiček. Provádí se na leštícím stroji za použití více brusných papírů různých hrubostí. Začíná se od nejhrubšího, který má hrubost 360, následuje hrubší s hrubostí 600, poté se použije papír s hrubostí 1200. Jako poslední krok se používá látkové plátno, na které se nanáší diamantová emulze s velikostí zrna 3  $\mu\text{m}$ , která vytvoří dokonale vyleštěný povrch připomínající zrcadlo. Drsnost povrchu po jednotlivých operacích je zobrazena na obr. 23. Destičky se chladí vodou nebo emulzí na bázi vody. Kdyby se destičky nechladily, došlo by k zahřátí povrchu destičky, to by vedlo k popouštění a tím pádem i k nerovnoměrnému snížení tvrdosti.



Obr. 23 Stav povrchové drsnosti, dosažené jednotlivými způsoby opracování [MEDET]

## 6.2 Postup experimentu

### 6.2.1 Měření tvrdosti

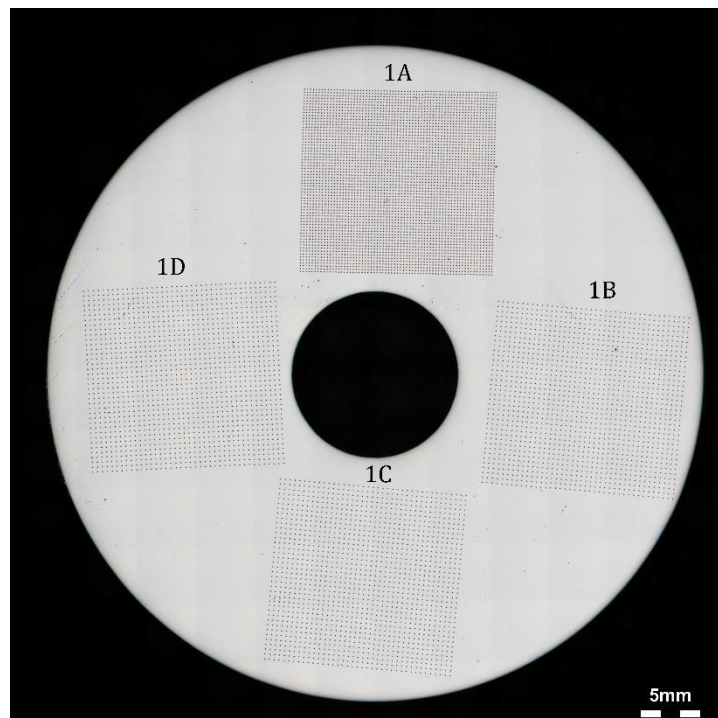
Tvrdoměrné destičky bylo potřeba před měřením pouze odmastit lihem a vysušit. Pro měření byla zvolena metoda měření tvrdosti podle Vickerse se zatížením 1 kp (9,81 N) a s dobou výdrže 10 vteřin. Tvrdost byla měřena automatickým tvrdoměrem Struers Duramin 40, který je na obr. 24. Na každou z destiček byly zvoleny 4 mapy měření. Na první mapě byla nastavena pro zkoušku velká hustota vtisků, na 280 mm<sup>2</sup> se vměstnalo 4158 vtisků. Pro další mapy byla zvolena menší hustotu vtisků, na stejnou plochu se snížil počet vtisků na 1520, čímž se také snížil čas potřebný pro měření. Po uložení výsledků byl vytvořen soubor s bodovým grafem a barevným grafickým schématem podle tvrdosti jednotlivých vtisků. Barevná grafická schémata jsou uvedena u jednotlivých map (obr. 26-29 a 31-34).



Obr. 24 Tvrdoměr Struers Duramin 40

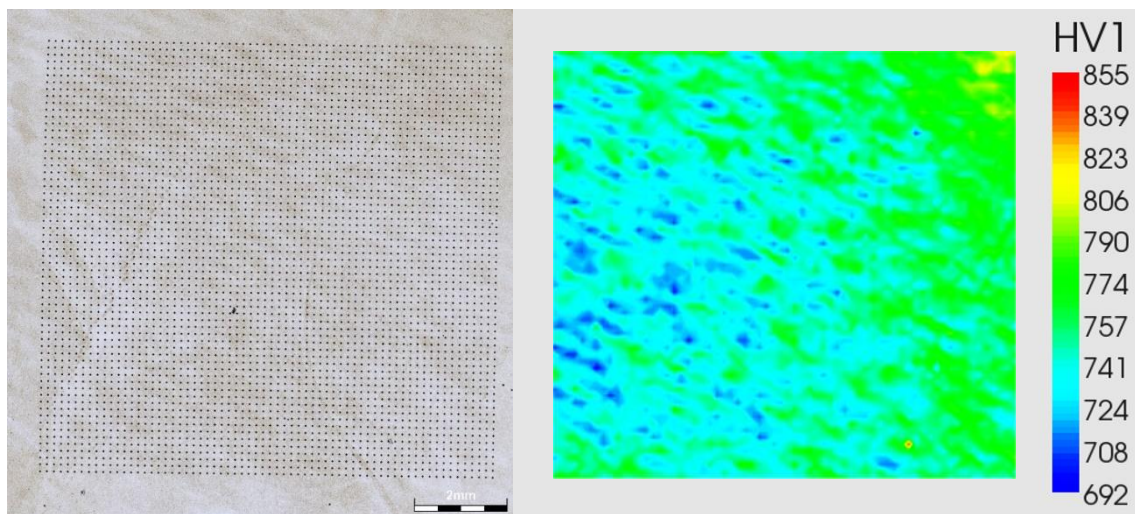
### Destička 1

Destička vyráběna na tvrdost  $800 \pm 30$  HV1. Na destičce byly měřeny čtyři mapy. Rozložení map na destičce 1 a jejich označení je uvedené na obr. 25.



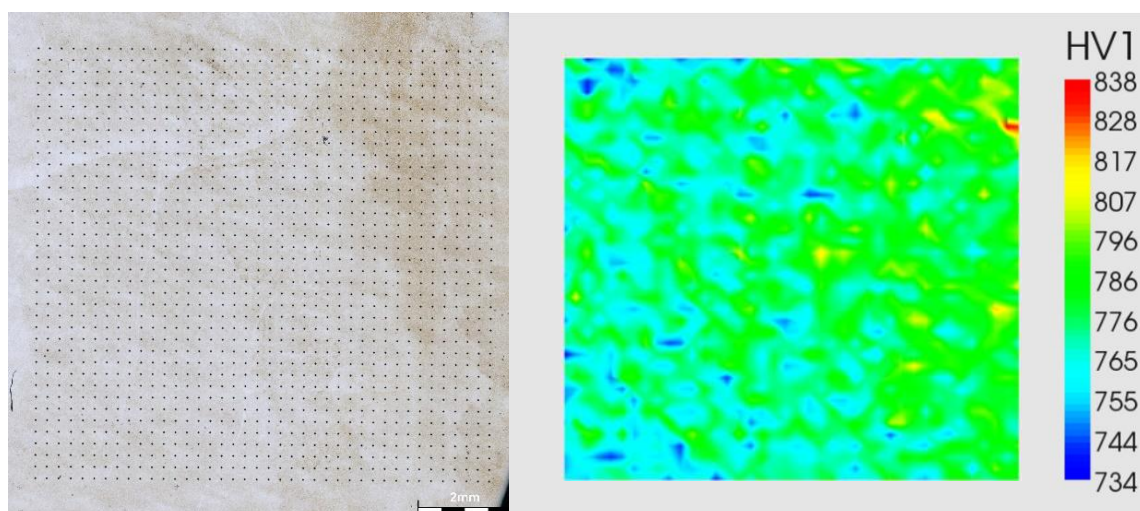
Obr. 25 Destička 1 s označenými mapami vtisků

Mapa 1A měla největší počet vtisků, přesně 4158 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 826 HV1, nejnižší naměřená tvrdost byla 691 HV1 a průměrná tvrdost mapy byla  $747 \pm 17$  HV1.



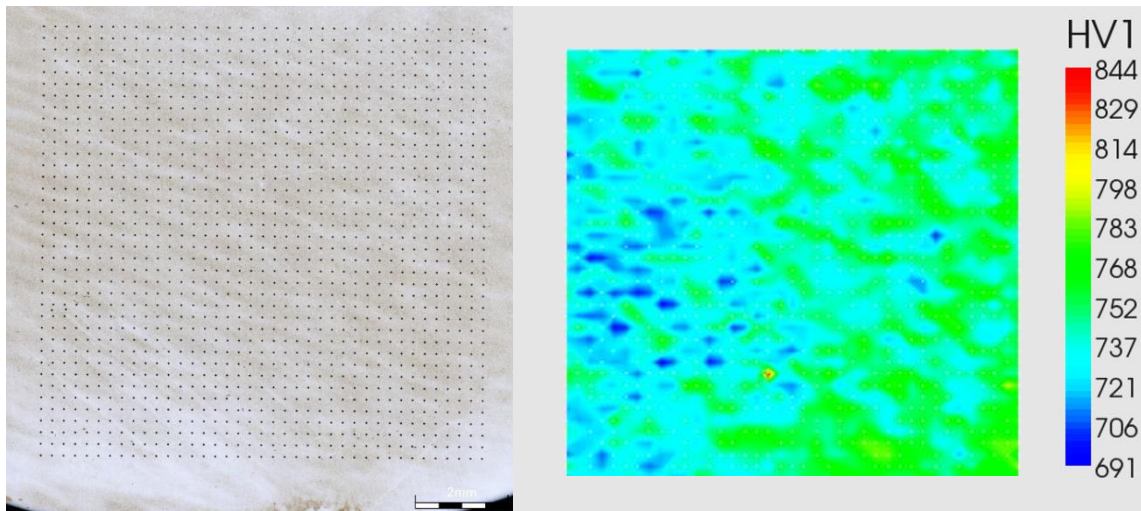
Obr. 26 Mapa 1A s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti

Mapa 1B měla již snížený počet vtisků, a to přesně 1520 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 838 HV1, nejnižší naměřená tvrdost byla 733 HV1 a průměrná tvrdost měla hodnotu  $774 \pm 14$  HV1.



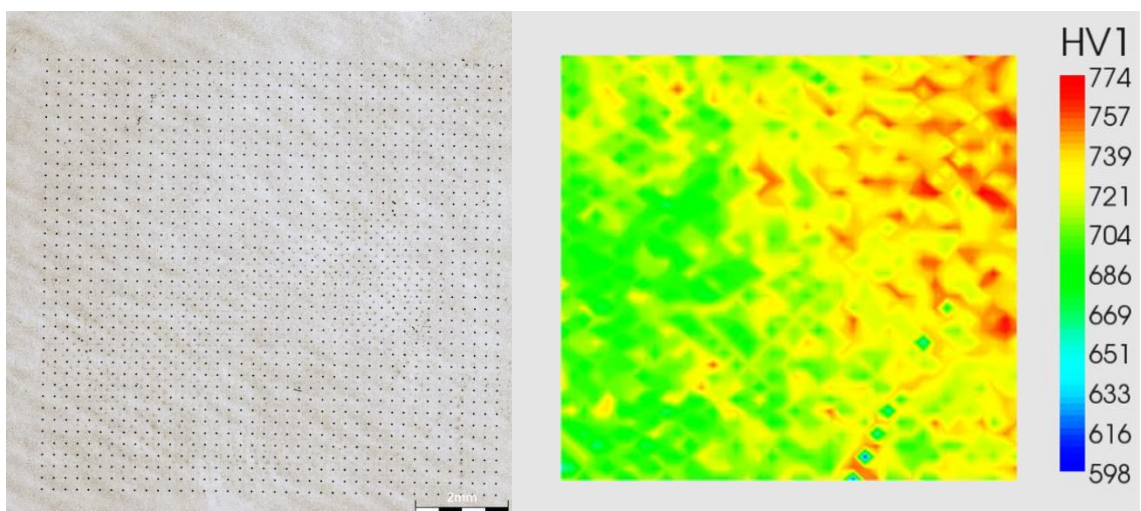
Obr. 27 Mapa 1B s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti

Mapa 1C měla 1520 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla zároveň nejvyšší naměřená hodnota destičky 1 s hodnotou 845 HV1. Nejnižší hodnota na této mapě byla 690 HV1 a průměrná hodnota tvrdosti byla  $740 \pm 17$  HV1.



Obr. 28 Mapa 1C s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti

Mapa 1D měla stejný počet vtisků jako předchozí dvě mapy, a to 1520 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 774 HV1. Nejnižší hodnota byla zároveň nejnižší naměřená hodnota destičky 1 a měla hodnotu 598 HV1. Průměrná tvrdost byla  $718 \pm 20$  HV1.

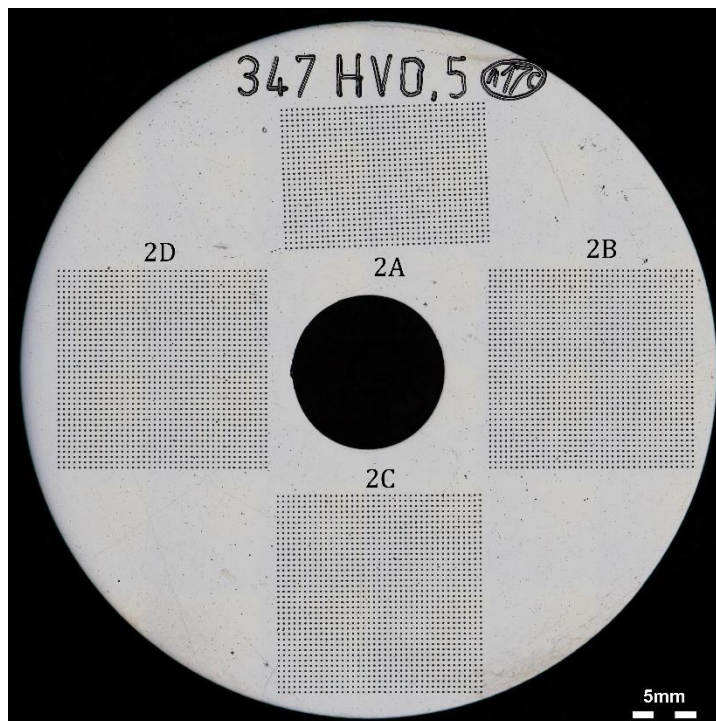


Obr. 29 Mapa 1D s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti



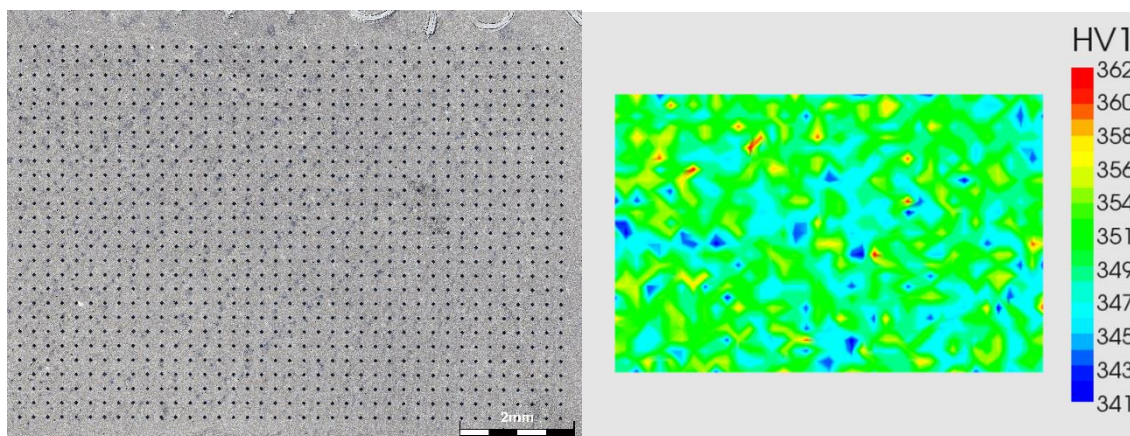
## Destička 2

Destička vyráběna na tvrdost 347 HV0,5. Na destičce byly měřeny taktéž čtyři mapy. Rozložení map na destičce 2 a jejich označení je uvedené na obr. 30.



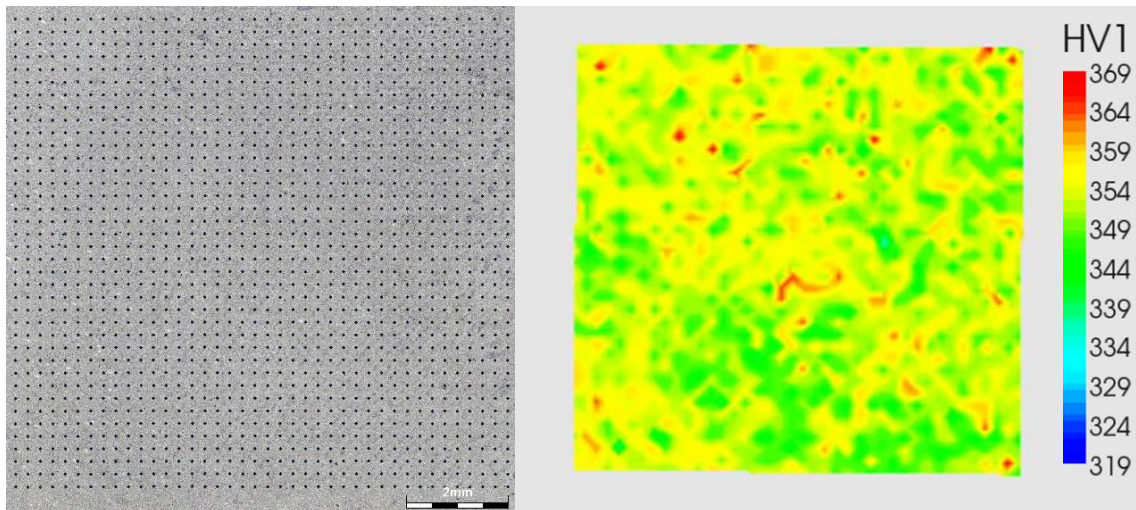
Obr. 30 Destička 2 s označenými mapami vtisků

Mapa 2A měla nejmenší počet vtisků, a to 1053, jelikož zde bylo vyryto označení tvrdosti. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 362 HV1, nejnižší naměřená tvrdost byla 340 HV1 a průměrná tvrdost měla hodnotu  $349 \pm 4$  HV1



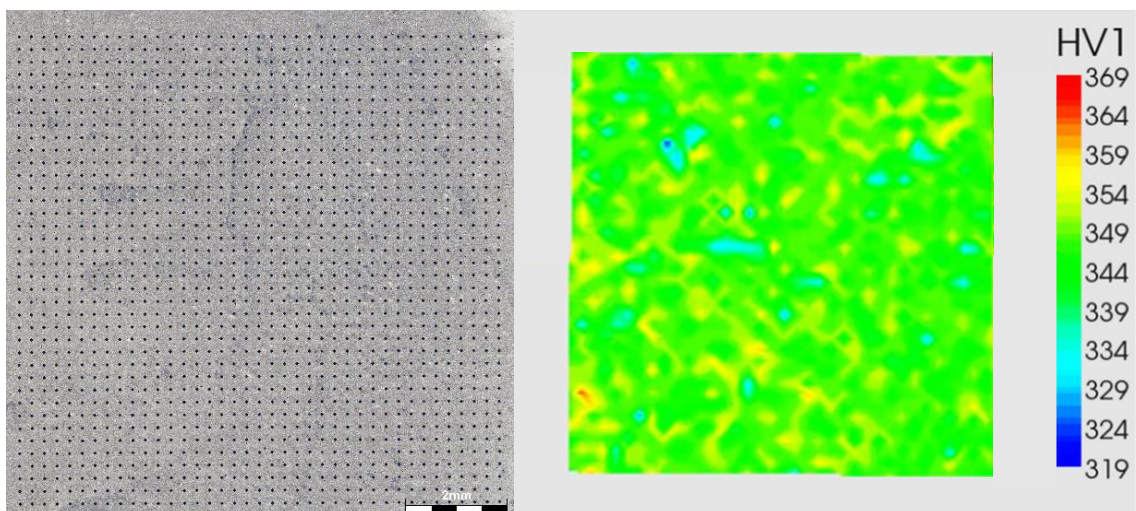
Obr. 31 Mapa 2A s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti

Mapa 2B měla 1482 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 369 HV1, nejnižší naměřená tvrdost byla 332 HV1 a průměrná tvrdost měla hodnotu  $352 \pm 4$  HV1



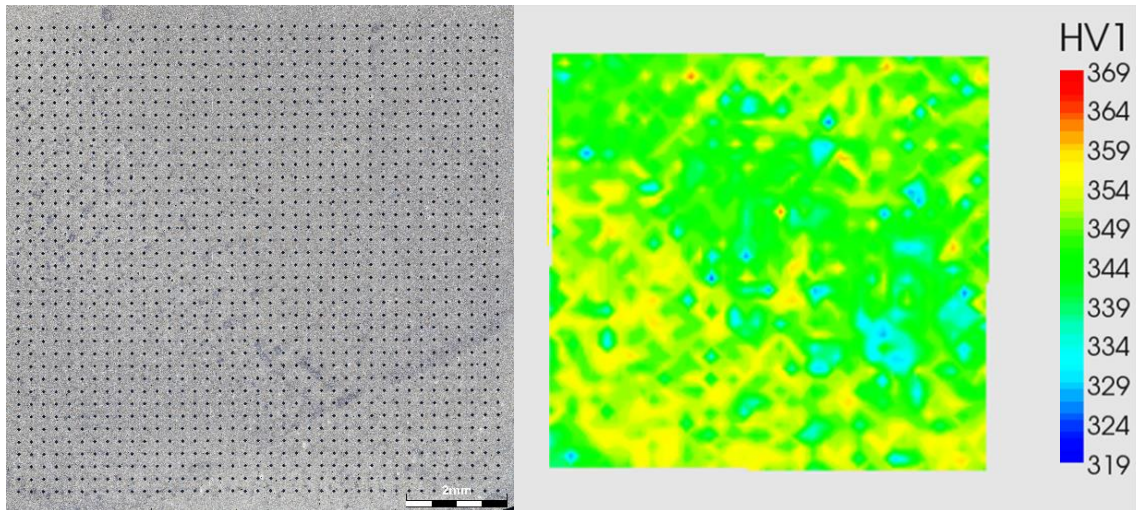
*Obr. 32 Mapa 2B s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti*

Mapa 2C měla největší počet vtisků na destičce 2, a to 1520 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 364 HV1, nejnižší naměřená tvrdost byla 319 HV1 a průměrná tvrdost byla  $347 \pm 5$  HV1



*Obr. 33 Mapa 2C s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti*

Mapa 2D měla počet vtisků jako mapa 2B, a to 1482 vtisků. Nejvyšší tvrdost naměřená na této mapě byla 363 HV1, nejnižší naměřená tvrdost byla 321HV1 a průměrná tvrdost měla hodnotu  $347 \pm 6$  HV1



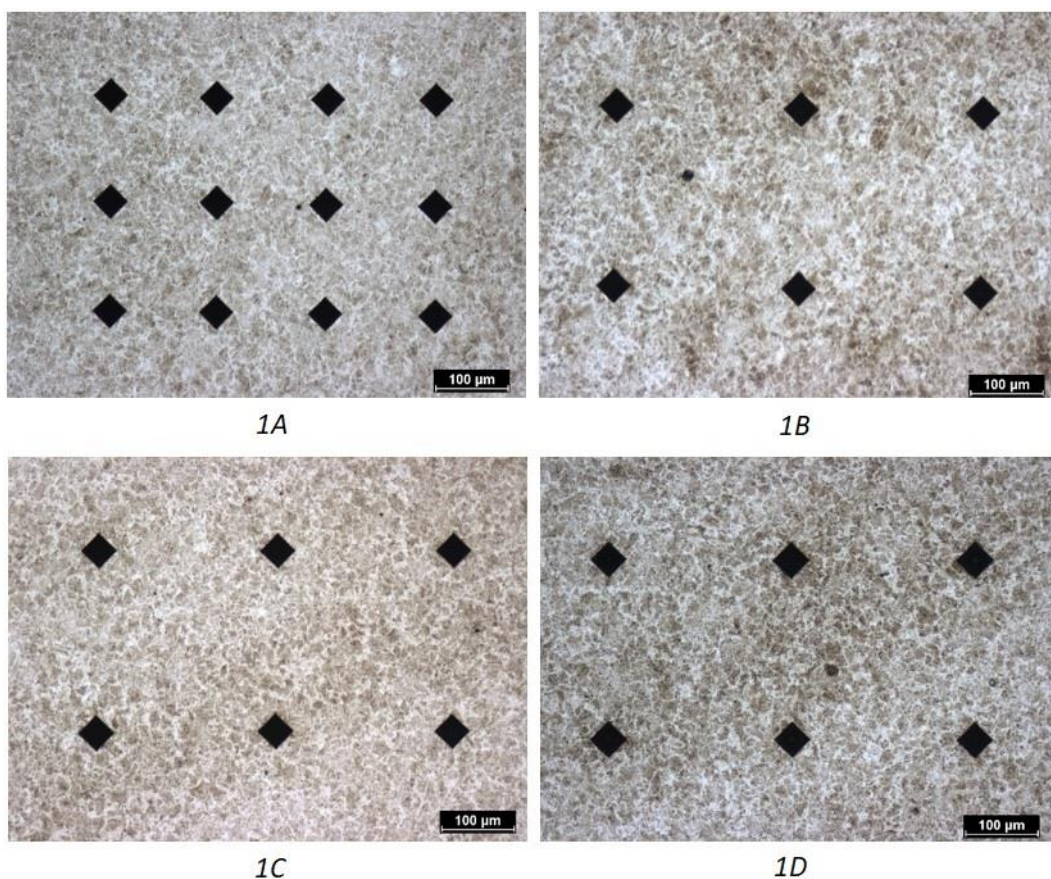
Obr. 34 Mapa 2D s příslušným barevným grafickým schématem tvrdosti

## 6.2.2 Hodnocení mikrostruktury

Před samotným hodnocením mikrostruktury destiček bylo potřeba přešetřit zkoumanou plochu. Leštění muselo být jemné, aby byly zachovány vtisky. Pro leštění byla použita metalografická bruska a leštička Leco GPX 300 za použití leštícího plátna a roztoku  $\text{SiO}_2$ . Mikrostruktura byla zviditelněna leptadlem Nital, jedná se o 2-3 % roztok kyseliny dusičné v alkoholu. Destička byla následně opláchnuta technickým alkoholem a vysušena. Samotné pozorování mikrostruktury se provádělo pomocí dvou mikroskopů. Pro snímky jednotlivých destiček a celých naleptaných map byl použit mikroskop značky Olympus řady DSX1000. Pro detailní snímky naleptané struktury byl použit inverzní světelný optický metalografický mikroskop Zeiss Neophot 32.

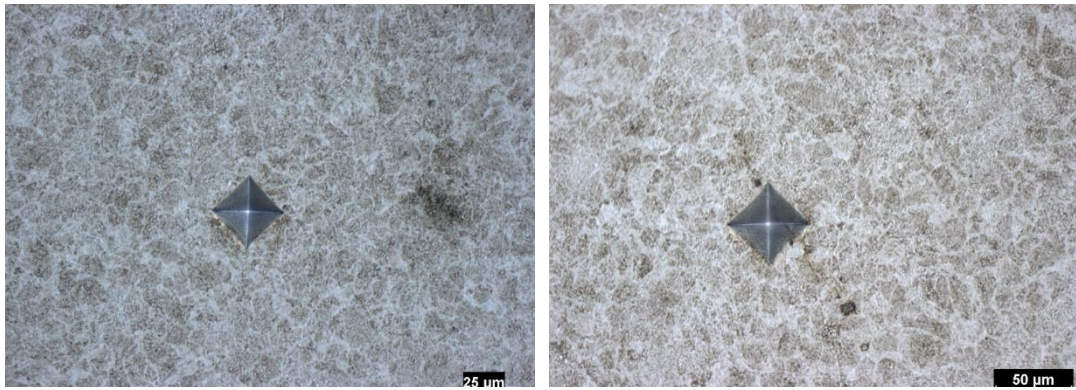
## Destička 1

Mikrostruktura destičky 1 je uvedena na obr. 35 se snímky všech čtyř map. Mikrostruktura je tvořena směsí popuštěného martenzitu a feriticko-cementitickou směsí neboli troostitem



Obr. 35 Mikrostruktura destičky 1, snímky všech čtyř map

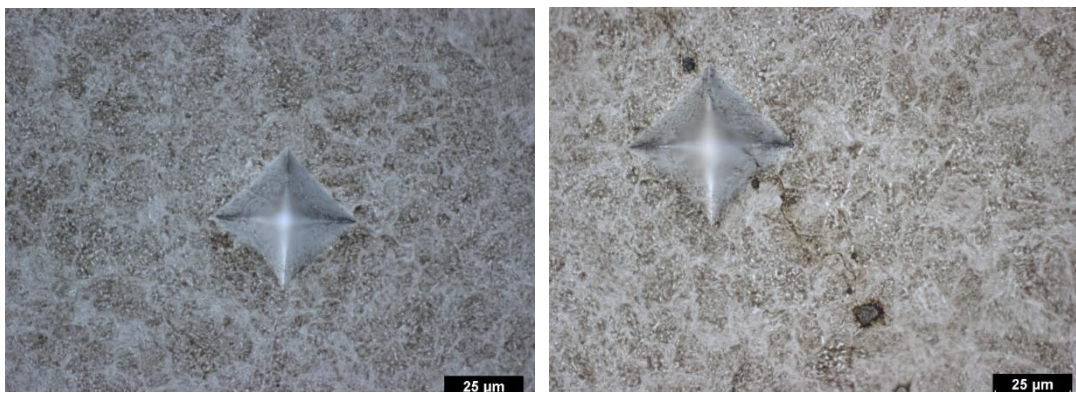
Místo vtisků s nejvyšší naměřenou hodnotou tvrdosti na destičce 1 bylo naměřeno na mapě 1C a místo vtisku s nejnižší naměřenou hodnotou bylo naměřeno na mapě 1D. Mikrostruktura v místě vtisku s nejvyšší hodnotou tvrdosti nebyla nijak výrazně rozdílná od mikrostruktury celé destičky. To samé platí pro mikrostrukturu v okolí vtisku s nejnižší hodnotou tvrdosti, kterým prochází trhlinka, která mohla vzniknout špatným tepelným zpracováním, ale také výrobou polotovaru. Detail mikrostruktury s nejnižší a nejvyšší tvrdostí je na obr. 36 a 37.



*a)*

*b)*

*Obr. 36 Mikrostruktura v okolí vtisku a) s nejvyšší hodnotou tvrdosti  
b) s nejnižší hodnotou tvrdosti na destičce 1*



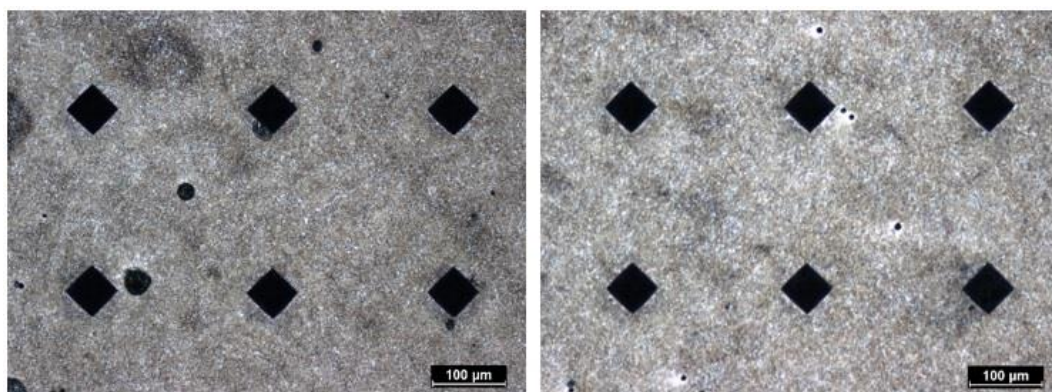
*a)*

*b)*

*Obr. 37 Mikrostruktura v okolí vtisku a) s nejvyšší hodnotou tvrdosti  
b) s nejnižší hodnotou tvrdosti na destičce 1*

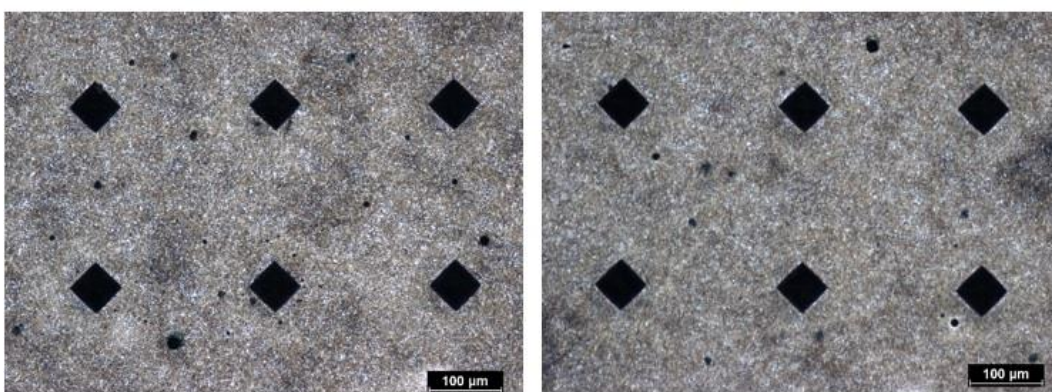
## Destička 2

Mikrostruktura destičky 2 je uvedena na obr. 38 se snímky ve všech čtyř map. Na obr. 39 a 40 jsou snímky mikrostruktury s větším zvětšením pro lepší rozpoznání složení mikrostruktury. Struktura je tvořena vysokopopouštěným martenzitem neboli sorbitem.



2A

2B



2C

2D

Obr. 38 Mikrostruktura destičky 2, snímky všech čtyř map



Obr. 39 Mikrostruktura destičky 2



Obr. 40 Mikrostruktura destičky 2

## 7. Diskuze

Výroba tvrdoměrných destiček není jednoduchá, je zapotřebí dodržet všechny předepsané parametry, od chemického složení přes tepelné zpracování, až po finální broušení a leštění. Stejně důležité je dostatečné chlazení destiček po tepelném zpracování, tudíž během procesů broušení a leštění. Pokud se destička přehřeje, může dojít k popuštění struktury, a tím k nepravidelné změně tvrdosti na povrchu destičky. U destičky 1 došlo s největší pravděpodobností ke špatnému tepelnému zpracování, kdy došlo k neúplnému ohřevu na austenitizační teplotu, a tím vzniku mikrostruktury s popuštěným martenzitem a troostitem. Troostit v struktuře zvyšuje rozptyl tvrdosti, často i 10 %, a zároveň snižuje tvrdost. V našem případě namísto 800 HV1 jsme dosáhli průměrnou tvrdost jenom 744 HV1 s rozptylem 9,1 %. Rozptyl tvrdosti u destičky 2 byl 3,9 % a mikrostruktura byla tvořena vysokopopuštěným martenzitem neboli sorbitem. Mikrostruktura destičky 2 je taková, jakou po popuštění na 550 °C očekáváme, ale u destičky 1 podle očekávání není. Hodnoty maximálních, minimálních a průměrných hodnot i s jejich směrodatnou odchylkou jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Naměřené tvrdosti jednotlivých map

[HV1]	Destička 1				Destička 2			
Mapa	1A	1B	1C	1D	2A	2B	2C	2D
Maximální tvrdost	826	838	845	774	362	369	364	363
Minimální tvrdost	691	733	690	598	340	332	319	321
Průměrná tvrdost	747	774	740	718	349	352	347	347
Směrodatná odchylka	17	14	17	20	4	4	5	6

## 8. Závěr

Bakalářská práce se věnuje hodnocení kvality tvrdoměrných destiček vyrobených z oceli 100Cr6. Experiment byl proveden na dvou tvrdoměrných destičkách ze stejného materiálu, ale vyráběných na jinou tvrdost. Bylo prováděné měření tvrdosti podle Vickerse zatížením 1 kp. Dále byla pozorována a vyhodnocována mikrostruktura destiček.

Z měření tvrdosti vyplynulo, že průměrná tvrdost destičky 1 byla  $744 \pm 17$  HV1 s rozptylem tvrdosti 9,1 % a průměrná tvrdost destičky 2 byla  $347 \pm 4$  HV1 s rozptylem 3,9 %.

Z pozorování mikrostruktury bylo vyhodnoceno, že mikrostruktura destičky 1 obsahovala popuštěný martenzit a feriticko-cementitickou směs neboli troostit. Mikrostruktura destičky 2 obsahovala vysokopopuštěný martenzit neboli sorbit.

Měření tvrdosti jednotlivých destiček a hodnocení mikrostruktur prokázalo, že i sebemenší chyba při výrobě může způsobit, že je destička nepoužitelná pro svůj účel.



## Seznam literatury

1. SOBOTOVÁ, Jana, Elena ČIŽMÁROVÁ, Jakub HORNÍK a Zdeňka JENÍKOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2014, 103 s. ISBN 978-80-01-05550-2
2. JAREŠ, Vojtěch. ČESKÁ MATICE TECHNICKÁ. *Metalografie neželezných kovů*. Praha: Vědecko-technologické nakladatelství, 1950, 380 s. VTN 24.
3. MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Dotisk prvního vydání. Praha: ČVUT, 1999, 209 s. ISBN 80-01-01507-6.
4. PÍŠEK, František, Jiří ŠKAREK a Aleš VETIŠKA. *Nauka o materiálu II*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. Československá akademie věd.
5. ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály: Zkouška tvrdosti podle Brinella*. Český normalizační institut, 2006.
6. TABOR, David. *The hardness of metals*. Dotisk. Oxford: Clarendon press, 2000, 175 s. ISBN 0-19-850776-3.
7. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-720-4248-3.
8. SKOČOVSKÝ, Petr, Otakar BOKŮVKA, Radomila KONEČNÁ a Eva TILLOVÁ. *Náuka o materiáli pre odbory strojnícke*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2001, 381 s. ISBN 80-7100-831-1.
9. JAREŠ, Vojtěch. *Základní zkoušky kovů a jejich teorie*. Praha: Academia, 1966, 210 s.
10. MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2798-8.
11. MACHAČ, Miroslav. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot* [online]. Brno, 2010 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27306](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306). Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
12. ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály: Zkouška tvrdosti podle Rockwella*. Český normalizační institut, 2006.

13. HORÁČEK, Jaroslav. *Nauka o materiálu (návod na cvičení)*. Dotisk 2. vydání z roku 2003. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2004, 58 s. ISBN 80-213-1018-9.
14. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK, a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 178 s. ISBN 80-7043-417-1.
15. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály: Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. Český normalizační institut, 2006.
16. KREIBICH, Karel. *Hodnocení kvality tvrzených vrstev* [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66468/F2-BP-2015-Kreibich-Karel-Hodnoceni\\_kvality\\_tvrzenych\\_vrstev.pdf?sequence=-1](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66468/F2-BP-2015-Kreibich-Karel-Hodnoceni_kvality_tvrzenych_vrstev.pdf?sequence=-1). Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Jakub Horník, PhD.
17. The Knoop microhardness tester as a mineralogical tool. *American Mineralogist* [online]. 2004 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: [http://www.minsocam.org/MSA/collectors\\_corner/arc/knoop.htm](http://www.minsocam.org/MSA/collectors_corner/arc/knoop.htm)
18. MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné zpracování kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 133 s. ISBN 978-80-01-04186-4.
19. PATTERMANN, Otto. *Nástrojové oceli: vlastnosti nástrojových ocelí a způsoby i zařízení k jejich tepelnému zpracování se zvláštním zřetelem k nástrojovým ocelím Poldiny hutí*. Kladno: O. Pattermann, 1937.
20. JAREŠ, Vojtěch. *Metalografie ocele*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1960. Studie a prameny.
21. MORÁVEK, Otakar a Vladislav BABOROVSKÝ. *Nástrojové materiály a tepelné zpracování nástrojů*. Vydání druhé upravené. Praha: SNTL, 1975, 528 s. 04-226-75.
22. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. Třetí, doplněné a upravené vydání. Praha: SNTL, 1977, 400 s. 04-403-77.

23. ŠPRTA, Pavel. *Metody sekundárního ovlivňování struktury ocelí a ocelových ingotů* [online]. Brno, 2016 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=127600](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127600). Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Blažík.
24. HROMADA, Bc. Martin. *Povrchové kalení ocelí vláknovým YBYAG laserem* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64707](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64707). Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
25. GÁBRIŠOVÁ, Zuzana a Alena BRUSILOVÁ. *Tepelné spracovanie: Návody na cvičenia*. Bratislava: Spektrum STU, 2019, 134 s. ISBN 978-80-227-4894-0.
26. VÁŇOVÁ, Petra. *Základy tepelného zpracování*. Ostrava. Studijní opora. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava.
27. TRUHLAŘÍK, Vilém. *Technická zpráva z výroby tvrdoměrných destiček*. Praha, 1989, 28 s.
28. Nabídka - products. *Medet.cz* [online]. Praha [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://www.medet.cz/14874/nabidka-products>
29. Tyče 12 020. *Czferronasteel* [online]. [cit. 2021-04-07]. Dostupná z: <http://www.czferronasteel.cz/pdr.tyce-12020.pdf>
30. DANIEL. What is the difference between ferritic, austenitic and martensitic stainless steel? *Accu.co.uk* [online]. 21.5.2020 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.accu.co.uk/en/p/112-what-is-the-difference-between-ferritic-austenitic-martensitic-stainless-steels-accu>
31. Cejp, Jiří. *Materials science: metallic materials*, 1999
32. MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: Kovové materiály*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.