

# Měření mikro-mechanických vlastností tepelně zpracovaných ocelí

Jaroslav Zapletal

---

Bakalářská práce  
2014

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2013/2014

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav Zapletal**  
Osobní číslo: **T11303**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mikro-mechanických vlastností tepelně zpracovaných ocelí**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Příprava zkušebních těles pro experimentální část.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Martin Ovsík**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

**10. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: Jaroslav Zapletal

Obor: TZ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 21.05.2014

Zapletal

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>31</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá měřením mikro-mechanických vlastností modifikovaných ocelí za pomoci Instrumentované vnikací zkoušky tvrdosti – DSI. V teoretické části jsou popsány druhy ocelí, typy tepelného zpracování ocelí, metody měření tvrdosti a metoda DSI. Praktická část se popisuje grafické zpracování a vyhodnocení získaných výsledků.

Klíčová slova: druhy ocelí, tepelné zpracování, Brinell, Vickers, tvrdost, mikrotvrdost.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the measurement of micromechanical properties of the modified steels in help from Instrumented indentation hardness test - DSI. Theoretical section describes the types of steel, types of heat treatment of steels, hardness measurement method and the method of DSI. The practical part describes the graphic design and evaluation of the results.

Keywords: steels, heat treatment of steels, Brinell, Vickers, microhardness.

**Poděkování:**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Martinu Ovsíkovi Ph.D za ochotu, odborné rady a připomínky při zpracování této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu, speciálně své přítelkyni Therese Veselské za její péči a trpělivost během zpracování této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 OBECNÝ POPIS OCELI</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ OCELI .....	12
1.2 OCELI KE TVÁŘENÍ .....	13
1.2.1 Nelegované oceli .....	13
1.2.2 Legované oceli .....	15
1.3 OCELI NA ODLITKY .....	16
1.4 ČÍSELNÉ OZNAČOVÁNÍ OCELÍ .....	16
1.4.1 Oceli třídy 10.....	17
1.4.2 Oceli třídy 11.....	17
1.4.3 Oceli třídy 12.....	17
1.4.4 Oceli třídy 13.....	17
1.4.5 Oceli třídy 14.....	17
1.4.6 Oceli třídy 15 – 16.....	17
1.4.7 Oceli třídy 17.....	18
1.4.8 Oceli třídy 19 (nástrojové) .....	18
<b>2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ</b> .....	<b>19</b>
2.1 ŽÍHÁNÍ.....	19
2.1.1 Žíhání bez překrystalizace.....	20
2.1.2 Žíhání s překrystalizací .....	21
2.2 KALENÍ.....	22
2.2.1 Způsoby kalení .....	23
2.3 POPOUŠTĚNÍ .....	24
2.3.1 Popouštění při nízkých teplotách (napouštění) .....	25
2.3.2 Popouštění při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování).....	25
2.4 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ .....	25
2.4.1 Cementování.....	25
2.4.2 Nitridování .....	27
<b>3 TVRDOST</b> .....	<b>28</b>
3.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	28
3.1.1 Zkouška podle Brinella (ČSN 42 0371-78).....	28
3.1.2 Zkouška podle Rockwella (ČSN 42 0372-81, 420373-78).....	30
3.1.3 Zkouška podle Vickerse (ČSN 42 0374-78) .....	31
3.1.4 Zkouška podle Knoop.....	32
3.1.5 Zkouška podle Berkoviče.....	33
<b>4 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI</b> .....	<b>35</b>



4.1	STANOVENÍ VTISKOVÉ TVRDOSTI $H_{IT}$ .....	35
4.2	STANOVENÍ VTISKOVÉHO MODULU $E_{IT}$ .....	36
4.3	STANOVENÍ VTISKOVÉHO TEČENÍ $C_{IT}$ .....	36
4.4	DEFORMAČNÍ PRÁCE .....	37
4.5	INDENTAČNÍ KŘIVKY .....	38
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
6.1	DRUHY VZORKŮ .....	42
6.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	43
6.3	POPIS MĚŘENÍ METODY DSI .....	45
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>47</b>
7.1	VTISKOVÁ TVRDOST $H_{IT}$ A NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VŠECHNY ZATÍŽENÍ.....	47
7.2	VTISKOVÝ MODUL $E_{IT}$ A NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VŠECHNY ZATÍŽENÍ .....	49
7.3	VTISKOVÉ TEČENÍ $C_{IT}$ A NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VŠECHNY ZATÍŽENÍ.....	51
7.4	TVRDOST $HV_{IT}$ A NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VŠECHNY ZATÍŽENÍ.....	54
7.5	NAMĚŘENÉ HODNOTY $W_{PLAST}$ , $W_{ELAST}$ , $N_{IT}$ .....	57
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>69</b>

## ÚVOD

Mezi hlavní mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů dnešní doby patří tvrdost. Má vliv na další vlastnosti materiálu jako třeba odolnost vůči opotřebení. Tvrdost materiálu lze zlepšit různými způsoby tepelného zpracování nebo chemicko-tepelným zpracováním. Hlavní nevýhodou tvrdosti materiálu je jeho následná křehkost.

Metod měření tvrdosti materiálů je široké spektrum a využívají různé principy vyhodnocení, například závislost mezi působící silou a plochou vtisku jako u zkoušky podle Brinella, zkouškám takového charakteru se říká nedestruktivní. Vzniká jen lokální deformace jakožto vtisk či vryp. Některé další metody využívají částečnou přeměnu kinematické energie na elastickou deformaci. Výsledným parametrem pro určení tvrdosti materiálu je potom množství nespotřebované energie.

Moderní metody měření tvrdosti jsou odpovědí na požadavky, které si současný vývoj průmyslových odvětví žádá. Neustálá snaha o ekonomicky výhodnou výrobu běžně užívaných produktů z různých oborů klade vyšší požadavky na kvalitu materiálu. Neschopnost starších metod měření tvrdosti podávat objektivní výsledky při měření tenkých vrstev materiálu byla podnětem pro vznik metod měření mikro a nanotvrdosti. Přelomem v oblasti měření tvrdosti lze označit sedmdesátá léta 20. století, kdy byly položeny základy vtiskové metody DSI. Spojení počítače s měřicím přístrojem se metoda DSI stala mocným prostředkem zjišťování typických mechanických vlastností daného materiálu. Tvrdost není jedinou veličinou, která se dá z metody DSI získat, další důležité mechanické vlastnosti jsou vtisková tvrdost  $H_{IT}$ , vtiskový modul  $E_{IT}$  nebo vtiskové tečení  $C_{IT}$  a další veličiny.

Hlavním cílem této bakalářské práce je vyhodnocení tvrdosti několika druhů ocelí a to vždy ve dvou verzích: modifikovaná ocel a nemodifikovaná ocel téhož typu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 OBECNÝ POPIS OCELI

Oceli jsou díky velké rozmanitosti vlastností a širokým možnostem použití, jakož i objemem výroby nejvýznamější skupinou slitin železa. Jsou a zřejmě i v budoucnu zůstanou nejdůležitějším materiálem pro výrobu strojních částí i strojních a stavebních konstrukcí. [1]

## 1.1 Rozdělení oceli

Podle chemického složení se ocel dělí na nelegované a legované: [2]

- **Oceli nelegované** jsou slitiny železa a uhlíku. Uhlík, který může mít v těchto ocelích obsah až 2,14 %, má ze všech ostatních prvků (Mn, Si, P, S aj.) největší vliv na jejich vlastnosti. Zvyšuje zejména pevnost a tvrdost. Běžné druhy nelegovaných ocelí obsahuje max. 1,5 % C.
- **Oceli legované** obsahují kromě malého množství uhlíku větší množství jednoho nebo více slitinových prvků, které se přidávají do oceli při jejich výrobě. Vlastnosti těchto ocelí jsou dány druhem a množstvím slitinových prvků (přísad – legur). Jsou to např. Mn, Si, Ni, Cr, Co, Mo, W, Al, aj.

Podle použití se oceli rozdělují na konstrukční a nástrojové: [2]

- **Oceli konstrukční** jsou všechny oceli používané jako hlavní nebo doplňující materiál při konstrukci (stavbě) strojů, dopravních prostředků, při stavbě továren, k výrobě předmětů denní potřeby apod.
- **Oceli nástrojové** se používají na výrobu nástrojů k obrábění a tváření, jako např. vrtáky, frézy, soustružnické nože, sekáče apod.

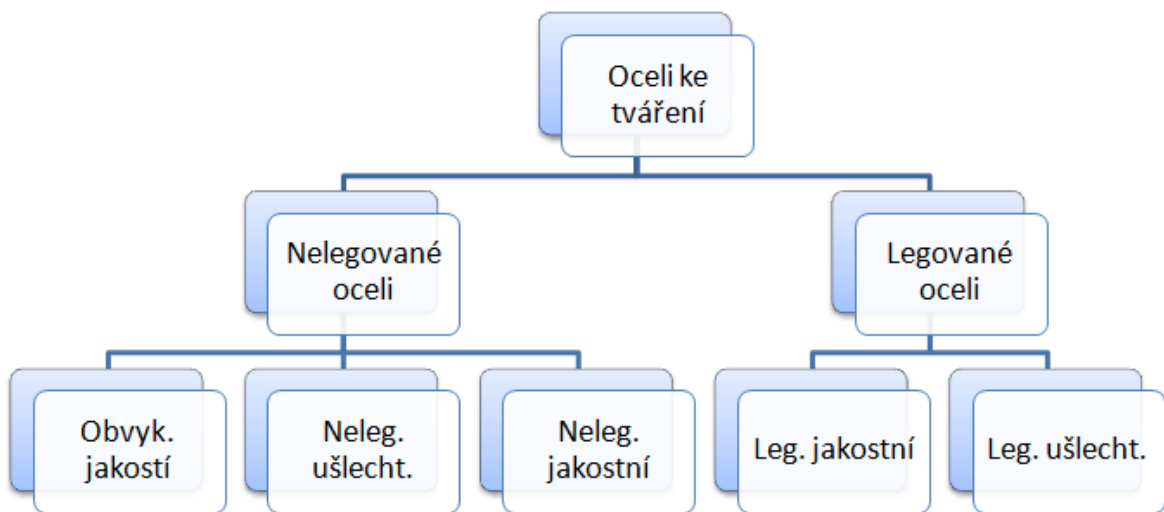
Podle způsobu výroby se oceli rozdělují na oceli k tváření (ingotové) a oceli na odlitky: [2]

- **Oceli k tváření** se získávají ve válcovnách tvářením ingotu na tyče, plechy, dráty, kolejnice apod., v kovárnách na výkovky a v lisovnách na výlisky. Z těchto polotovarů se pak hotové výrobky dokončují většinou na obráběcích strojích.

- **Oceli na odlitky** je slitina železa s uhlíkem a dalšími prvky, v níž množství uhlíku nepřesahuje hodnotu 2,14 % C. Kromě doprovodných prvků může ocel obsahovat také legovací prvky.

## 1.2 Oceli ke tváření

Definice a rozdělení oceli ke tváření obsahuje česká norma ČSN EN 10020 – Definice a rozdělení ocelí. Jako oceli ke tváření jsou označovány materiály, ve kterých je hmotnostní podíl železa větší, než kteréhokoliv jiného prvku a které všeobecně vykazují méně než 2 % C a obsahují jiné prvky. [3]



Obr. 1 Schéma rozdělení oceli ke tváření

### 1.2.1 Nelegované oceli

Jsou ty, jejichž určující obsahy jednotlivých prvků v žádném případě nedosahují mezních obsahů uvedených v normě definující a rozdělující oceli ke tváření.

Nelegované oceli rozděluje norma ČSN EN 10020 do tří hlavních skupin jakostí: [3]

- **Obvyklé jakosti** jsou nelegované oceli, které splňují níže uvedené podmínky: [3]
  - a) Oceli nejsou určeny pro tepelné zpracování (z hlediska této normy se za tepelné zpracování nepovažuje žihání k odstranění pnutí, žihání na měkko nebo normalizační žihání).
  - b) Požadavky, které je nutno dodržet podle norem nebo dodacích podmínek v tepelně nezpracovaném stavu nebo normalizačně žíhaném splňující hodnoty uvedené v normě.

- c) Další zvláštní kvalitativní charakteristiky (jako způsobilost k hlubokému tažení, profilování za studena atd.) nejsou předepsány.
  - d) S výjimkou křemíku a manganu nejsou předepsány žádné další obsahy legovacích prvků.
- **Nelegované jakostní oceli** jsou všechny nelegované druhy ocelí, které nejsou zahrnuty mezi oceli obvyklých jakostí a ušlechtilé oceli. U těchto ocelí není předepsána rovnoměrná reakce na tepelné zpracování (po tepelném zpracování se získávají oceli s dobrou reprodukovatelností vlastností) a nejsou předepsány žádné požadavky na stupeň čistoty, pokud se týká nekovových vměstků. Oproti ocelím obvyklých jakostí jsou na ně kladeny vyšší nároky při namáhání, kterému jsou vystaveny např. ohledně náchylnosti ke křehkému lomu, velikosti zrna, tváritelnosti atd. [3]
  - **Nelegované ušlechtilé oceli** jsou oceli, které na rozdíl od jakostních vykazují vyšší stupeň čistoty, obzvláště pokud se týká nekovových vměstků. Jsou určeny většinou pro zušlechťování nebo povrchové kalení a vyznačují se rovnoměrnější reakcí na toto zpracování. Mají přesně stanovené chemické složení a často zvláštní podmínky výroby. K nelegovaným ušlechtilým ocelím patří: [3]
    - a) Oceli s požadavky na nárazovou práci v zušlechtěném stavu.
    - b) Oceli s požadavky na hloubku zakalené vrstvy nebo povrchovou tvrdost v zakaleném nebo povrchově zakaleném a případně popuštěném stavu.
    - c) Oceli s požadavky na zvlášť nízké obsahy nekovových vměstků.
    - d) Oceli s předepsanou minimální hodnotou elektrické vodivosti větší než  $9 \text{ Sm} \cdot \text{mm}^{-2}$ .
    - e) Oceli pro přepínací výztuž do betonu.

### 1.2.2 Legované oceli

Jsou ty, jejichž obsahy jednotlivých prvků minimálně v jednom případě dosahují nebo překračují mezní obsahy uvedené v normě. [3]

- **Legované jakostní oceli** jsou určeny pro podobné použití jako nelegované jakostní oceli. Do této skupiny patří:
  - a) Svařitelné jednozrné oceli pro ocelové konstrukce včetně tlakových nádob a potrubí.
  - b) Oceli legované křemíkem, nebo křemíkem a hliníkem se zvláštními požadavky na magnetické a elektrické vlastnosti.
  - c) Oceli určené pro výrobu kolejnic, štetovnic a důlních výztuží.
  - d) Oceli pro ploché výrobky, válcované za tepla nebo za studena, určené pro náročnější tváření za studena legované (B, Ti, V nebo Zr).
  - e) Oceli legované pouze mědí.
  
- **Legované ušlechtilé oceli** jsou oceli, u nichž je dosahováno požadovaných zpracovacích a užitných vlastností přesným stanovením chemického složení a zvláštními podmínkami výroby a zkoušení. Do této skupiny patří všechny legované oceli mimo skupinu ocelí legovaných jakostních. Podle určujících prvků se dělí legované ušlechtilé oceli na následující podskupiny: [3]
  - a) Nerezavějící oceli s obsahem uhlíku menším nebo rovným 1,2 % a obsahem chromu větším nebo rovným 10,5 %.
  - b) Rychlořezné oceli s obsahem uhlíku větším nebo rovným 0,6 % a obsahem chromu 3 – 6 %, které dále obsahují mimo jiné minimálně dva z následujících tří prvků – Mo, W, V s celkovým obsahem větším nebo rovným 7 %.
  - c) Ostatní legované ušlechtilé oceli.

### 1.3 Oceli na odlitky

Odlévají se do slévárenských forem, v nichž tuhnou na ocelové odlitky, které se zpravidla ještě tepelně zpracovávají. Používají se na odlitky velmi namáhaných strojních součástí. [2]

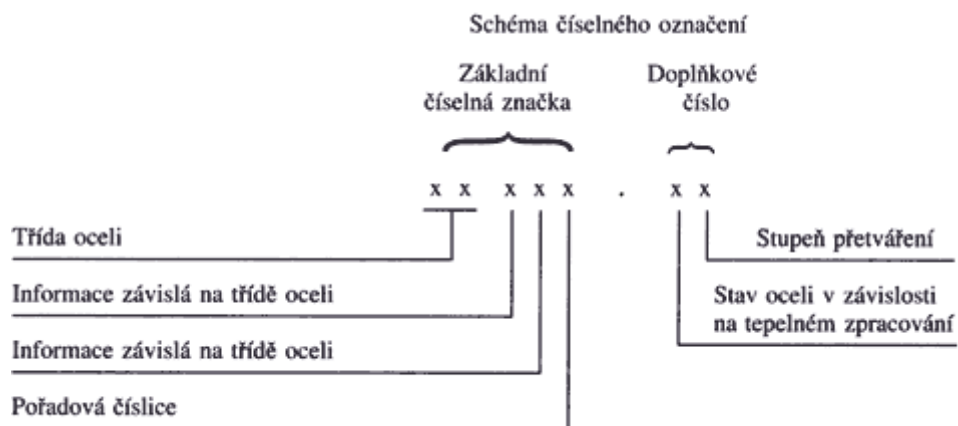
Pro ocel na odlitky v současné době neexistuje ekvivalent normy pro rozdělení oceli ke tváření EN 10020. [3]

Podle způsobu použití lze oceli na odlitky rozdělit na: [3]

- Nelegované a legované oceli na odlitky pro všeobecné použití.
- Oceli pro odlitky tlakových nádob.
- Korozivzdorné oceli pro všeobecné použití.
- Žárovzdorné oceli na odlitky a slitiny pro všeobecné použití.
- Materiál pro odstředivě lité výrobky.

### 1.4 Číselné označování ocelí

Oceli ke tváření se označují číselně a toto označení se skládá ze základní číselné značky a doplňkového čísla odděleného tečkou. [4]



Obr. 2 Schéma číselného označení oceli ke tváření [4]



#### 1.4.1 Oceli třídy 10

Jsou nejlevnější nelegované konstrukční oceli. Mají často malý obsah uhlíku, nemají zaručenou čistotu a chemické složení. Zaručuje se u nich jen minimální pevnost v tahu, jsou většinou dobře svařitelné a obrobitelné. Hutě ocel obvykle dodávají formou plechů, pásů, tyčí, a trubek. Vyrábějí se z nich konstrukční strojní součásti, šrouby, hřebíky, nýty aj.

[2]

#### 1.4.2 Oceli třídy 11

Patří sem nelegované konstrukční oceli se zaručenou čistotou, zaručeným obsahem fosforu a síry, zaručenou minimální pevností v tahu, mezi kluzu a tažností. Dělí se podle obsahu uhlíku od nejmenší pevnosti v tahu 280 MPa do 900 MPa. Hutě je dodávají ve tvaru tyčí různých profilů. [2]

#### 1.4.3 Oceli třídy 12

Používají se na výrobu namáhaných strojních součástí a součástí silničních motorových vozidel určených k cementování, např. ozubené kola, vačkové hřídele, klikové hřídele, ojnice, páky, jeřábové háky, frézy na dřevo aj. [2]

#### 1.4.4 Oceli třídy 13

Jedná se o legované konstrukční oceli, přísadové prvky jim dávají výborné vlastnosti, zejména v kombinaci s tepelným zpracováním. Jsou vhodné na velmi namáhané pružiny motorových vozidel, velká ozubená kola aj. [2]

#### 1.4.5 Oceli třídy 14

Tyto oceli jsou legovány chromem, popř. chromem a manganem. Obvykle se cementují, kalí, zušlechťují, některé jsou určeny k nitrídování např. 14 340. Jsou vhodné na klikové hřídele, ojnice, čepy, nápravy, ventilové pružiny letadlových motorů aj. [2]

#### 1.4.6 Oceli třídy 15 – 16

Jsou legovány kombinací chromu s vanadem nebo molybdenem. Vhodné pro výrobu velmi namáhaných strojních součástí, a součástí určených k cementování, např. ozubená kola převodová, spojovací hřídele apod. [2]

#### 1.4.7 Oceli třídy 17

Jde o speciální korozivzdorné oceli na nerezavějící nože, chirurgické nástroje, měřidla, kalibry apod., žáruvzdorné na žáruvzdorná zařízení pro průmysl keramický, sklářský atd., oceli na trvalé magnety. [2]

#### 1.4.8 Oceli třídy 19 (nástrojové)

Nástrojové oceli se rozdělují na nelegované a legované. Za označením třídy oceli charakterizuje třetí číslice v základním číselné značce jednak, že se jedná o nelegovanou ocel a jednak u legovaných ocelí hlavní prvky nebo skupinu prvků. [4]

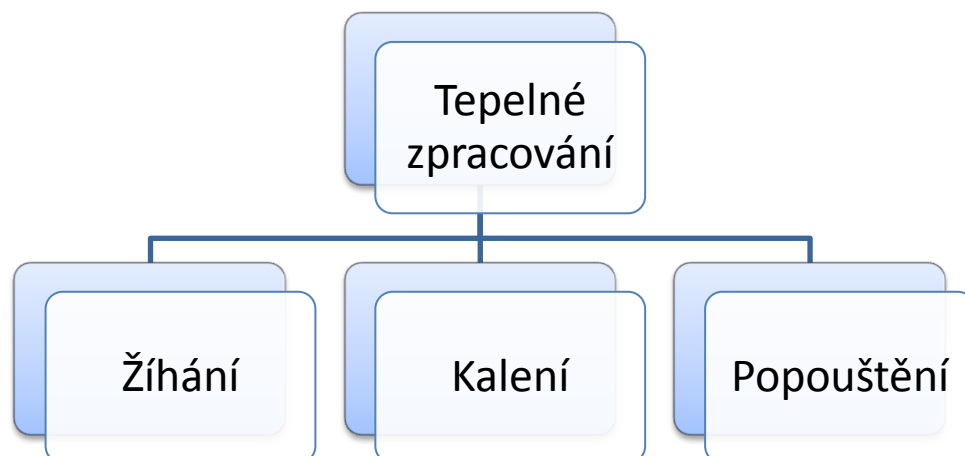
- **Nelegované nástrojové oceli** obsahují nad 0,8 % uhlíku. Používají se na běžné nástroje pro ruční a strojní obrábění. [2]
- **Legované nástrojové oceli** nesnesou teplotu vyšší než 200 °C, lze je tedy použít jen pro malé řezné rychlosti. S toho vyplývá, že nástroje z legované oceli jsou málo výkonné. [2]

## 2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ

Tepelným zpracováním ocelí rozumíme záměrné využívání fázových a strukturních přeměn v tuhém stavu ke změně struktury a k získání požadovaných mechanických nebo technologických vlastností výrobku nebo polotovaru. [1]

V průběhu tepelného zpracování se většinou využívá řízených změn teploty (vlastní tepelné zpracování – TZ), změn chemického složení povrchových vrstev a teploty (chemicko-tepelné zpracování – CHTZ). [3]

K ohřevu slouží většinou pece nebo lázně, v průmyslových pecích se zpravidla pracuje se vzdušnou atmosférou nebo s atmosférou tvořenou zplodinami hoření. [3]

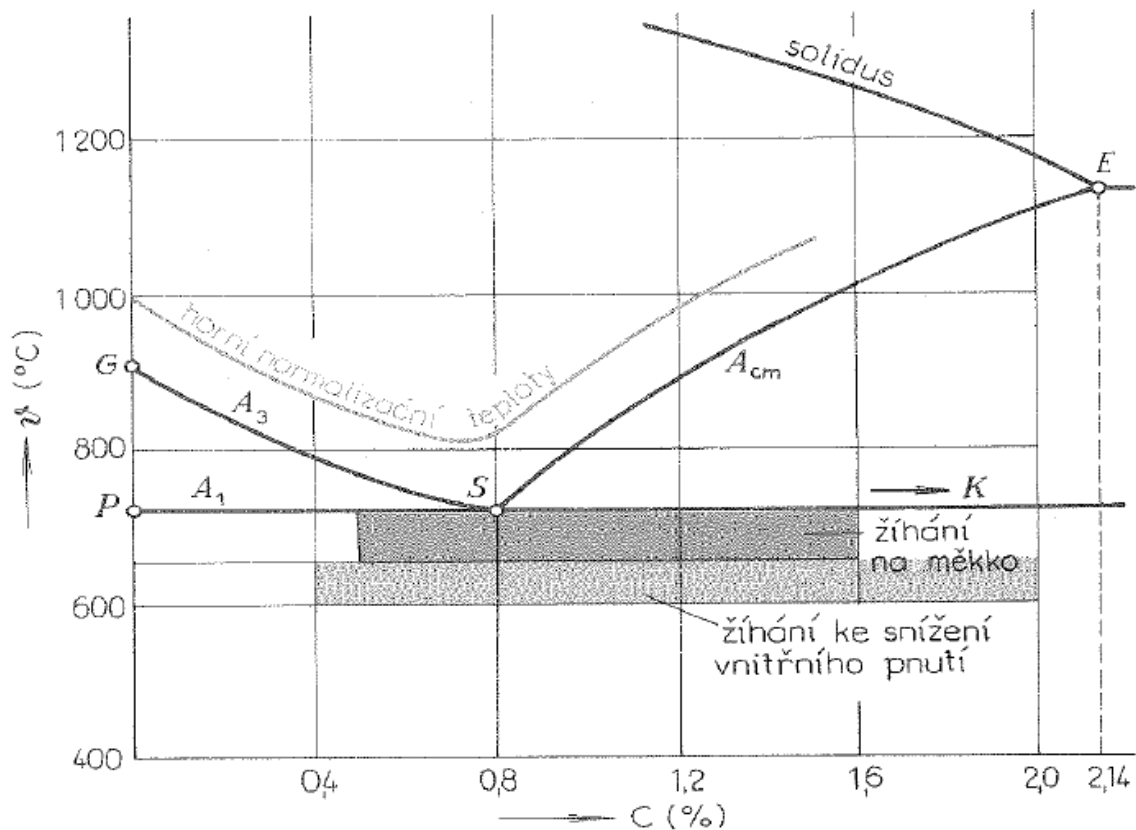


Obr. 3 Schéma hlavních způsobů tepelného zpracování

### 2.1 Žihání

Je v podstatě pomalý ohřev na teplotu žihání, setrvání po určitou dobu na této teplotě a pomalé ochlazení. [2]

Účelem žihání ocelí bývá nejčastěji zmenšení strukturní nebo chemické heterogenity výrobku, snížení tvrdosti, zlepšení obrobiteľnosti a tvářitelnosti za studena a snížení vnitřních pnutí. Způsoby běžného žihání se nejčastěji rozdělují: [1]



Obr. 4 Žihací teploty nelegovaných ocelí [2]

### 2.1.1 Žihání bez překrytalizace

Při žihání pod teplotou  $A_{c1}$  dochází v podstatě pouze ke strukturálním změnám v oceli (sferoidizace, koagulace karbidických částic, zotavování, rekrytalizace), rozsah fázových přeměn lze považovat za nevýznamný. Nejčastější používané způsoby: [1]

- Žihání ke snížení pnutí – používá se k odstranění pnutí v ocelích tvářených za studena, ve svařovaných součástech a v odlitcích jejich zahříváním na teplotu 450 až 600 °C po dobu 4 až 6 hodin a pomalým ochlazením do teploty asi 200 °C. [2]
- Žihání na měkko – odstraňuje příliš velkou tvrdost ocelí před obráběním. Ocel se ohřívá 2 až 4 hodiny těsně pod 727 °C. Tuto dobu lze zkrátit krátkodobým ohřátím oceli těsně nad teplotou 727 °C. V obou případech je nutno ochlazovat co nejpomaleji. Tohoto způsobu žihání se používá např. při opravě zakalených nástrojů. [2]
- Rekrytalizační žihání – účelem rekrytalizačního žihání je odstranit důsledky předchozího tváření za studena (deformační zpevnění) a obnovit tvárné vlastnosti

oceli. Žihací teplota je v rozmezí 550 až 700 °C, doba setrvání na teplotě je obvykle 1 až 5 hodin. Podmínky rekrytalizačního žihání závisí na druhu oceli, stupni tváření a požadovaných vlastnostech vyžíhané oceli. Rekrytalizační žihání se používá zejména jako mezioperační žihání při zpracování některých nízkouhlíkových ocelí tvářením za studena. [1]

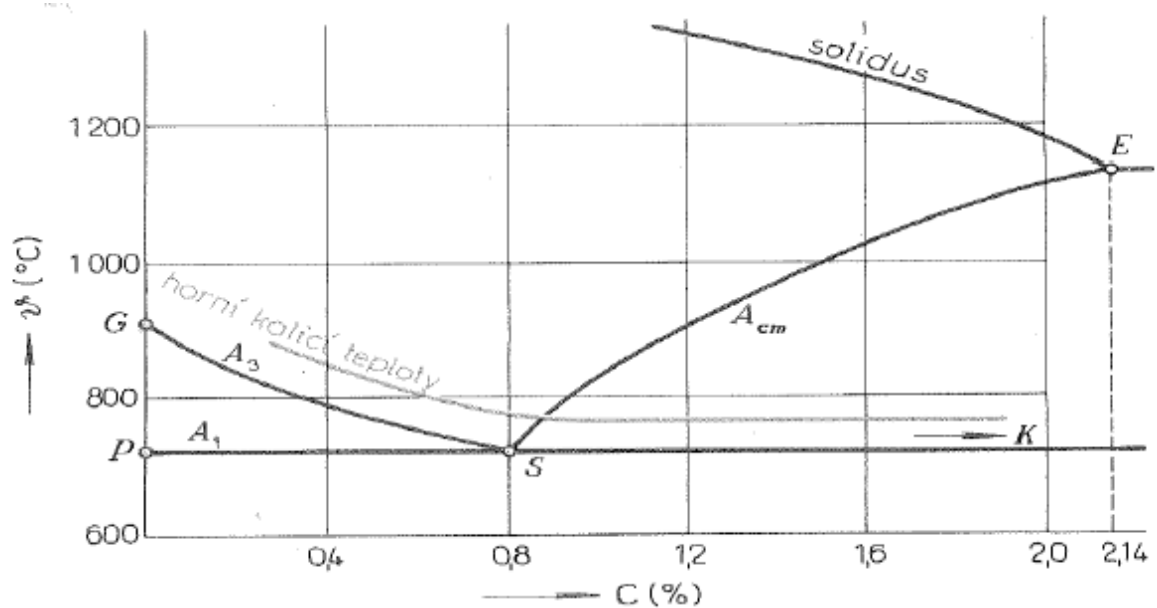
### 2.1.2 Žihání s překrytalizací

Při žihání s překrytalizací dochází buď k úplné, nebo alespoň částečné přeměně výchozí feriticko-cementitické struktury v austenit. Podeutektoidní oceli se žihají většinou za teplot nad  $A_3$ , nadeutektoidní oceli za teplot nad  $A_{cm}$  nebo mezi  $A_1$  a  $A_{cm}$ . Mezi základní způsoby patří žihání homogenizační, normalizační a izotermické. [1]

- a) Homogenizační (difúzní) – homogenizačním žiháním se zmenšuje chemická heterogenita, která vzniká při tuhnutí odlitků nebo ingotů. Rozdíl v chemickém složení se vyrovnávají difúzí probíhající tím účinněji, čím vyšší je teplota. Proto se žihací teploty volí obvykle v rozmezí 1100 až 1250 °C. Výdrž na teplotě bývá podle velikosti odlitku a druhu oceli 5 až 15 hodin, někdy i desítky hodin. [1]
- b) Normalizační – se používá k odstranění nestejněměrné struktury, která vznikla při předchozím zpracování (např. u výkovků, výlisků, ocelových odlitků nebo svařovaných předmětů). Záleží v ohřevu na teplotu 30 až 50 °C nad  $A_{c3}$ , výdrž na teplotě (přibližně 1hodina na každých 25mm tloušťky stěny) a ochlazení na klidném vzduchu. [1]
- c) Izotermické – Účelem izotermického žihání je snížení pevnosti a zlepšení obrobitelnosti zejména vhodně legovaných ocelí. Skládá se z austenitizace za teploty nad  $A_{c3}$  (podeutektoidní oceli) nebo nad  $A_{c1}$  (nadeutektoidní oceli), rychlého ochlazení na teplotu 600 až 700 °C (proudem vzduchu). [1]

## 2.2 Kalení

Způsoby tepelného zpracování, jejichž cílem je dosáhnout stavu odlišného od rovnovážného stavu oceli, se označují jako kalení. Kalení spočívá v pomalém a stejnoměrném ohřátí oceli na teplotu kalení a v rychlém ochlazení. Cílem je dosáhnout zvýšené tvrdosti oceli. Podle převažující strukturní složky, kterou může být ve výsledné struktuře buď martenzit, nebo bainit, rozděluje se kalení podle ČSN 42 0004 na kalení martenzitické a bainitické. Většinou je cílem kalení dosáhnout vzniku martenzitické struktury. U nástrojových ocelí se využívá její tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. [1]



Obr. 5 Kalicí teploty nelegovaných ocelí [2]

Schopnost oceli dosáhnout tohoto strukturního stavu se nazývá kalitelnost a odpovídající oceli nazýváme jako kalitelné. K pojmu kalitelnost je účelné zavést další dva pojmy: [3]

- **Zakalitelnost** – se zpravidla hodnotí tvrdostí oceli po zakalení a její maximální dosažitelná hodnota je určena tvrdostí martenzitu, která závisí především na obsahu uhlíku austenitu. [3]
- **Prokalitelnost** – se označuje jako schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kaleného předmětu. [3]

### 2.2.1 Způsoby kalení

Volba způsobu kalení závisí zejména na požadovaných vlastnostech kaleného předmětu, jeho velikosti, i tvaru a na druhu použité oceli. Při plynulém ochlazování jsou předměty kaleny v prostředí o pokojové teplotě (studené lázni). Při přetržitém kalení se používá buď dvou prostředí o pokojové teplotě, ale s rozdílnou ochlazovací teplotou, nebo teplé lázně. Cílem různých variant přetržitého ochlazování je snížit úroveň vnitřních pnutí a tím omezit deformace kaleného předmětu, popř. zabránit vzniku kalících trhlin. [3]

Typy způsobu kalení: [3]

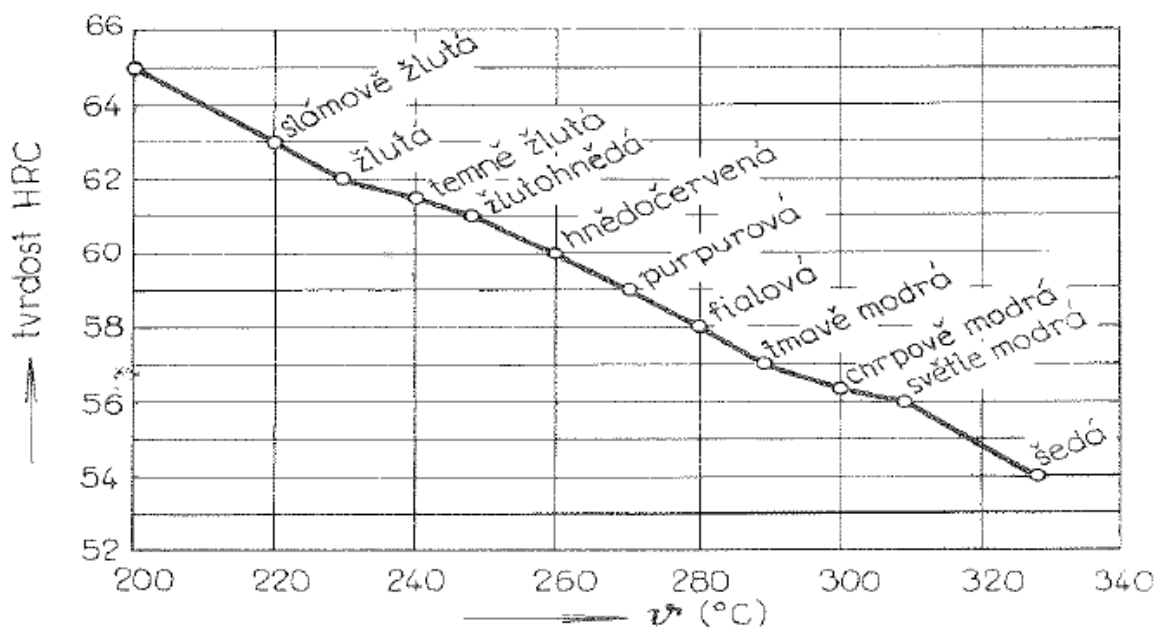
- a) **Martenzitické kalení do studené lázně** (voda, olej, vzduch) je nejjednodušší a nejčastější používaný způsob kalení. Mezi hlavní přednosti tohoto způsobu kalení patří jeho technologická nenáročnost a relativně nízká cena. Hlavní nedostatky spočívají ve vysoké úrovni vnitřních pnutí, zejména po kalení do vody, a následných deformací až praskání kalených předmětů.
- b) **Přerušované (lomené) kalení** spočívá v rychlém ochlazování až na teplotu těsně nad  $M_s$ , které zabrání perlitické přeměně, poté se předmět přemístí do mírnějšího ochlazovacího média, ve kterém proběhne martenzitická přeměna. Zpravidla se využívají tyto kombinace ochlazovacích prostředí: voda-olej, voda-vzduch nebo olej-vzduch. Lomené kalení vede ke snížení úrovně vnitřních pnutí a využívá se zejména u tvarově složitých nebo rozměrných výrobků.
- c) **Termální kalení** – předmět se ochlazuje v lázni, jejichž teplota obvykle leží těsně nad teplotou  $M_s$  kalené oceli. Dostatečná prodleva na této teplotě vede k vyrovnání teplot mezi povrchem a středem kaleného předmětu a tím i k potlačení teplotních pnutí již před kalením. Prodleva by však neměla přesáhnout inkubační prodlevu do vzniku bainitu, poté následuje ochlazení, při kterém proběhne martenzitická přeměna. Termální kalení je vhodné zejména u výrobků zhotovených z legovaných ocelí s dostatečnou stabilitou austenitu nad teplotou  $M_s$ , nebo u menších tenkostěnných a tvarově složitých výrobků z uhlíkových nebo nízko legovaných ocelí.
- d) **Izotermické kalení** je modifikací izotermického zušlechťování, kdy teplota lázně leží těsně pod teplotou  $M_s$  a kdy výsledná struktura je tvořena směsí martenzitu, bainitu a zbytkového austenitu. Martenziticko-bainitickou strukturu lze získat u ocelí s vhodným tvarem diagramu ARA i při plynulém ochlazování. V případě nízkole-

govaných vysocepevných ocelí se ukazuje, že optimální kombinace pevnosti a houževnatosti lze dosáhnout popouštěním martenziticko-bainitické struktury.

- e) **Kalení se zmrazováním** je postup, kdy zakalený předmět je co v nejkratší době přenesen do prostředí s teplotou pod bodem mrazu (až  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teplota kapalného dusíku). Jeho cílem je zmenšit podíl zbytkového austenitu ve struktuře. Zmrazování by mělo následovat bezprostředně po zakalení, aby nedošlo ke stabilizaci zbytkového austenitu. Používá se u výrobků, u nichž je důležitá rozměrová stabilita (měřidla, nástroje, přesná valivá ložiska) a které se zpravidla vyrábějí z ocelí s teplotou  $M_f$  pod bodem mrazu.

### 2.3 Popouštění

Popouštění se skládá z ohřevu na teploty nižší než  $A_1$ , výdrže na teplotě a z následujícího ochlazování vhodnou rychlostí. Protože vnitřní pnutí mohou vést k popraskání zakaleného předmětu i po vyjmutí z kalicí lázně, mělo by popouštění následovat ihned po zakalení. Podle výše popouštěcí teploty, která má rozhodující vliv na rozsah strukturních změn a souvisejících změn mechanických vlastností, se rozlišuje popouštění při nízkých a vyšších teplotách. [3]



Obr. 6 Diagram závislosti tvrdosti na popouštěcí teplotě [2]



### 2.3.1 Popouštění při nízkých teplotách (napouštění)

Uskutečňuje se zpravidla v rozmezí teplot 100 až 300 °C (u vysocelegovaných nástrojových ocelí až asi 600 °C). Jeho cílem je snížit hladinu vnitřních pnutí, zmenšit obsah zbytkového austenitu a stabilizovat rozměry součásti při zachování vysoké tvrdosti. Používá se zejména u nástrojových ocelí, u konstrukčních ocelí je toto popouštění méně časté. Předměty se popouštějí ve vařící vodě, v teplé olejové lázni, v solných lázních nebo v elektrických pecích. [3]

### 2.3.2 Popouštění při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování)

Provádí se obvykle v rozmezí 400 až 650 °C, se používá k dosažení optimální kombinace pevnostních vlastností, houževnatosti a plasticity. Uvedenou kombinaci vlastností zaručuje sorbitická struktura, která se získá kalením. V určitých oblastech popouštěcích teplot není doprovázen pokles pevnostních charakteristik odpovídajícím zvýšením hodnot houževnatosti. Tento pokles houževnatosti je označován jako popouštěcí křehkost. [3]

## 2.4 Chemicko-tepelné zpracování

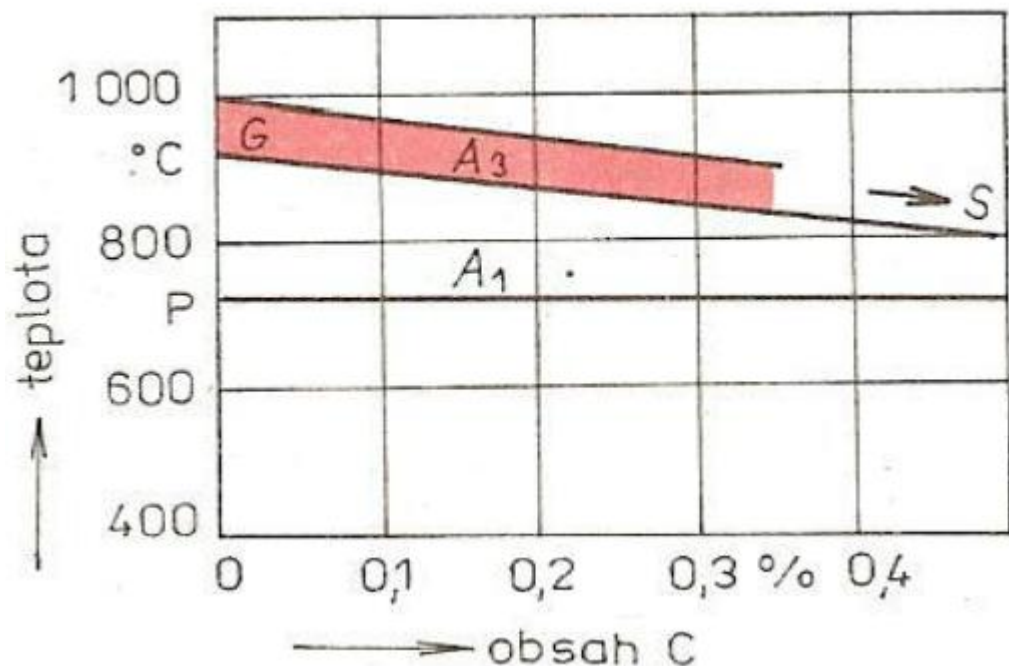
Jako chemicko-tepelné zpracování se označují způsoby difúzního sycení povrchu oceli různými prvky (kovy i nekovy), s cílem dosáhnout rozdílných mechanických nebo fyzikálně chemických vlastností povrchu a jádra součásti. Základem chemicko-tepelného zpracování je změna chemického složení povrchové vrstvy součásti. Účelem tohoto zpracování je často zvýšení tvrdosti a odolnosti povrchu proti opotřebení a zachování houževnatého jádra. Mezi postupy nejvíce rozšířené patří sycení povrchu uhlíkem (cementování), dusíkem (nitridování). [1]

### 2.4.1 Cementování

Způsob chemicko-tepelného zpracování, při němž se povrch oceli sytí uhlíkem, je označován jako cementování. Jeho cílem je získat vysokou tvrdost a odolnost povrchu proti opotřebení a houževnaté jádro cementovaného předmětu. Cementují se převážně nízkouhlíkové oceli (0,1 až 0,3 % C) a povrchová vrstva se obohatí uhlíkem na eutektoidní, popř. těsně nadeutektoidní koncentraci (zpravidla do 0,8 až 1,0 % C). K dosažení zvýšené koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě je třeba cementovaný předmět ohřát na teplotu  $A_{c3}$ . Podle druhu oceli, cementačního prostředí i velikosti předmětu se cementuje obvykle za teploty v roz-

mezi 850 až 950 °C. Po nauhličení povrchové vrstvy oceli lze využít prostředí sypké, plyné nebo kapalné. [1]

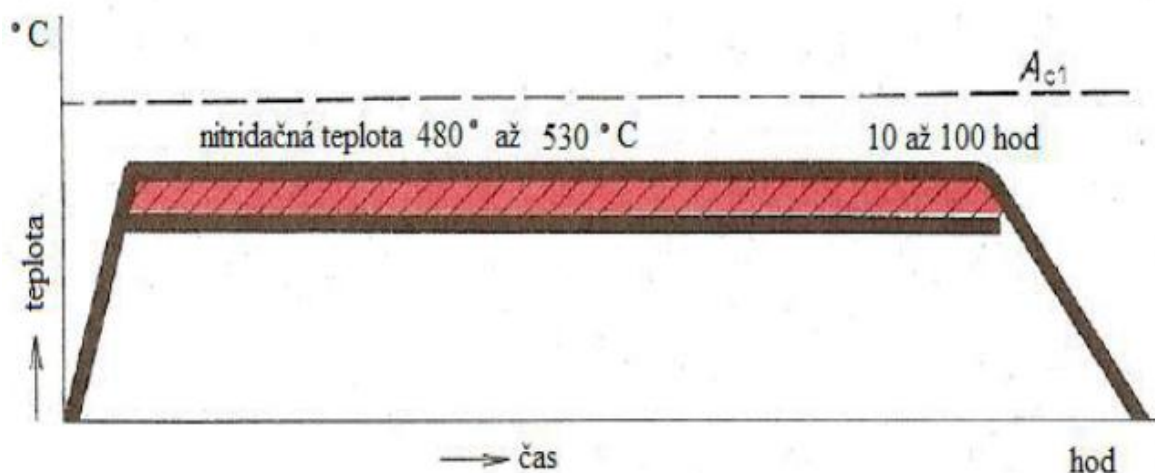
- **Cementování v sypkém prostředí** – je nejstarším způsobem. Předměty jsou uloženy v uzavřených krabicích a zasypány práškovou směsí mletého dřevěného uhlí a 7 až 20 % uhličitanu barnatého. [1]
- **Cementování v plyném prostředí** – je moderní, technologicky výhodný a produktivní způsob. Cementační atmosféry jsou na rozdíl od cementování v sypkém prostředí složité směsí plynů CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. K jejich výrobě se používá plynů, např. methanu CH<sub>4</sub>, propanu, butanu nebo látek kapalných, např. petroleje, terpentýnu, alkoholu. Pro cementování v plynu se v malosériové výrobě používá plynotešných šachtových elektrických pecí s nucenou cirkulací atmosféry. [1]
- **Cementování v kapalném prostředí** – se používají lázně roztavených chloridových solí s přísadou kyanidu (KCN a NaCN), které jsou aktivními složkami lázně. Kyanidové lázně jsou však vysoce jedovaté, proto byly vyvinuty cementační soli bez kyanidů, kde zdrojem uhlíku je Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> a SiC. [1]



Obr. 7 Část rovnovážného diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C<sub>3</sub> s vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot [6]

### 2.4.2 Nitridování

Chemicko-tepelné zpracování, při němž se tenká povrchová vrstva oceli nasycuje dusíkem, je označováno jako nitridování. Jeho cílem je získat vysokou tvrdost povrchu a houževnaté jádro. Na rozdíl od cementování se požadovaných vlastností povrchu dosahuje již během nasycování dusíkem, tzn. bez následujícího tepelného zpracování. Podstatou vysoké povrchové tvrdosti je vznik velmi tvrdých chemických sloučenin dusíku se železem a s některými přísadovými prvky. Povrch nitridované součásti se nasycuje dusíkem za teploty 500 až 550 °C na koncentraci až 12% dusíku. [1]



Obr. 8 Průběh času a teplot při nitridování [6]

Rychlost růstu nitridované vrstvy i její struktura závisí na teplotě, stupni disociace  $\text{NH}_3$  i druhu použité oceli. Tloušťka vrstvy bývá v rozmezí 0,2 až 0,6 mm, doba nitridování je v důsledku relativně nízké teploty dlouhá (až 60 hodin). Tvrdost povrchu podle podmínek nitridování a druhu oceli je 1000 až 1200 HV a zachovává se až do teploty 600 °C. Nitridují se konstrukční oceli obvykle se středním obsahem uhlíku (0,3 až 0,4 %) a k dosažení optimálních vlastností jádra se nitridované součásti před nitridací zušlechťují. Po nitridování se součásti již jen brousí (během nitridování se zvětšuje objem součásti). [1]

### 3 TVRDOST

Má mezi mechanickými vlastnostmi, hlavně u kovových materiálů, mimořádnou důležitost. Je to proto, že ze všech vlastností materiálu ji lze zjistit nejrychleji, nejlevněji a i na předmětech nejmenších rozměrů. Z tvrdosti se často usuzuje i na některé další vlastnosti materiálů (pevnost v tahu, obrobitelnost apod.). Zkoušky se provádějí buď na zkušebních vzorcích, nebo většinou přímo na hotových výrobcích. Tvrdost se definuje jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Na tom je založena většina přístrojů k měření tvrdosti. Čísla jsou buď bezrozměrová, nebo, jsou-li odvozena ze vztahu mezi silou a plochou vtisku, mají rozměr (MPa). Protože tento způsob může vést k omylům (k záměně tvrdosti za pevnost), vyjadřuje se tvrdost jako číslo bezrozměrné, pouze s udáním způsobu měření nebo stupnice. Při vnikání zkoušce, která je nejpoužívanější se do zkušebního vzorku zatlačuje velmi tvrdé těleso (kulička, kužel, jehlan) a měřítkem tvrdosti je velikost vzniklého vtisku (jeho plocha, hloubka, nebo délka úhlopříčky). Nejznámější jsou zkoušky tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. [2]

#### 3.1 Zkoušky tvrdosti

Zkouška tvrdosti je rychlou a levnou zkouškou, která slouží k odhadu mechanických vlastností materiálu. Tvrdost se určuje vtlačováním indentoru (vnikacího tělíska) definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. V principu existují dva způsoby měření tvrdosti.

Prvý způsob, používaný u kovů a keramiky, kdy je indentor zamáčknut do materiálu tak, aby došlo k plastické (trvalé) deformaci materiálu. Tyto metody označujeme jako metody vnikací.

Druhý způsob měření tvrdosti je založen na principu elastické interakce povrchu materiálu a zkušebního tělíska a v současné době se používá většinou pro hodnocení pryží a plastů. [1]

##### 3.1.1 Zkouška podle Brinella (ČSN 42 0371-78)

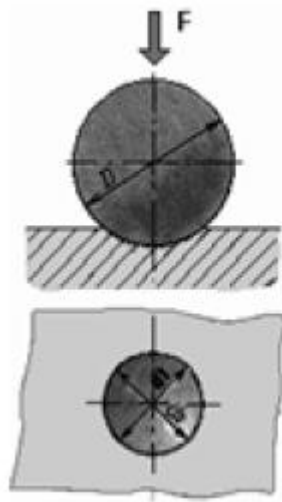
Při této zkoušce se do zkoušeného materiálu zatlačuje určitou silou  $F$  ocelová kalená kulička o průměru  $D$ . Tvrdost se vyjadřuje poměrem zatížení k ploše kulovitého vtisku a stanoví se ze vztahu,

kde  $F$  je zátěžná síla (N) a  $A$  je plocha v tisku ( $\text{mm}^2$ ), [1]

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

Pro rychlou orientaci je možno užít i přibližného vzorce:

$$HB = \frac{0,4F}{\pi \cdot d^2} - 10. \quad (2)$$



Obr. 9 Zkouška tvrdosti podle Brinella [2]

Tvrdość má sice rozměr napětí, vyjadřuje se však bez rozměrů v jednotkách tvrdosti. Jako vnikacího tělesa se užívá kuličky o průměru  $D = 10; 5; 2,5; 2$  a  $1$  mm. Do tvrdosti  $400 HB$  jde o kalené ocelové kuličky, při vyšší tvrdosti o kuličky ze slinutých karbidů. Nad tvrdost  $450 HB$  však není měření podle Brinella vhodné. [1]

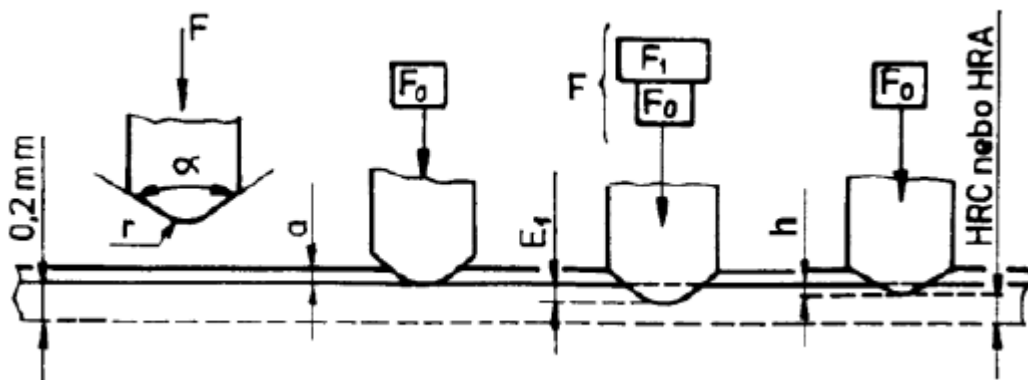
Přesnost zkoušky závisí na správném proměření vtisku. Průměr vtisku  $d$  se měří vhodným měřicím přístrojem ve dvou na sebe kolmých směrech. Rozdíl mezi oběma naměřenými hodnotami nesmí překročit 5 %. Měření musí dále splňovat tyto podmínky: povrch zkoušeného předmětu musí být rovný, hladký, bez okují a nečistot. Tloušťka předmětu nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku. U Brinellovy zkoušky je proměření vtisku obtížné a nepřesné. Další nepřesnost je způsobena deformací vtlačované kuličky. U kovo-  
vých materiálů je mezi tvrdostí  $HB$  a pevností v tahu  $R_m$  přímá závislost, daná vztahem

$$R_m \approx (3,1 \text{ až } 4,1) HB. [2]$$

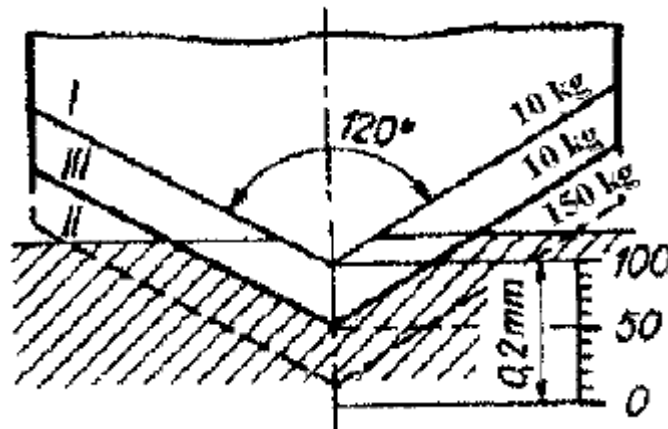
### 3.1.2 Zkouška podle Rockwella (ČSN 42 0372-81, 420373-78)

Vnikacím tělískem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem  $120^\circ$  a zaoblením hrotu 0,2 mm nebo kalená ocelová kulička o průměru  $1/16''$  ( $=1,5875$  mm). Měří se hloubka vtisku dosaženého za definovaných podmínek vtačováním vnikacího tělesa a při vyloučení vlivu povrchu zkoušeného tělesa a jeho dopružování. Vnikací těleso se nejprve zatíží základním předběžným zatížením  $F_0$ . Stupnice hloubkoměru se nastaví v zatíženém stavu do počáteční polohy. Poté se uplatní přídatné zatížení  $F_1$  (celkové zatížení  $F = F_0 + F_1$ ). Po odlehčení na zatížení  $F_0$  se na hloubkoměru odečte přímo tvrdost v příslušné stupnici. (Tvrdost je dána hloubkou vtisku  $E_1$ , které se dosáhlo aplikací plného zatížení, měřenou od hloubky odpovídající předběžnému zatížení a zmenšenou o zpětnou pružnou deformaci.) [1]

Vhodnou volbou vnikacího tělesa (kužel, kulička) a velikosti počátečního i celkového zatížení lze zkoušku uplatnit v širokém rozsahu tvrdostí. Díky malé hloubce vtisku je vhodná i pro měření tvrdosti tenkých povrchových vrstev a tenkostěnných součástí. Podle vnikacího tělesa a velikosti zatížení jsou jednotlivé stupnice tvrdosti podle Rockwella označeny HRC, HRB, HRA, HRN, HRT. Metody s diamantovým vnikacím kuželem (HRC, HRA, HRN) jsou vhodné pro tvrdé materiály, přičemž pro křehké látky (slituté karbidy), tenké vrstvy nebo tenké vzorky se volí nižší zatížení. Modifikace s kuličkou jsou vhodné pro měkké kovy a slitiny. Nejběžnější je metoda HRC, užívaná zejména pro měření tvrdosti nástrojů. Uplatňuje se v rozsahu 20 až 70 HRC. [1]



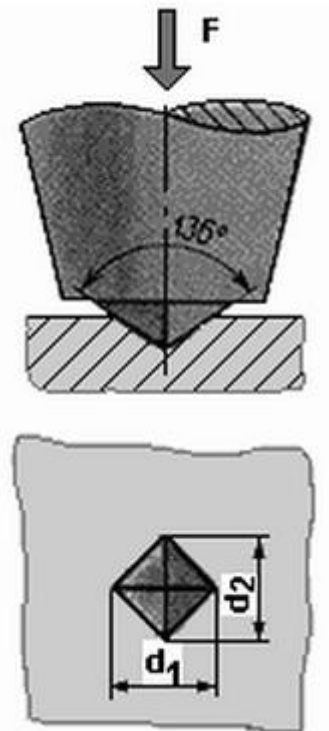
Obr. 10 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1]



Obr. 11 Zkouška tvrdosti podle Rockwella [7]

### 3.1.3 Zkouška podle Vickerse (ČSN 42 0374-78)

Při této zkoušce se vlačuje do materiálu diamantový jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$  se čtvercovou základnou a mikroskopicky nebo projekcí se zjišťuje střední délka obou úhlopříček. Pro praktickou potřebu se používá tabulek, ve kterých se podle délky úhlopříčky  $u$  a použité síly  $F$  najde přímo odpovídající tvrdost. Této metody se může použít pro všechny tvrdosti. Ve všech rozsazích je stejně přesná a není téměř závislá na zatížení. [2]



Obr. 12 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [2]

Tvrдост se vyjadřuje jako poměr zatížení vnikacího tělíska  $F$  k ploše vtisku:

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2}; \quad HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

kde  $F$  je zátěžná síla (N),

$$\text{popř. } HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

kde  $F$  je zátěžná síla (kp),

$d$  – aritmetický průměr délky úhlopříček vtisku (mm).

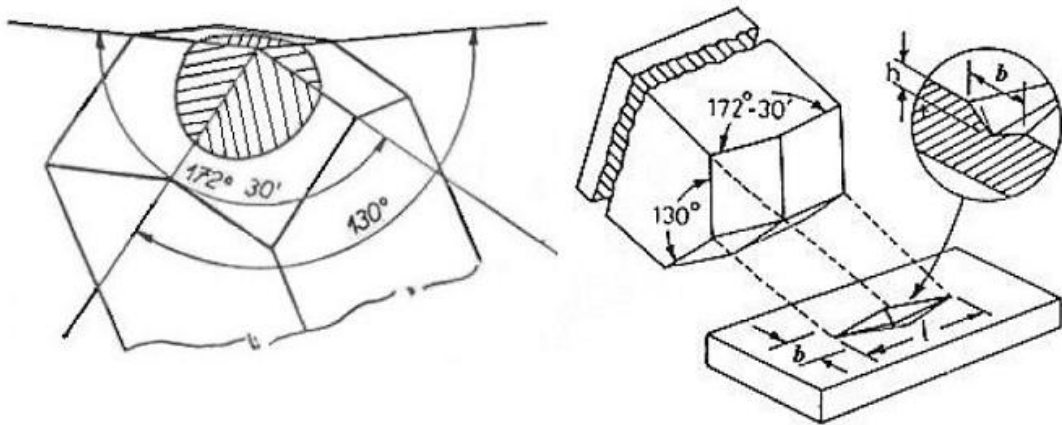
Tvrдост se označuje bezrozměrným číslem před písmeny HV.

Vtisky při zkoušce podle Vickerse jsou i při různém zatížení geometricky podobné a zatížení lze proto volit libovolně. Vzhledem k malým rozměrům vtisků je často nezbytná úprava měřeného povrchu broušením. Tloušťka předmětu musí být rovna nebo větší než  $1,5 d$ . Rovněž nejmenší vzdálenost tisku od kraje vzorku je stanovena normou. Úhlopříčky vtisku se měří obvykle mikroskopem. [1]

#### 3.1.4 Zkouška podle Knoop

Je podobná zkoušce podle Vickerse, liší se však unikátností indentoru. Knoppův indentor byl vyvinut speciálně pro vtiskové zkoušky s nízkým zatížením, pro vyhodnocování tvrdosti tenkých plechů a křehkých materiálů. Využití našel i v mineralogii jako nástroj pro vyhodnocování tvrdosti materiálů. V současné době má velké uplatnění v oblasti určování lomové houževnatosti keramik. Indentor má tvar čtyřstěnného diamantového jehlanu, jehož vtisky mají tvar kosodélníku. Protilehlé strany svírají po řadě úhel  $175,5^\circ$  a  $130^\circ$ . Poměr délek vnější a hlavní úhlopříčky je 1:7, 1:11 a poměr délky hlavní úhlopříčky ku hloubce vtisku je 30:1. Geometrie Knoopova indentoru je znázorněna na obrázku č. 13. [8]





Obr. 13 Knoopův indentor [8]

Knoopovo číslo tvrdosti (KHN) je definováno jako poměr působícího zatížení na indentor a velikost nezotavené projekční plochy:

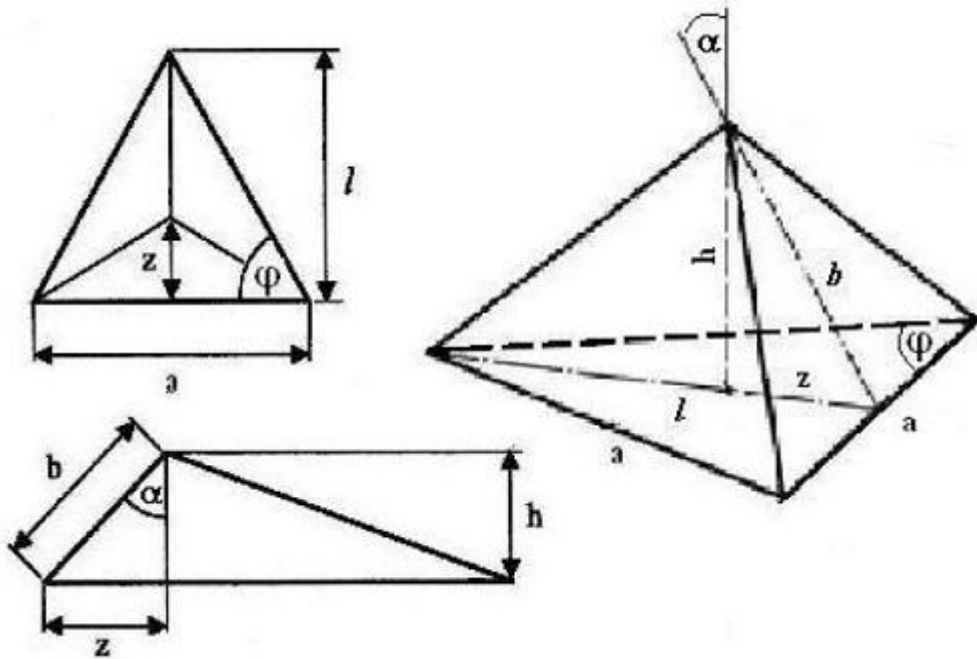
$$KHN = \frac{F}{A_P} \approx \frac{W}{l^2 \cdot C} \quad (5)$$

kde  $F$  je působící zatížení,  $A_P$  značí projekční plochu,  $W$  je zátěž,  $l$  je velikost naměřené delší úhlopříčky a  $C$  je geometrická konstanta, která souvisí s geometrií indentoru.

Knoopův indentor se s výhodou používá pro zjištění tvrdosti obzvláště na tvrdých a tedy křehkých materiálech, neboť na rozdíl od Vickersova a Brinellova indentoru je délka hlavní úhlopříčky snadněji měřitelná. [8]

### 3.1.5 Zkouška podle Berkoviče

Přístěnný Berkovičův indentor vznikl roku 1951. Průběh a princip zkoušky se neliší od Vickersova testu. Hlavním důvodem uvedení nového indentoru byly problémy s výrobou čtyřbokého jehlanu a dodržení geometrické podmínky sbíhavosti stran Vickersova jehlanu, která v případě výroby třístěnného jehlanu odpadá. Vzhledem ke svému tvaru je jehlan daleko odolnější na nárazy a neopatrné zacházení. V současné době je Berkovičův indentor zcela běžně používán v nanoindentačních zkouškách. Původní Berkovičův indentor byl navržen tak, aby byl stejný poměr plochy stěn jehlanu k jeho výšce jako v případě Vickersova jehlanu. Tomu u třístěnného jehlanu odpovídá úhel  $65,03^\circ$  mezi bočními stěnami a výškou jehlanu. [8]



Obr. 14 Berkovičův indentor [8]

Později byl vyroben takzvaný modifikovaný Berkovičův indentor. Úhel, který svírá výška modifikovaného Berkovičova jehlanu se stěnou jehlanu je  $65,27^\circ$ ; což vyhovuje podmínce stejného poměru projekční plochy ku hloubce vtisku jako má Vickersův jehlan. Hodnota tvrdosti pro Berkovičův indentor s úhlem  $65,03^\circ$ , vyjádřená jako poměr velikosti zatížení a plochy je:

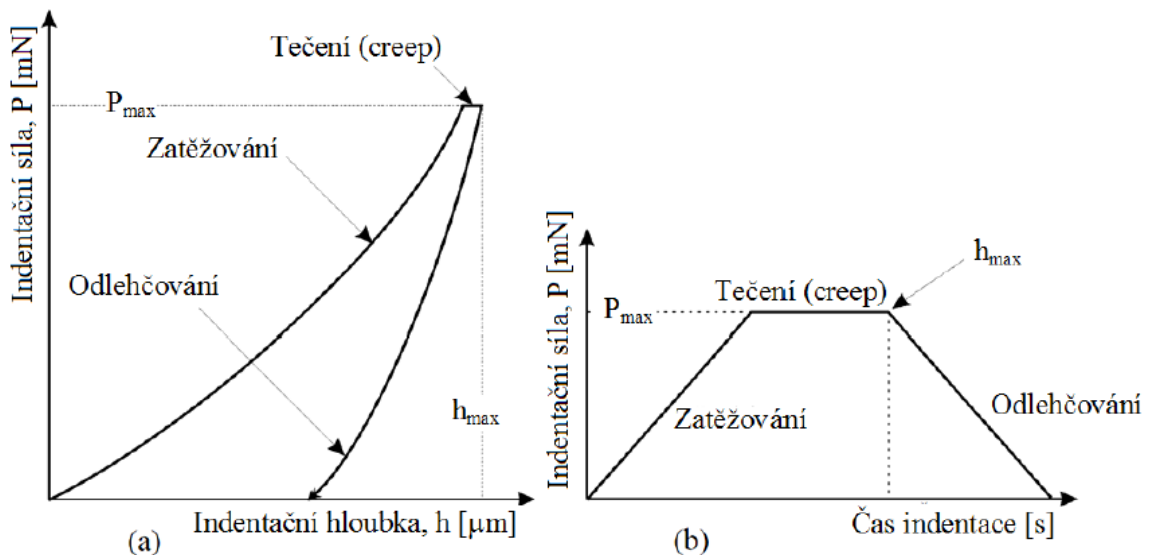
$$H_{CH} = 1570 \cdot \frac{W}{l^2}. \quad (6)$$

Kde  $W$  je velikost zatížení jehlanu v kilogramech a  $l$  je výška trojúhelníku naměřená na vtisku. Index  $CH$  pochází z původního značení tvrdosti, ve starší literatuře je zkouška známá jako zkouška podle Chruščova. [8]

## 4 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI

Hlavním důvodem pro vznik nové indentační techniky byla snaha o zjištění mechanických vlastností tenkých vrstev. Tradiční zkoušky tvrdosti nebyly schopny vytvořit tak malé zatížení, aby nebyl samotnou indentací ovlivněn i substrát, na němž byla vrstva nanášena. Požadavkem bylo, aby celková hloubka vtisku byla rovna 10 % z celkové hloubky vrstvy. Takové vtisky nebylo možné měřit v klasickém optickém mikroskopu přesně. Rozměry vtisku se musely proměřit elektronovým mikroskopem, což práci prodlužovalo a znesnadňovalo. [8]

Metoda DSI, pro niž byl zvolen český ekvivalent instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti má své počátky v 70. letech 20. století. Principem metody je, že měřicí přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu či poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka, zatížení – hloubka vtisku. Měřicí přístroje je možno připojit na počítač a průběh zkoušky ihned vyhodnotit. [8]



Obr. 15 Indentační křivka (a), s časovým diagramem indentační zkoušky (b) [9]

### 4.1 Stanovení vtiskové tvrdosti $H_{IT}$

Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  je mírou rezistence k trvalé deformaci nebo poškození. [8]

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (6)$$

kde  $F_{max}$  je maximální zkušební zatížení,  $A_p$  je průměr kontaktní plochy vnikajícího tělesa a zkušební tělesa určený z křivky zatížení. [8]

## 4.2 Stanovení vtiskového modulu EIT

Vtiskový modul EIT se může vypočítat ze směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$  a je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu. Rozdíly mohou nastat v případě, kdy vtisková deformace je provázána formacemi „Pile – up“ nebo „Sink – in“. [8]

$$E_{IT} = \frac{1-(v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1-(v_i)^2}{E_i}} \quad (7)$$

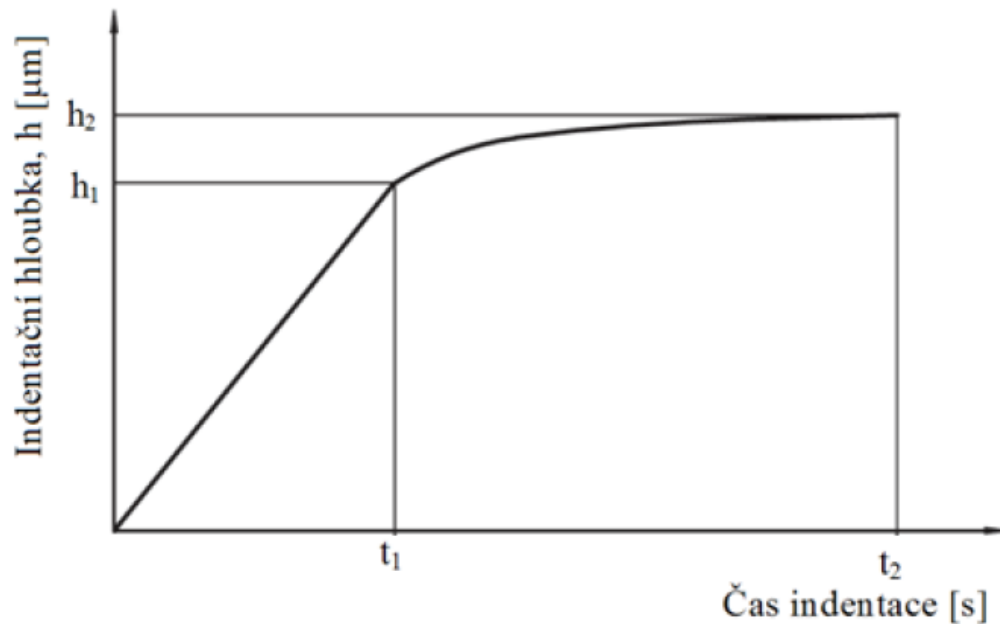
Kde  $v_s$  je Poissonův poměr zkušební tělesa,  $v_i$  je Poissonův poměr vnikajícího tělesa,  $E_r$  je redukovaný modul vtiskového kontaktu,  $E_i$  je kontaktní poddajnost,  $A_p$  průmět kontaktní plochy. [8]

## 4.3 Stanovení vtiskového tečení $C_{IT}$

Jestliže se při kontaktním zatížení měří změna hloubky vtisku, může se vypočítat relativní hloubka vtisku. Jedná se o hodnotu tečení materiálu. [8]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 . \quad (8)$$

Kde  $h_1$  je hloubka vtisku v milimetrech v čase, kdy je dosaženo zkušebního zatížení (které je udržováno na konstantní úrovni),  $h_2$  je hloubka vtisku v milimetrech v čase výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení. [8]



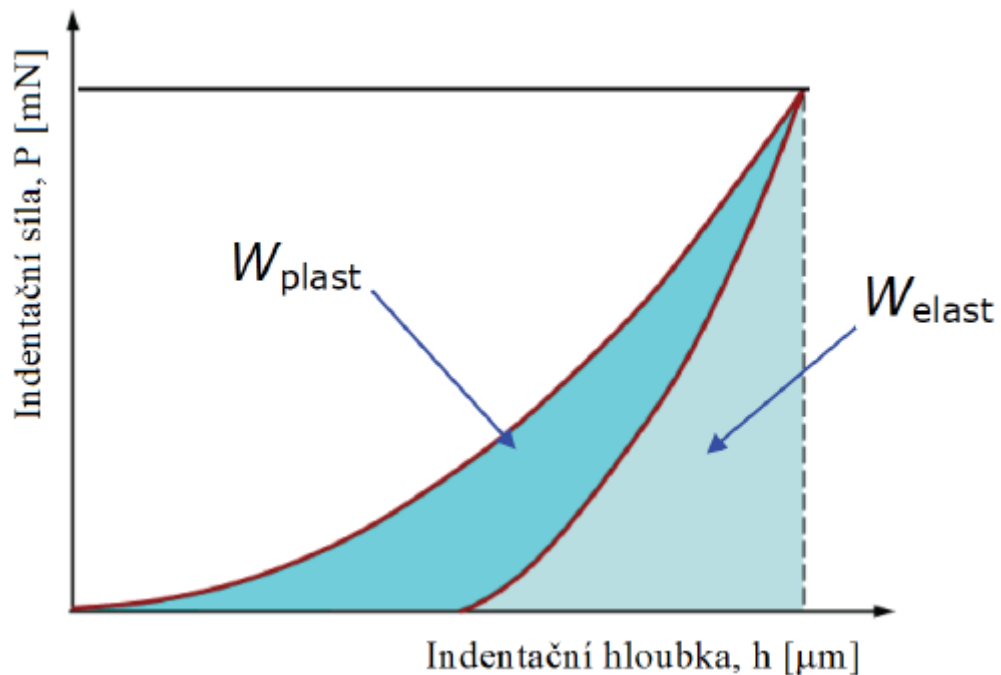
Obr. 16 Vyjádření vtiskového tečení [10]

#### 4.4 Deformační práce

Indentační křivka na obrázku č. 17 je zdrojem velkého množství informací. Celková práce  $W_{\text{total}}$  spotřebovávaná v průběhu indentačního cyklu je rovna ploše pod zatěžovací křivkou. Plocha mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou udává plastickou nevratnou práci  $W_{\text{plast}}$  a plocha pod odlehčovací křivkou zase elastickou vratnou práci  $W_{\text{elast}}$ . Koeficient zpětné relaxace  $\eta_{IT}$  je popsán jako podíl elastické práce  $W_{\text{elast}}$  a celkové práce  $W_{\text{total}}$ . [10] [11]

$$W_{\text{total}} = W_{\text{plast}} + W_{\text{elast}} \quad (9)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{\text{elast}}}{W_{\text{total}}} \cdot 100 \quad (10)$$



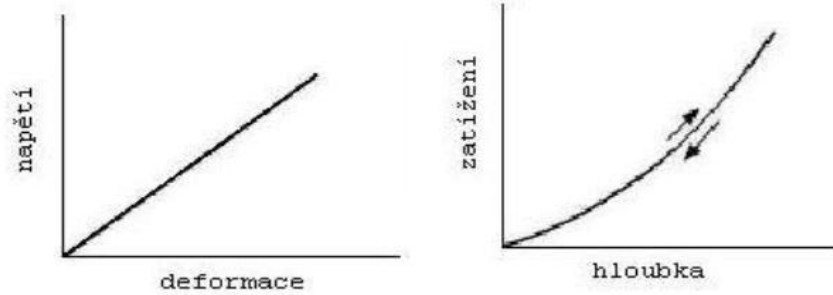
Obr. 17 Indentační křivka – deformační práce [10]

#### 4.5 Indentační křivky

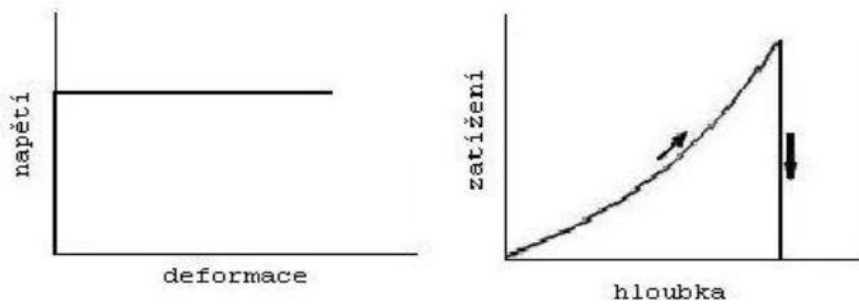
Jestliže se indentovaný vzorek plasticky deformuje, zůstává v jeho povrchu trvalý vtisk. Velikost vzniklého vtisku je příliš malá na přesné měření optickými technikami. Geometrie indentoru a jeho hloubka průniku do materiálu tak poskytují nepřímou informaci o velikosti kontaktní plochy při plném zatížení, ze kterého se vypočte průměrný kontaktní tlak a tak i tvrdost. Tvary indentačních křivek, jsou si bez ohledu na použitý indentor velice podobné. Metoda DSI se v praxi používá na široké a rozmanité množství materiálu, měkkými polymery začínaje a tvrdými uhlíkovými vrstvami konče. Odezva měřeného materiálu na indentaci je hlavním činitelem, který ovlivňuje tvar indentační křivky. Materiály se dají rozdělit do čtyř skupin podle reakce na vnější silové působení: [8]

- Elastické
- Elasticko – plastické
- Plastické
- Viskoplastické

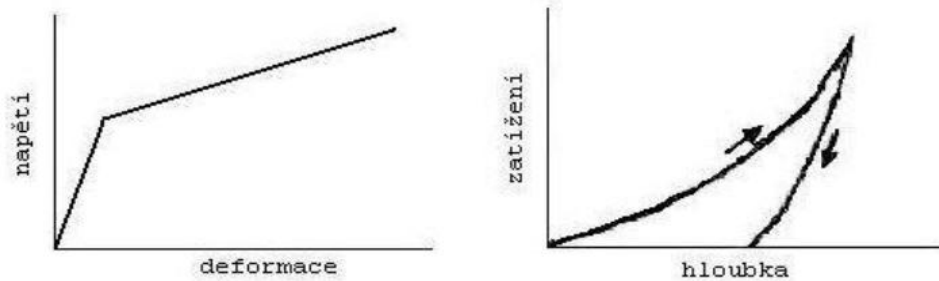
*ideálně elastický*



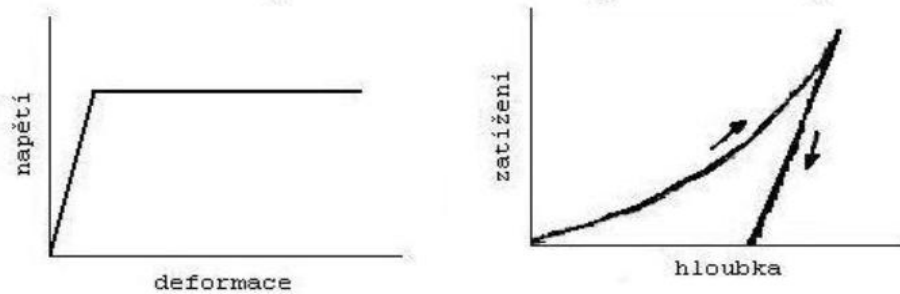
*ideálně tuhý-dokonale plastický*



*ideálně elasto-plastický*



*elastický - ideálně plastický*



Obr. 18 Porovnání odezvy materiálu na jednoosé a víceosé namáhání [8]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo provést měření mikrotvrlosti vzorků ocelí metodou DSI na přístroji MICRO-COMBI TESTER. Měření vzorků a následné určení mikrotvrlosti probíhalo při třech různých zatížení 0,5 N, 1 N, 5 N. Zkoumané oceli byli vždy ve dvou typech a to v nemodifikovaném stavu a modifikovaném stavu např: ocel 12060 a 12060 kalená a popouštěná ocel.

### *Popis postupu při vypracování bakalářské práce:*

- Vypracování literární studie na dané téma.
- Příprava zkušebních těles na experimentální část.
- Provedení měření tvrdosti.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části bylo měřeno 5 různých materiálů, které byly následně tepelně zpracovány. Následné vyhodnocení materiálu probíhalo porovnáním naměřených vlastností mezi tepelně nezpracovaným a tepelně zpracovaným vzorkem.

### 6.1 Druhy vzorků

Materiály vzorků měřených v této bakalářské práci dle označení ČSN:

- 12060
- 12060 kaleno a popouštěno
- 13420
- 13420 kaleno a popouštěno
- 14260
- 14260 cementováno
- 15241
- 15241 zušlechťováno
- 16220
- 16220 cementováno



Obr. 19 Připravené vzorky po zalisování a vyleštění

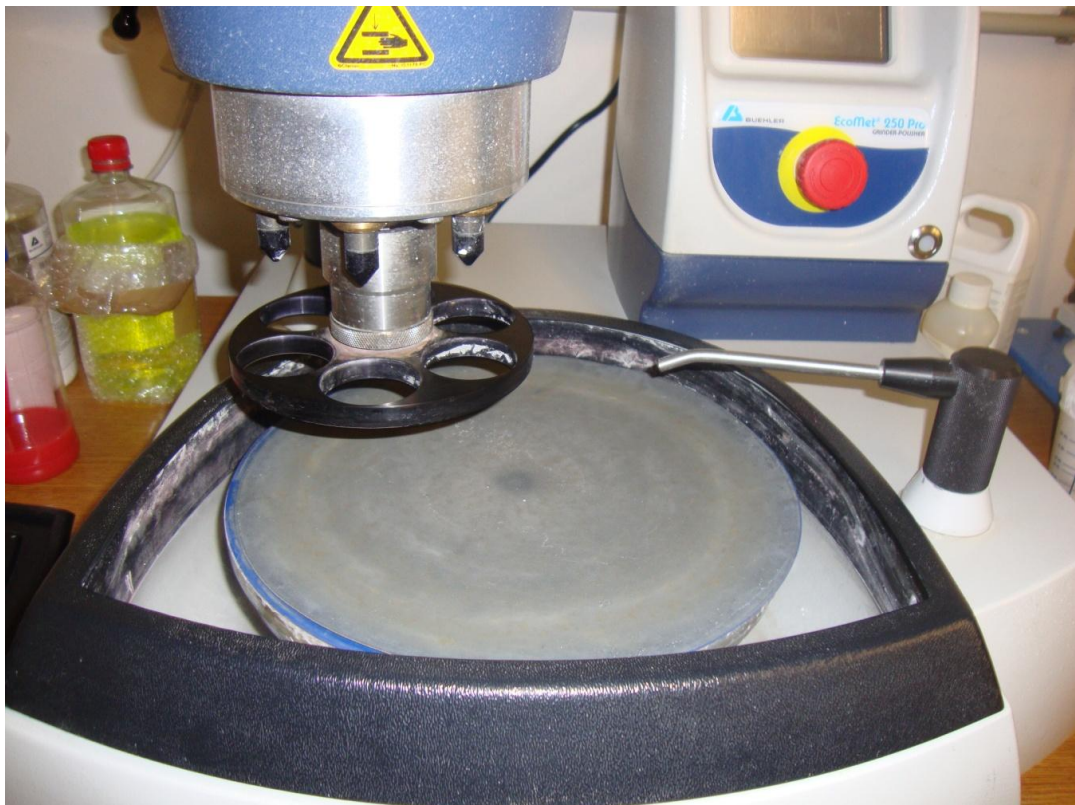
## 6.2 Příprava vzorků

Všechny vzorky před měřením bylo potřeba zalisovat a vyleštit. Leštění proběhlo na leštícím stroji Eco-Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler. Zalisování na stroji Simpli-Met 1000 Automatical Mounting Press taktéž od firmy Buehler. Původním polotovarem pro přípravu vzorků byli tyče daných typů ocelí i s jejich tepelným zpracováním a to kruhového průřezu.

Leštění vzorků bylo provedeno na leštičce BUEHLER EcoMet 250 PRO. Vzorky byly leštěny v několika krocích, nejprve pomocí brousících kotoučů z různými zrnitostmi a následné doleštění vzorku bylo pomocí textilního plátna a diamantové suspenze s velikostí brousících zrn 3  $\mu\text{m}$ .

Parametry leštění:

- přítlačná síla - 25 N,
- otáčky vzorků - 30 ot/min,
- otáčky plátna - 300 ot/min.



Obr. 20 Stroj na leštění vzorků Eco-Met 250 PRO



Obr. 21 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000

### 6.3 Popis měření metody DSI

Metoda DSI, pro niž byl zvolen český ekvivalent instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti má své počátky v 70. letech 20. století. Principem metody je, že měřicí přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu či poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka, zatížení – hloubka vtisku. Měřicí přístroje je možno připojit na počítač a průběh zkoušky ihned vyhodnotit. [8]

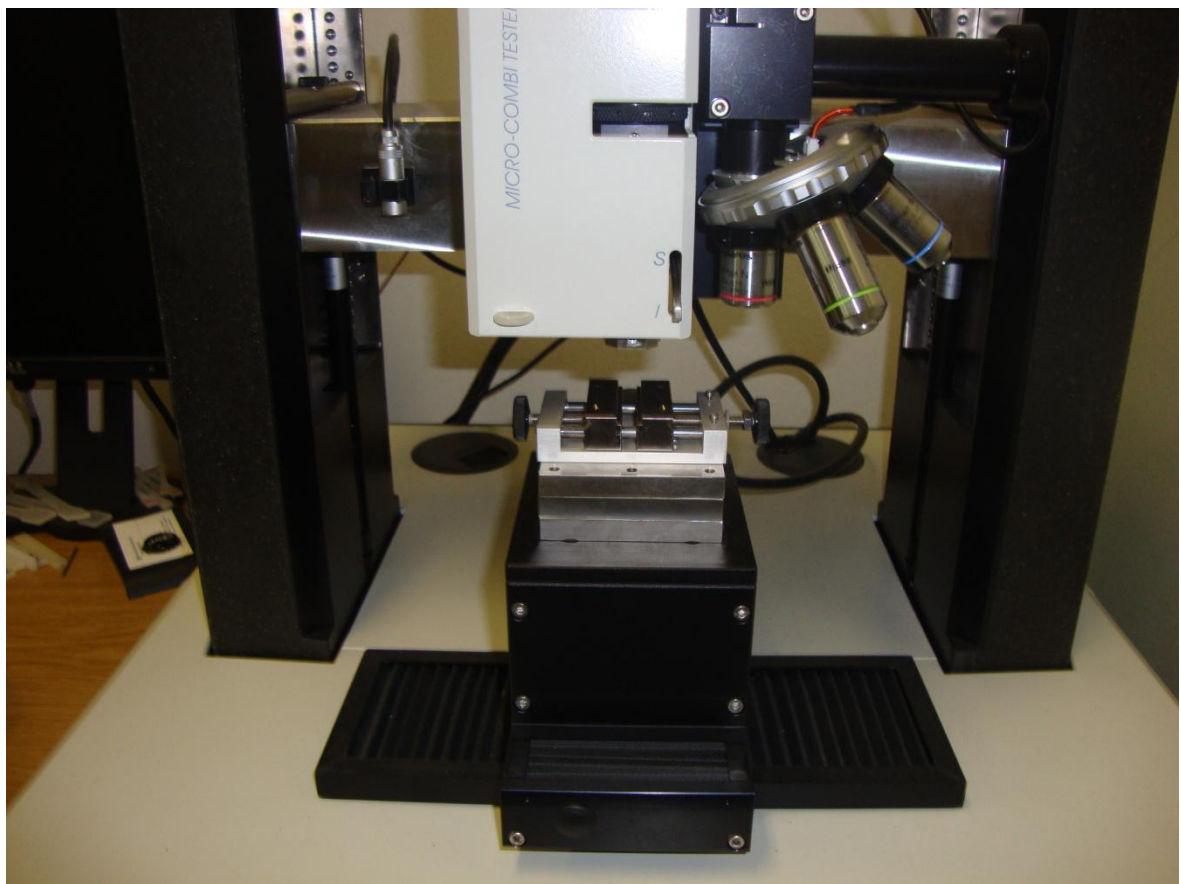
Měření zkušebních těles probíhalo na přístroji MICRO-COMBI TESTER od firmy CSM. Měření probíhalo 10x u každého vzorku a to při všech třech zatíženích 0,5 N, 1 N, 5 N. Před samotným měřením proběhla příprava vzorku, jejich zalisování a vyleštění.

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji Micro Combi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 14577.

Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení - 0,5 N, 1 N a 5 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 90 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 1 N/min (pro 0,5N), 2 N/min (pro 1N) a 10 N/min (pro 5N),
- Poissonovo číslo - 0,3.

Jako vnikací tělíčko (indentor) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  (Vickersův indentor). Měření byla provedena metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a vyhodnocení mikro-mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.



Obr. 22 Přístroj MICRO-COMBI TESTER od firmy CSM

## 7 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Zpracování naměřených dat probíhalo hlavně pomocí grafického zpracování ve formě grafů jednotlivých naměřených veličin. Grafy znázorňují vždy všechny vzorky a jejich naměřené hodnoty podle měřené veličiny a typu zatížení. Mezi graficky zpracované veličiny patří:

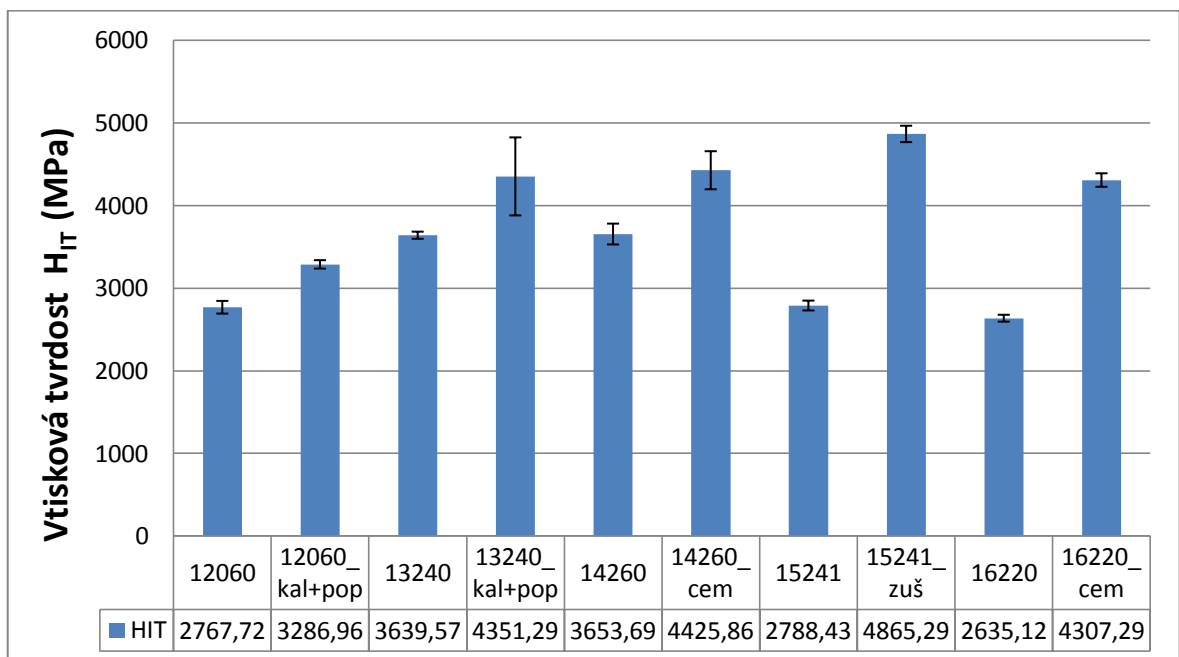
- Vtisková tvrdost –  $H_{IT}$
- Vtiskový modul –  $E_{IT}$
- Vtiskové tečení –  $C_{IT}$
- Tvrdost podle Vickerse –  $H_{VIT}$
- Plastická práce  $W_{PLAST}$  - Elastická práce  $W_{ELAST}$  – Zpětná relaxace  $n_{IT}$

### 7.1 Vtisková tvrdost $H_{IT}$ a naměřené hodnoty pro všechny zatížení

Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  je mírou rezistence k trvalé deformaci nebo poškození. [8]

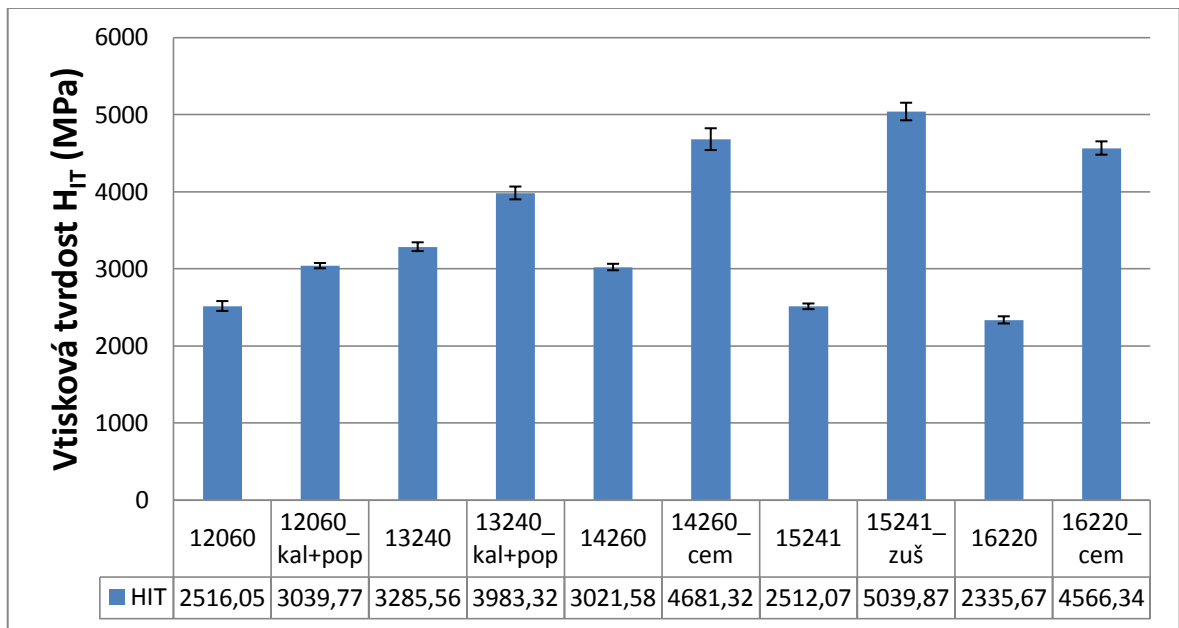
$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (11)$$

kde  $F_{max}$  je maximální zkušební zatížení,  $A_p$  je průměr kontaktní plochy vnikajícího tělesa a zkušební tělesa určený z křivky zatížení. [8]



Obr. 23 Hodnoty  $H_{IT}$  pro zatížení 0,5 N

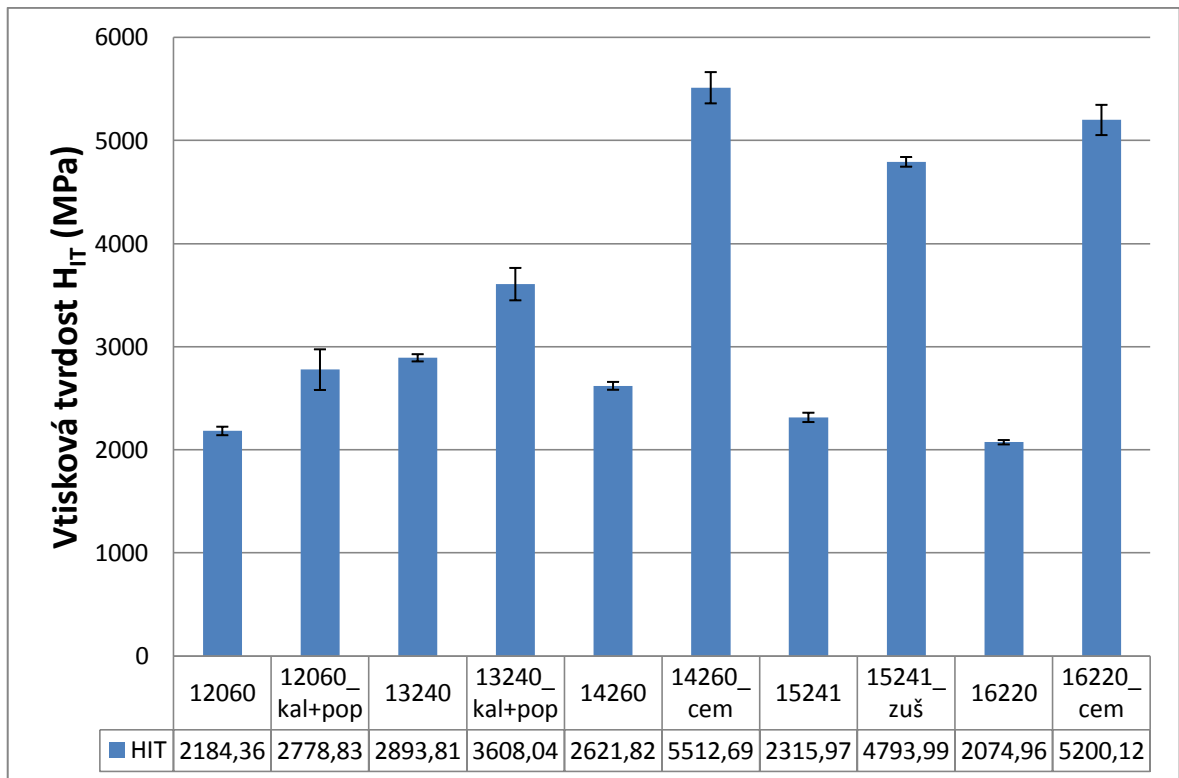
Při zatížení 0,5 N byl největší rozdíl mezi materiálem 15241 a 15241 zušlechťováno. Rozdíl byl 2076,86 MPa. Další větší rozdíl byl naměřen mezi materiálem 16220 a 16220 cementováno. U materiálu 12060 a 12060 kaleno + popouštěno byl naměřen nejmenší rozdíl, a to 519,24 MPa. U zbývajících materiálů byly naměřeny téměř stejné rozdíly mezi modifikovaným a nemodifikovaným vzorkem.



Obr. 24 Hodnoty  $H_{IT}$  pro zatížení 1 N

Při zatížení 1 N byl největší rozdíl mezi materiálem 15241 a 15241 zušlechťováno. Rozdíl činil 2527,8 MPa. U ostatních materiálů podobné rozdíly jako u zatížení 0,5 N, vyjma 14260 a 14260 cementováno. Rozdíl činí 1659,74 MPa.



Obr. 25 Hodnoty  $H_{IT}$  pro zatížení 5 N

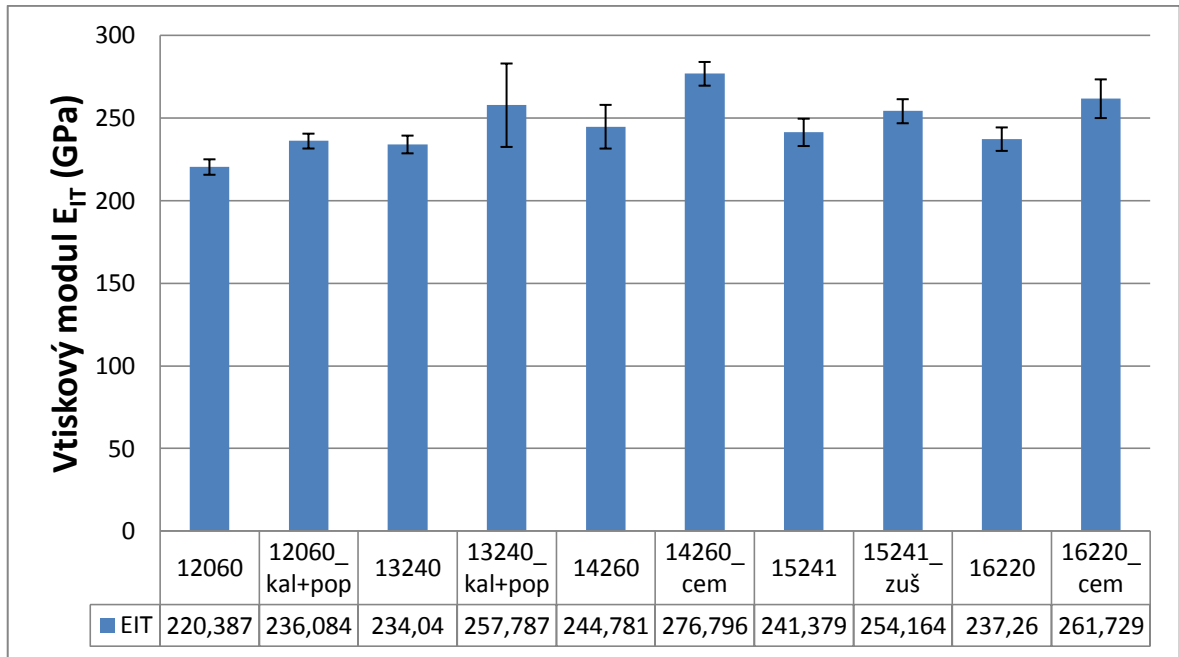
Při zatížení 5 N byl naměřen největší rozdíl mezi materiálem 16220 a 16220 cementováno. Druhý největší rozdíl je mezi materiálem 14260 a 14260 cementováno. Materiály 12060 a 13240 měly podobné rozdíly mezi svou modifikovanou a nemodifikovanou verzí po dobu všech zatížení.

## 7.2 Vtiskový modul $E_{IT}$ a naměřené hodnoty pro všechny zatížení

Vtiskový modul  $E_{IT}$  se může vypočítat ze směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$  a je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu. Rozdíly mohou nastat v případě, kdy vtisková deformace je ovlivněna efekty „Pile – up“ nebo „Sink – in“. [8]

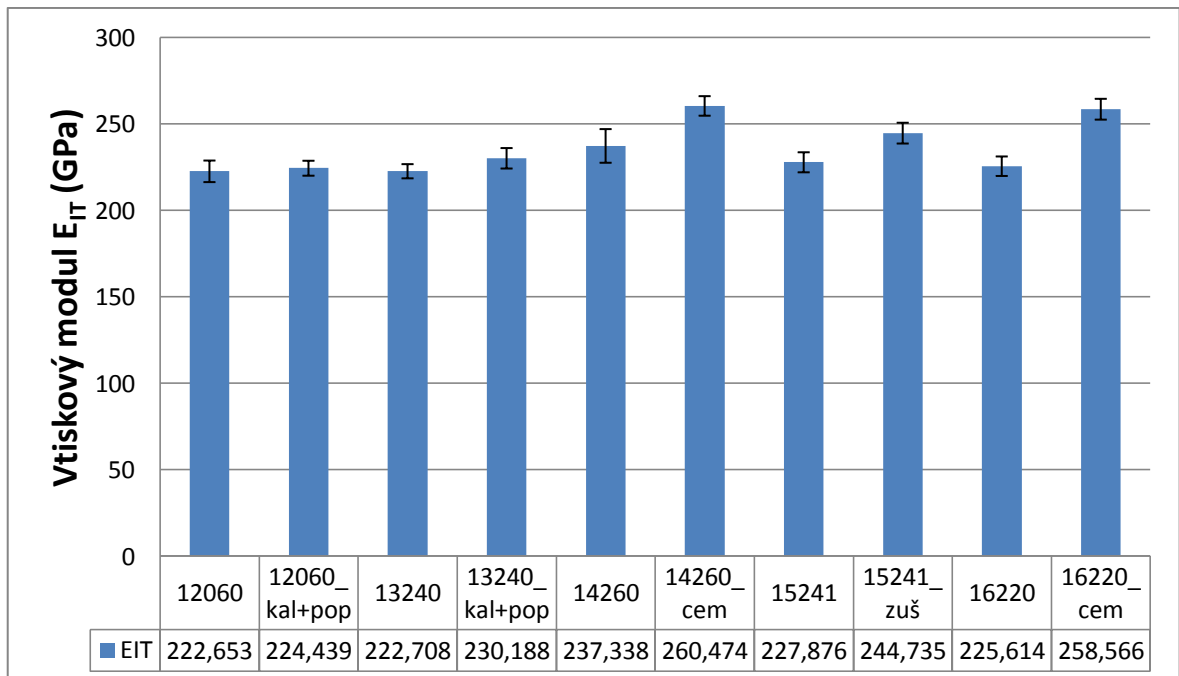
$$E_{IT} = \frac{1-(v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1-(v_i)^2}{E_i}} \quad (12)$$

Kde  $v_s$  je Poissonův poměr zkušební tělesa,  $v_i$  je Poissonův poměr vnikajícího tělesa,  $E_r$  je redukovaný modul vtiskového kontaktu,  $E_i$  je kontaktní poddajnost,  $A_p$  průmět kontaktní plochy. [8]



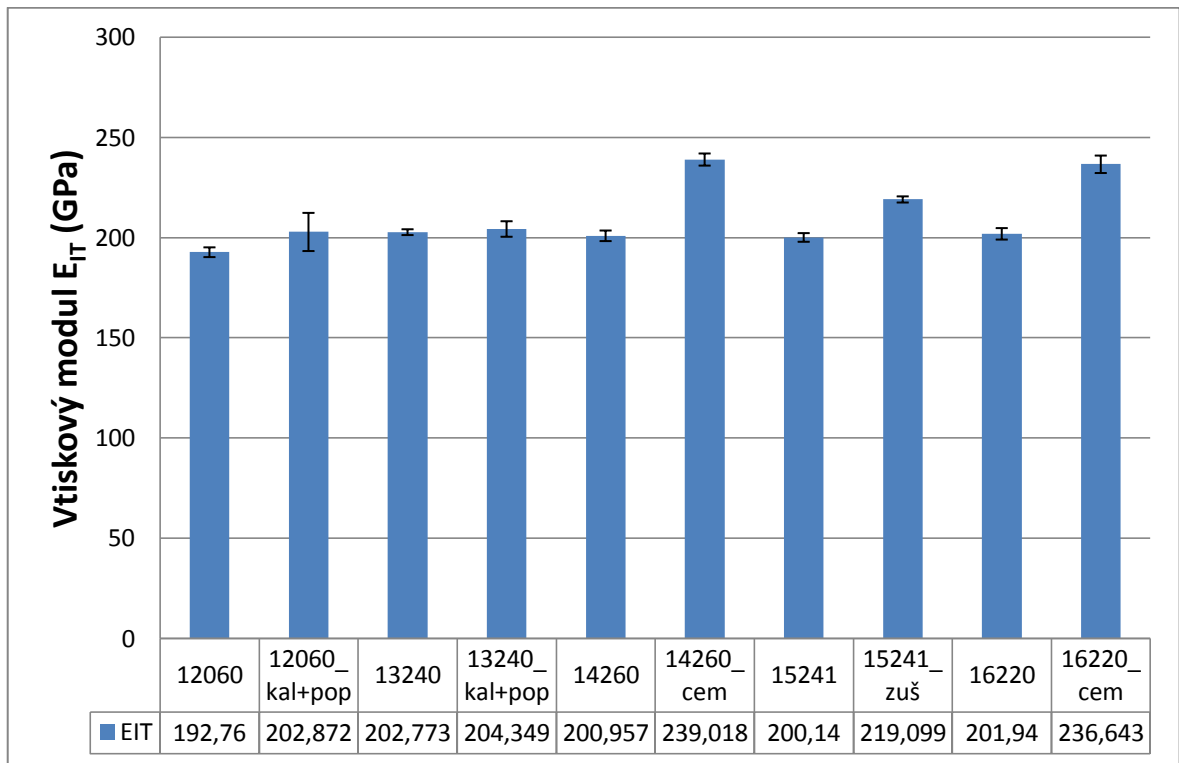
Obr. 26 Hodnoty  $E_{IT}$  pro zatížení 0,5 N

Při zatížení 0,5 N je největší rozdíl v hodnotách vtiskového modulu mezi materiálem 14260 a 14260 cementováno. Rozdíl činí 32,015 GPa. Nejmenší rozdíl naměřen mezi materiálem 15241 a 15241 zušlechťováno.



Obr. 27 Hodnoty  $E_{IT}$  pro zatížení 1 N

U zatížení 1 N byl naměřen největší rozdíl u materiálu 16220 a 16220 cementovaný, a to o hodnotu 32,952 GPa. Nejmenší rozdíl byl naměřen u materiálu 12060 a 12060 kaleno + popouštěno, a to pouhých 1,786 GPa.



Obr. 28 Hodnoty  $E_{IT}$  pro zatížení 5 N

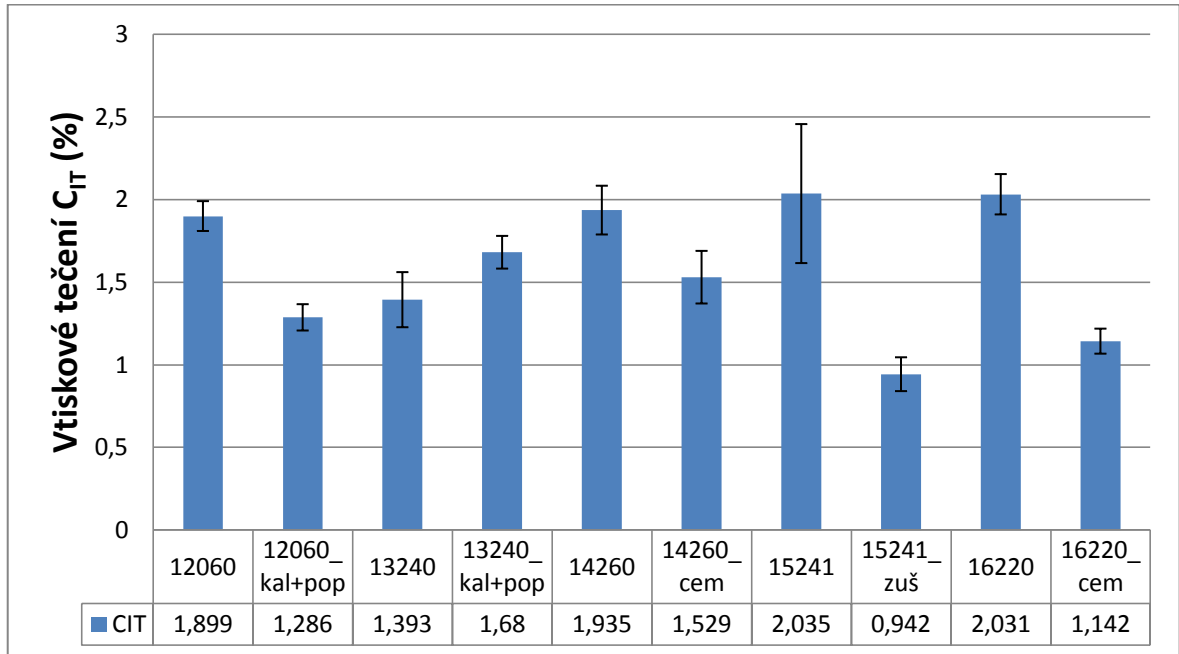
Při zatížení 5 N byl naměřen největší rozdíl mezi hodnotami 14260 a 14260 cementováno. Nejmenší rozdíl byl naměřen u materiálu 13240 a 13240 kaleno + popouštěno. V tomto případě byly všechny naměřené hodnoty téměř totožné, výjimku tvořily pouze materiály 14260 cementováno, 15241 a 16220 cementováno.

### 7.3 Vtiskové tečení $C_{IT}$ a naměřené hodnoty pro všechny zatížení

Jestliže se při kontaktním zatížení měří změna hloubky vtisku, může se vypočítat relativní hloubka vtisku. Jedná se o hodnotu tečení materiálu. [8]

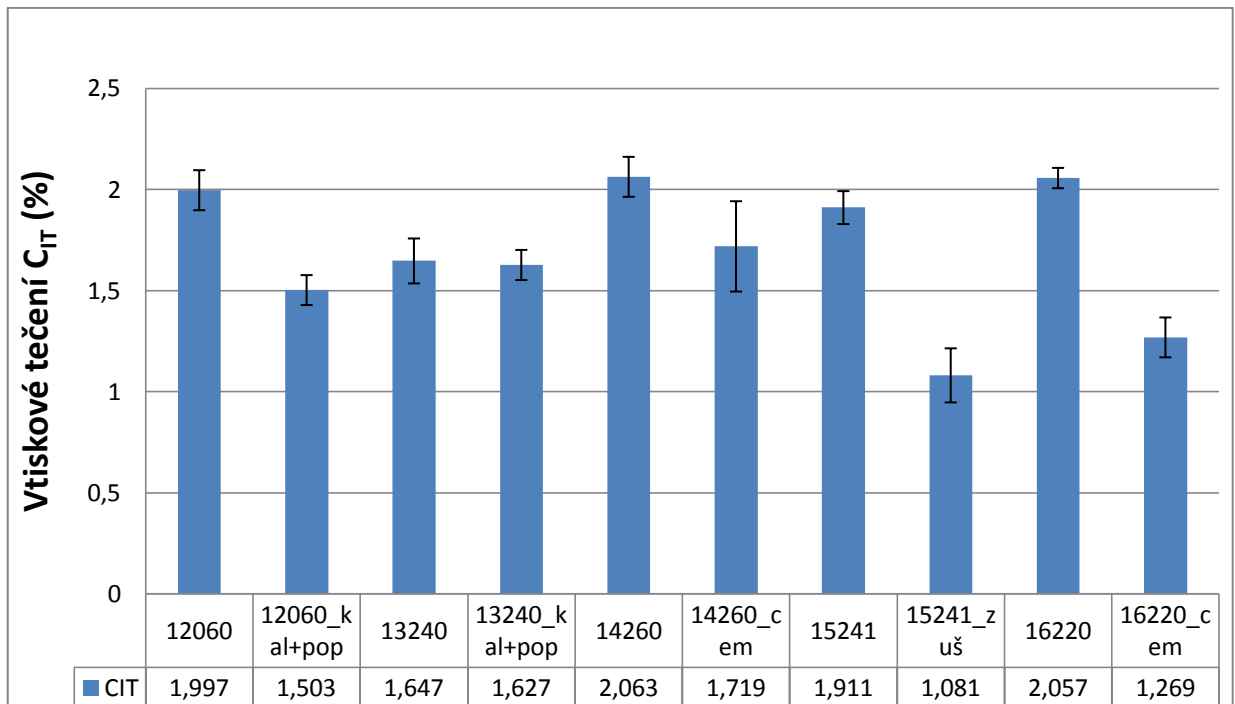
$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100. \quad (13)$$

Kde  $h_1$  je hloubka vtisku v milimetrech v čase, kdy je dosaženo zkušebního zatížení (které je udržováno na konstantní úrovni),  $h_2$  je hloubka vtisku v milimetrech v čase výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení. [8]

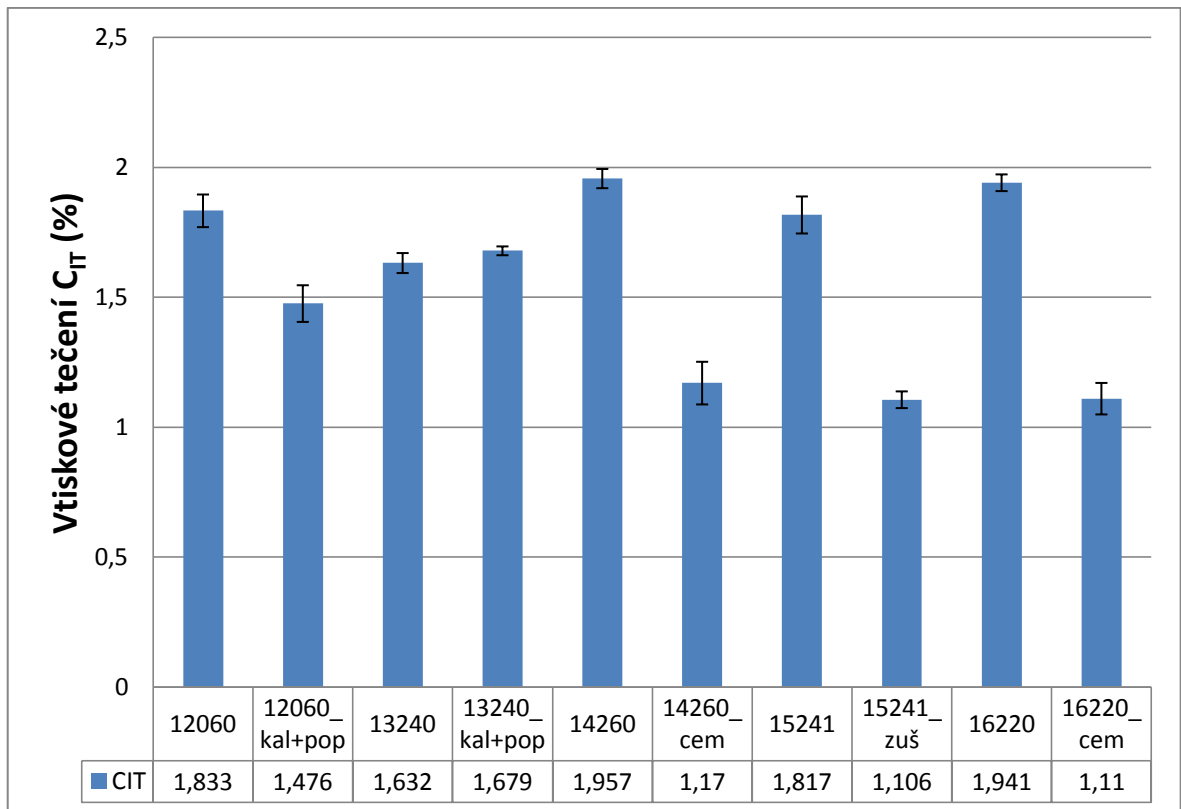


Obr. 29 Hodnoty  $C_{IT}$  pro zatížení 0,5 N

Z výše uvedeného grafu vyplývá, že výsledky hodnot měřených materiálů jsou poměrně rozdílné. U čtyř z pěti měřených materiálů, které byly po tepelném zpracování došlo k poklesu hodnot. Výjimku tvoří pouze materiál 13240 a 13240 kaleno + popouštěno a rozdíl činí 0,287 %.

Obr. 30 Hodnoty  $C_{IT}$  pro zatížení 1 N

Jak je patrné z výše uvedeného grafu, výsledky naměřených hodnot se opět spíše liší. Nejmenší rozdíl byl naměřen u materiálu 13240 a 13240 kaleno + popouštěno. Tyto hodnoty se ukázaly být skoro totožné, rozdíl totiž činil pouhých 0,04 %. Největší rozdíl byl naměřen podobně jako v předchozí tabulce u materiálu 15241 a 15241 zušlechtěno.

Obr. 31 Hodnoty  $C_{IT}$  pro zatížení 5 N

Z grafu lze zjistit, že u prvních dvou z pěti měřených materiálů byly zjištěny poměrně malé rozdíly u materiálu před tepelnou úpravou a po úpravě. Rozdíl nepřesáhl 4 desetiny procenta. U zbylých třech dvojic měřených materiálů byly rozdíly znatelně vyšší, přičemž nejvyšší z nich byl u materiálu 16220 a 16220 cementováno, a to 0,831 %.

#### 7.4 Tvrdost $HV_{IT}$ a naměřené hodnoty pro všechny zatížení

Při této zkoušce se vtlačuje do materiálu diamantový jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$  se čtvercovou základnou a mikroskopicky nebo projekcí se zjišťuje střední délka obou úhlopříček. Pro praktickou potřebu se používá tabulek, ve kterých se podle délky úhlopříčky  $u$  a použité síly  $F$  najde přímo odpovídající tvrdost. Těto metody se může použít pro všechny tvrdosti. Ve všech rozsazích je stejně přesná a není téměř závislá na zatížení. [2]

Tvrdost se vyjadřuje jako poměr zatížení vnikacího tělíska  $F$  k ploše vtisku:

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2}; \quad HV = 0,189 \frac{F}{d^2} \quad (14)$$

kde  $F$  je zátěžná síla (N),

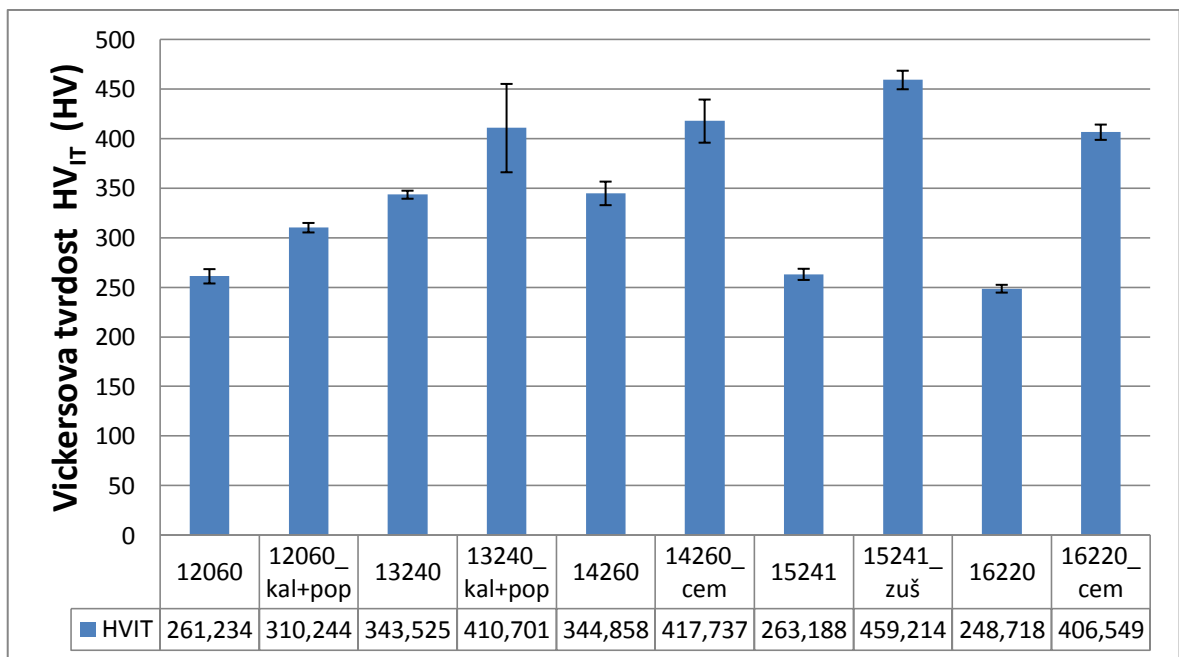
$$\text{popř. } HV = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (15)$$

kde  $F$  je zátěžná síla (kp),

$d$  – aritmetický průměr délky úhlopříček vtisku (mm).

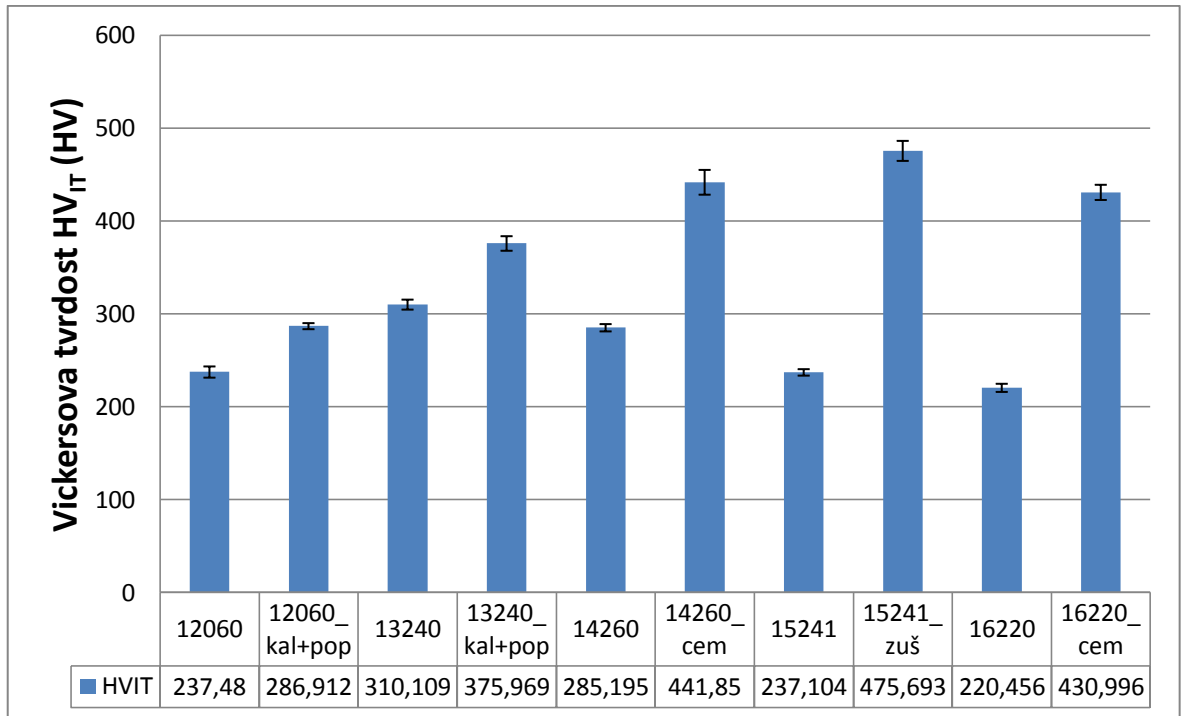
Tvrdoost se označuje bezrozměrným číslem před písmeny HV.

Vtisky při zkoušce podle Vickerse jsou i při různém zatížení geometricky podobné a zatížení lze proto volit libovolně. Vzhledem k malým rozměrům vtisků je často nezbytná úprava měřeného povrchu broušením. Tloušťka předmětu musí být rovna nebo větší než  $1,5 d$ . Rovněž nejmenší vzdálenost tisku od kraje vzorku je stanovena normou. Úhlopříčky vtisku se měří obvykle mikroskopem. [1]



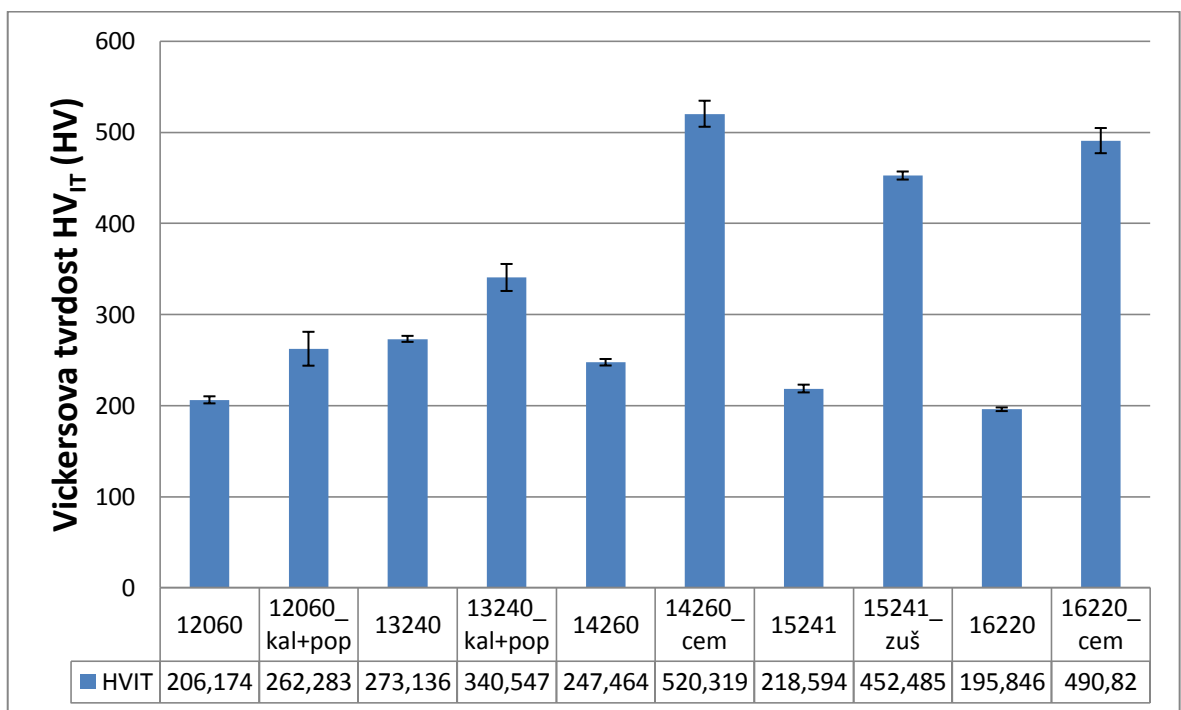
Obr. 32 Hodnoty  $HV_{IT}$  pro zatížení 0,5 N

Při měření Vickersovy tvrdosti se zatížením 0,5 N bylo zjištěno, že největší rozdíl mezi naměřenými hodnotami se vyskytl u materiálu 15241 a 15241 zušlechtěno, který činí 196,026 HV. Při tomto měření bylo taktěž zjištěno, že u všech tepelně opracovaných měřených materiálů odpovídaly výsledky vyšším hodnotám než u všech tepelně neopracovaných materiálů.



Obr. 33 Hodnoty HV<sub>IT</sub> pro zatížení 1 N

Při zatížení 1 N je největší rozdíl ve Vickersovy tvrdosti mezi materiálem 15241 a 15241 zušlechtováno. Rozdíl činí 238,589 HV. Druhý největší rozdíl je této hodnotě velmi podobný, činí 210,54 HV, a týká se materiálu 16220 a 16220 cementováno.



Obr. 34 Hodnoty HV<sub>IT</sub> pro zatížení 5 N



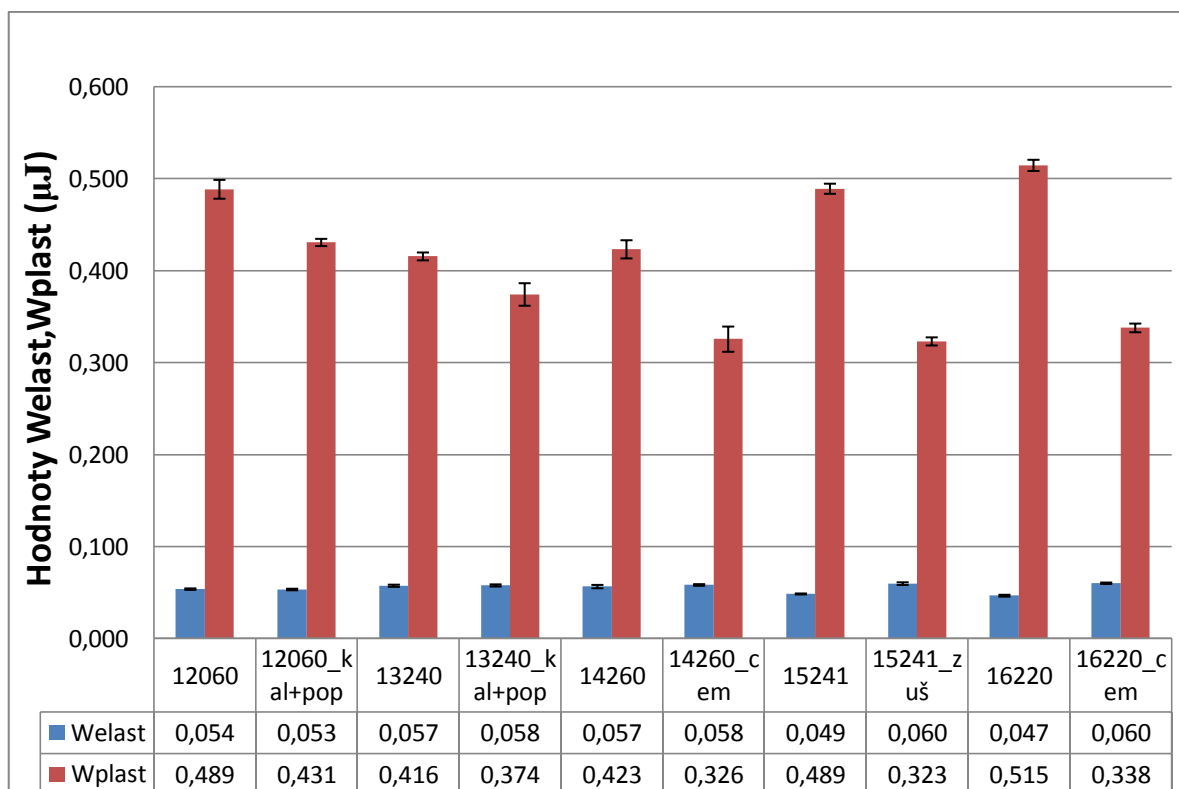
Z grafu opět můžeme vyčíst, že naměřené hodnoty jsou spíše nevyrovnané. Ve třech z pěti měřených materiálů jsme zaznamenali, že výsledky naměřených hodnot jsou u tepelně zpracovaných materiálů výrazně vyšší, než u tepelně nezpracovaných. Průměrný rozdíl těchto hodnot činí 267,24 HV.

### 7.5 Naměřené hodnoty $W_{PLAST}$ , $W_{ELAST}$ , $\eta_{IT}$

Indentační křivka je zdrojem velkého množství informací. Celková práce  $W_{total}$  spotřebovávaná v průběhu indentačního cyklu je rovna ploše pod zatěžovací křivkou. Plocha mezi zatěžovací a odlehčovací křivkou udává plastickou nevratnou práci  $W_{plast}$  a plocha pod odlehčovací křivkou zase elastickou vratnou práci  $W_{elast}$ . Koeficient zpětné relaxace  $\eta_{IT}$  je popsán jako podíl elastické práce  $W_{elast}$  a celkové práce  $W_{total}$ . [10] [11]

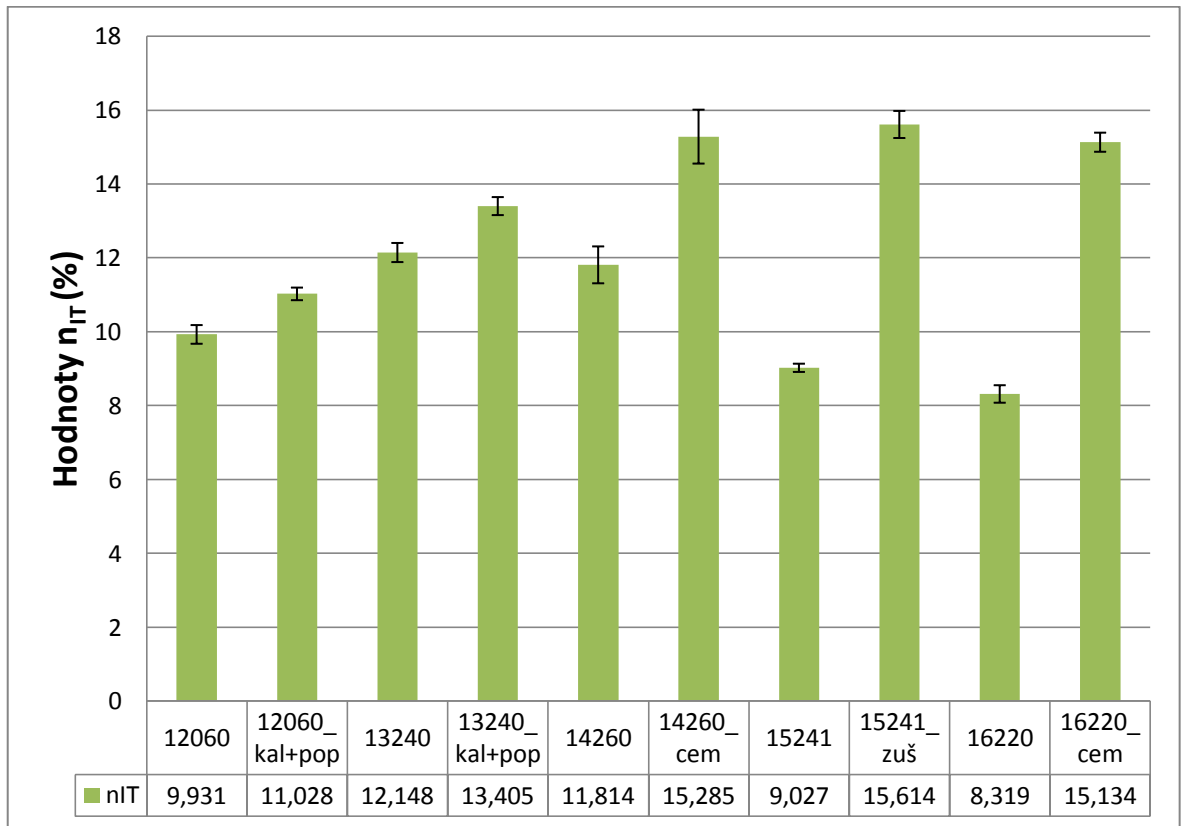
$$W_{total} = W_{plast} + W_{elast} \quad (16)$$

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (17)$$



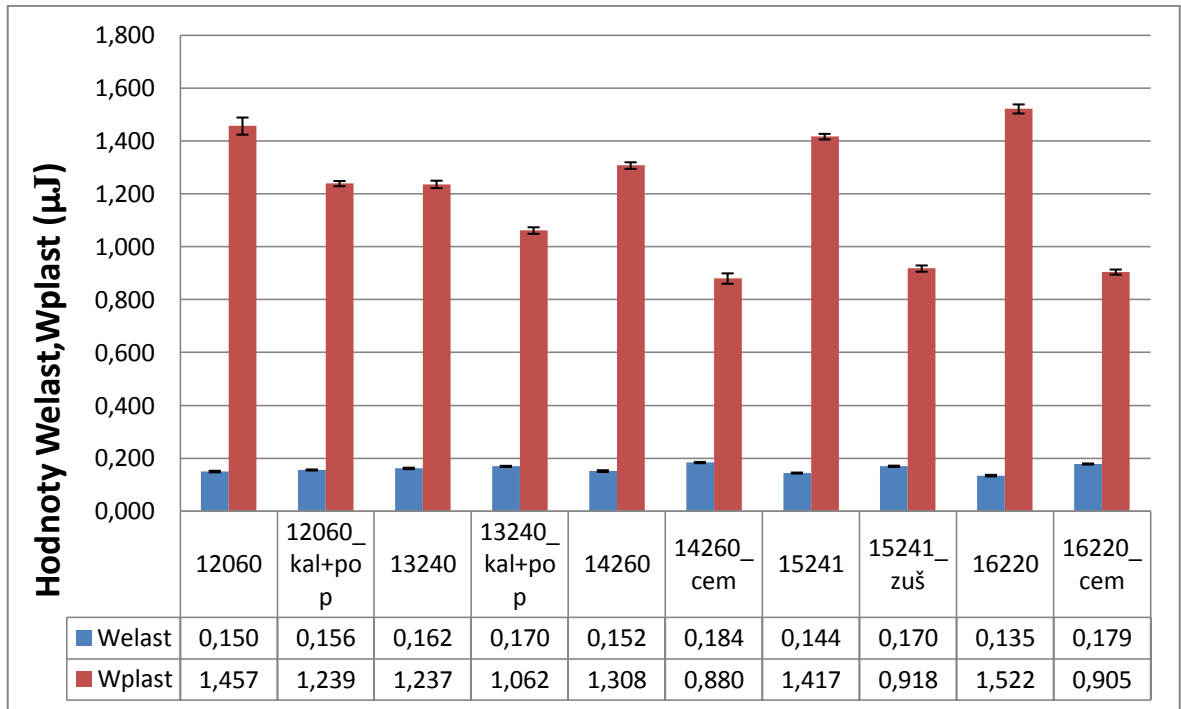
Obr. 35 Hodnoty  $W_{ELAST}$ ,  $W_{PLAST}$  pro zatížení 0,5 N

Při zatížení 0,5 N se hodnoty  $W_{\text{elast}}$  u všech materiálů po tepelném zpracování zvyšovali, až na materiál 12060 u kterého byl zaznamenán pokles. Největší rozdíl byl naměřen u materiálu 16220, rozdíl činí 0,0135505  $\mu\text{J}$ . Hodnoty  $W_{\text{plast}}$  u všech materiálů po tepelném zpracování klesají a nejvíce u materiálů 16220.

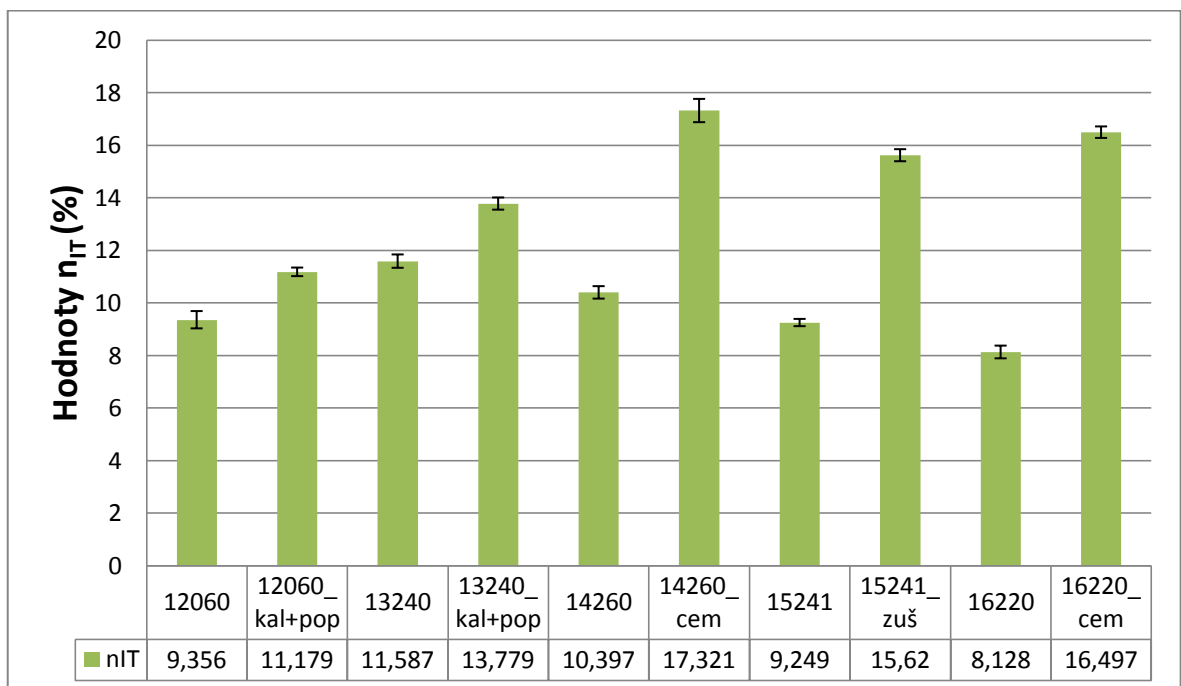


Obr. 36 Hodnoty  $n_{IT}$  pro zatížení 0,5 N

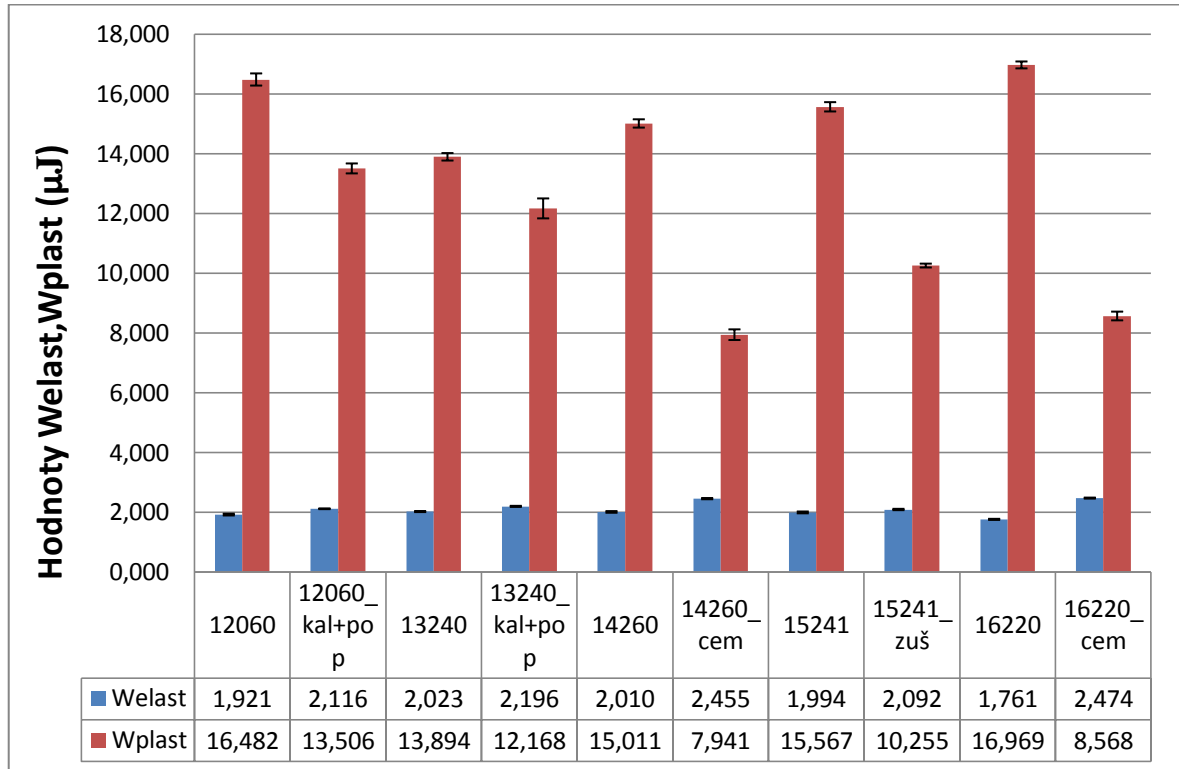
Hodnoty  $n_{IT}$  pro zatížení 0,5 N se u všech měřených materiálů po tepelném zpracování zvětšují. U materiálu 12060 a 13240 není nárůst hodnoty  $n_{IT}$  tak razantní jako u ostatních materiálů. Maximální naměřený rozdíl je u materiálu 16220 a činí 6,815 %.


 Obr. 37 Hodnoty  $W_{ELAST}$ ,  $W_{PLAST}$  pro zatížení 1 N

Při zatížení 1 N byli naměřené hodnoty  $W_{elast}$  u všech tepelně zpracovaných vzorků vyšší než u základního materiálu, přesně opačných výsledků jsme dosáhli u měření  $W_{plast}$ , kdy všechny tepelně zpracované materiály vykazují menší hodnotu plastické práce než základní materiál.

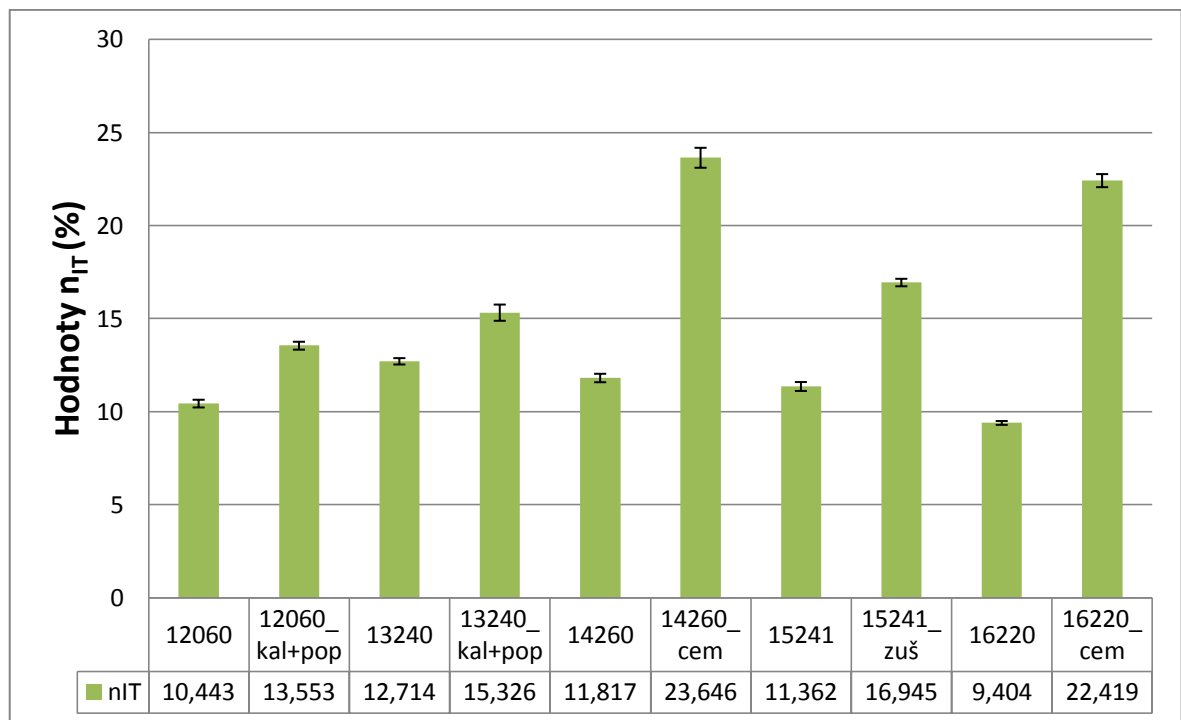

 Obr. 38 Hodnoty  $n_{IT}$  pro zatížení 1 N

Při zatížení 1 N se hodnoty  $n_{IT}$  u všech materiálů s tepelným zpracováním zvyšovali podobně jako u předešlého zatížení. Největší rozdíl byl opět u materiálu 16220, 8,369 %. Nejmenší rozdíl u materiálu 12060 činil 1,823 %



Obr. 39 Hodnoty  $W_{ELAST}$ ,  $W_{PLAST}$  pro zatížení 5 N

Při zatížení 5 N byly naměřené hodnoty  $W_{elast}$  u všech materiálů vyšší než u materiálů tepelně nezpracovaných. Nejvyšší rozdíl naměřených hodnot byl u materiálu 16220 stejně jako u předešlých zatížení. Hodnoty  $W_{plast}$  se u tepelně zpracovaných vzorků snižovali vzhledem k základnímu materiálu. Největší rozdíl u měření plastické práce byl u materiálu 16220.

Obr. 40 Hodnot  $n_{IT}$  pro zatížení 5 N

Hodnoty  $n_{IT}$  při zatížení 5 N se u tepelně zpracovaných materiálů zvyšovali podobně jako v předešlém zatížení. Největší nárůst hodnoty  $n_{IT}$  byl naměřen u materiálu 16220 a činil 13,015 %. Druhý největší rozdíl byl u materiálu 14260 a činil 11,829 %.

## ZÁVĚR

Bakalářská práce byla rozdělena na dvě části. Část teoretickou, která se zabývala rozdělením ocelí, tepelným a tepelně chemickým zpracováním, tvrdosti, mikrotvrdosti a metodou DSI. Praktická část, řeší problematiku měření mikrotvrdosti zkoušených těles. Mezi zkoušené materiály patří oceli bez tepelného zpracování a oceli tepelně zpracované například materiál 12060 a 12060 kalený a popouštěný, 13240 a 13240 kalený a popouštěný, 14260 a 14260 cementovaný dále pak materiál 15241 a 15241 zušlechťovaný a posledním měřeným vzorkem materiálu 16220 a 16220 cementovaný. Měření se provádělo ve třech zatížených 0,5 N, 1 N, 5 N. Každý vzorek byl naměřen 10x pro daný typ zatížení. Naměřené hodnoty byly následně graficky zpracovány a vyhodnoceny. Při vyhodnocení bylo hlavním cílem porovnat hodnoty naměřené pro modifikovaný a nemodifikovaný materiál stejného typu.

Z naměřených hodnot materiálů 12060 a 12060 kalený a popouštěný lze vyvodit, že tepelně zpracovaný vzorek dosahoval vyšších hodnot ve všech měřených veličinách až na vtiskové tečení, kde tepelně nezpracovaný materiál vykazoval vyšší hodnotu vtiskového tečení  $C_{IT}$ . Největší naměřená hodnota u materiálu 12060 vtiskové tvrdosti byla naměřena u zatížení 0,5 N, což odpovídalo hodnotě 3286,96 MPa, a to u tepelně zpracovaného vzorku. Vtiskový modul tohoto materiálu byl 236,084 GPa.

Vtiskové tečení  $C_{IT}$  dosahovalo nejvyšší hodnoty u tepelně nezpracovaného vzorku při zatížení 1 N a tato naměřená hodnota činila 1,997 %. Tvrdost Vickerse  $HV_{IT}$  dosahovala nejvyšší hodnoty u tepelně zpracovaného vzorku 310,244 HV. Hodnota elastické práce byla naměřena vyšší u tepelně zpracovaného materiálu při zatížení 5 N. Plastická práce dosahovala nejvyšší hodnoty u tepelně nezpracovaného materiálu při zatížení 5 N. Největší hodnota zpětné relaxace byla naměřena u tepelně zpracovaného materiálu taktéž při zatížení 5 N. Tato hodnota činila 13,553 %.

Materiály 13240 a 13240 kaleno + popouštěno dosahovali podobných výsledků jako materiál 12060. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$  byla naměřena při zatížení 0,5 N 4351,29 MPa. Největší vtiskový modul dosahoval hodnot 257,787 GPa při zatížení 0,5 N. Hodnoty vtiskového tečení si při zatížení 1 N a 5 N byly velmi podobné, přičemž nejvyšší hodnota byla 1,679 %. Nejvyšší tvrdost podle Vickerse byla naměřena u tepelně zpracovaných materiálů při zatížení 0,5 N.

Hodnoty elastické práce byly vždy vyšší u tepelně zpracovaného materiálu. Naopak hodnoty plastické práce byly u tepelně zpracovaného materiálu vždy nižší. Nejvyšší hodnota  $n_{IT}$  při zatížení 5 N byla 15,26 %.

Materiál 14260 dosáhl nejvyšší vtiskové tvrdosti 5512,69 MPa při zatížení 5 N u tepelně zpracovaného vzorku. Vtiskový modul dosáhl nejvyšší hodnoty 276,796 GPa u zatížení 0,5 N. Vtiskové tečení dosáhlo největší hodnoty 2,063 %. Největší tvrdost podle Vickerse 520,32 HV. Hodnota elastické práce byla vyšší u tepelně zpracovaného vzorku. Naopak hodnota plastické práce byla naměřena vyšší u tepelně nezpracovaného vzorku. Nejvyšší hodnota  $N_{IT}$  byla 23,65 %.

Nejvyšší naměřená hodnota vtiskové tvrdosti u materiálu 15241 byla 5039,87 MPa. Tato hodnota byla naměřena při zatížení 1 N. Vtiskový modul dosahoval hodnoty až 254,164 GPa. Nejvyšší hodnota vtiskového tečení byla naměřena u tepelně nezpracovaného vzorku. Nejvyšší dosažená tvrdost podle Vickerse 475,693 HV. Hodnoty elastické práce a plastické práce měly stejnou charakteristiku jako u předešlých materiálů, vyšší hodnoty elastické práce byly u zušlechtěného materiálu. Vyšší hodnoty plastické práce byly u tepelně nezpracovaného materiálu. Největší hodnotou zpětné relaxace u tohoto materiálu byla hodnota 16,945 %

Posledním měřeným materiálem byl materiál 16220 a 16220 cementováno. Tento materiál dosáhl druhé nejvyšší vtiskové tvrdosti 5200,12 MPa. Nejvyšší hodnota byla naměřena u materiálu 14260 cementovaného – 5512,69 MPa. Největší hodnota vtiskového modulu u materiálu 16220 byla 261,729 GPa. Největší hodnota vtiskového tečení byla 2,057 % při zatížení 1 N. Největší hodnota Vickersovy tvrdosti byla 490,82 HV. Charakteristika hodnot elastické a plastické práce byla téměř totožná s předešlým materiálem 15241. Zpětná relaxace dosahovala nejvyšší hodnoty 22,419 %

Z vypracovaných grafů lze jednoduše odečíst jednotlivé hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřených veličin. Do grafů byly vyneseny i hodnoty směrodatných odchylek pro lepší znázornění možného rozsahu hodnot. V grafech jednotlivých veličin jsou vždy obsaženy všechny měřené materiály.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] PLUHARĚ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 549 s.
- [2] HLUCHÝ, Miroslav a Josef BENEŠ. *Strojírenská technologie: pro SPŠ nestrojnické*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981, 248 s.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-24-83.
- [4] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, xiv, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 8072041932.
- [6] AUFFAHRTOVÁ. *Mikrotvrdomost kovových materiálů*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati.
- [7] HANÁK, Roman. *Měření tvrdosti konstrukčních ocelí*. Zlín, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati.
- [8] DUŠEK, J., Dizertační práce - *Tvrdomost, mikrotvrdomost, nanotvrdomost – čisté kovy měřené metodou DSI*, Brno: Masarykova univerzita v Brně, 171 s.
- [9] ČTVRTLÍK, R. *Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev*. Olomouc, 2012. 145 s. Dizertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [10] Indentation Software manual. CSM Instrument, <http://www.csm-instruments.com>, Peseux, Switzerland. 117s.
- [11] ČSN EN ISO 14577-1 *Kovové materiály – Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů – Část 1: Zkušební metoda*, Říjen 2002. 31s.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\mu\text{J}$	mikrojoule
%	procento
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$\pi$	pí
A	plocha
B	bor
C	uhlík
Co	kobalt
Cr	chrom
$C_{IT}$	vtiskové tečení (creep)
ČSN	česká státní norma
d	průměr
DSI	instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti
EN	evropská norma
$E_{IT}$	vtiskový modul
F	síla
Fe	železo
$H_{IT}$	vtisková tvrdost
$HV_{IT}$	Vickersova tvrdost
mm	milimetr
Mn	mangan
Mo	molybden
Ni	nikl
$N_{IT}$	zpětná relaxace

---

P	fosfor
p	pond
Pa	pascal
S	síra
Si	křemík
sin	sinus
Ti	titan
V	vanad
W	wolfram
$W_{\text{elast}}$	elastická práce
$W_{\text{plast}}$	plastická práce
Zr	zirkonium

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Schéma rozdělení oceli ke tváření .....	13
Obr. 2 Schéma číselného označení oceli ke tváření [4] .....	16
Obr. 3 Schéma hlavních způsobů tepelného zpracování .....	19
Obr. 4 Žíhací teploty nelegovaných ocelí [2] .....	20
Obr. 5 Kalicí teploty nelegovaných ocelí [2] .....	22
Obr. 6 Diagram závislosti tvrdosti na popouštěcí teplotě [2] .....	24
Obr. 7 Část rovnovážného diagramu Fe – Fe <sub>3</sub> C <sub>3</sub> s vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot [6] .....	26
Obr. 8 Průběh času a teplot při nitridování [6] .....	27
Obr. 9 Zkouška tvrdosti podle Brinella [2] .....	29
Obr. 10 Princip zkoušky tvrdosti podle Rockwella [1] .....	30
Obr. 11 Zkouška tvrdosti podle Rockwella [7] .....	31
Obr. 12 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [2] .....	31
Obr. 13 Knoopův indentor [8] .....	33
Obr. 14 Berkovičův indentor [8] .....	34
Obr. 15 Indentační křivka (a), s časovým diagramem indentační zkoušky (b) [9] .....	35
Obr. 16 Vyjádření vtiskového tečení [10] .....	37
Obr. 17 Indentační křivka – deformační práce [10] .....	38
Obr. 18 Porovnání odezvy materiálu na jednoosé a víceosé namáhání [8] .....	39
Obr. 19 Připravené vzorky po zalisování a vyleštění .....	43
Obr. 20 Stroj na leštění vzorků Eco-Met 250 PRO .....	44
Obr. 21 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000 .....	45
Obr. 22 Přístroj MICRO-COMBI TESTER od firmy CSM .....	46
Obr. 23 Hodnoty H <sub>IT</sub> pro zatížení 0,5 N .....	47
Obr. 24 Hodnoty H <sub>IT</sub> pro zatížení 1 N .....	48
Obr. 25 Hodnoty H <sub>IT</sub> pro zatížení 5 N .....	49
Obr. 26 Hodnoty E <sub>IT</sub> pro zatížení 0,5 N .....	50
Obr. 27 Hodnoty E <sub>IT</sub> pro zatížení 1 N .....	50
Obr. 28 Hodnoty E <sub>IT</sub> pro zatížení 5 N .....	51
Obr. 29 Hodnoty C <sub>IT</sub> pro zatížení 0,5 N .....	52
Obr. 30 Hodnoty C <sub>IT</sub> pro zatížení 1 N .....	53
Obr. 31 Hodnoty C <sub>IT</sub> pro zatížení 5 N .....	54

---

Obr. 32 Hodnoty $HV_{IT}$ pro zatížení 0,5 N.....	55
Obr. 33 Hodnoty $HV_{IT}$ pro zatížení 1 N .....	56
Obr. 34 Hodnoty $HV_{IT}$ pro zatížení 5 N .....	56
Obr. 35 Hodnoty $W_{ELAST}$ , $W_{PLAST}$ pro zatížení 0,5 N .....	57
Obr. 36 Hodnoty $n_{IT}$ pro zatížení 0,5 N .....	58
Obr. 37 Hodnoty $W_{ELAST}$ , $W_{PLAST}$ pro zatížení 1 N.....	59
Obr. 38 Hodnoty $n_{IT}$ pro zatížení 1 N .....	59
Obr. 39 Hodnoty $W_{ELAST}$ , $W_{PLAST}$ pro zatížení 5 N.....	60
Obr. 40 Hodnot $n_{IT}$ pro zatížení 5 N .....	61

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I.:            CD        BP - Jaroslav Zapletal