

# Mikrotvrdost kovových materiálů

Bc. Pavla Auffahrtová

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavla Auffahrtová**  
Osobní číslo: **T11800**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Měření mikrotvrdosti kovových materiálů**

Zásady pro vypracování:

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

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Ovsík**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

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



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

Příjmení a jméno: Aulfahrtová Pavla

Obor: Řízení jakosti

## 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 29. dubna 2013



<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 nahlížení 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 vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</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 užit 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 výdělku 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 přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Náplní této diplomové práce je výzkum vlivu tepelného zpracování různých druhů kovových materiálů na mikromechanické vlastnosti (mikrotvrdość).

V teoretické části je vypracována řešerše na dané téma. Udává základní informace o ocelích, tepelném zpracování a tvrdosti.

Praktická část popisuje použitá zařízení, graficky zpracované a následně vyhodnocené hodnoty.

Klíčová slova: rozdělení ocelí, tepelné zpracování, Vickers, tvrdost, mikrotvrdość, nanotvrdość.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is to research the effects of heat treatment of various kinds of metal materials for micro-mechanical properties (microhardness).

The theoretical part of information retrieval on the topic. Gives basic information about steel, heat treatment and hardness.

The practical part describes the use of equipment, graphic design and subsequently evaluated values.

Keywords: classification of steels, heat treatment, Vickers, hardness, mikrohardness, nano-hardness

Na tomto místě chci poděkovat svému vedoucímu Ing. Martinu Ovsíkovi za ochotu, odborné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce. Zvláštní poděkování patří mé mamince Ludmile Auffahrtové za pomoc s hlídáním mého syna Tonicíka.

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 OCEL.....</b>	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ OCELI .....	12
1.1.1 Nelegované oceli .....	12
1.1.2 Legované oceli .....	13
1.2 OZNAČOVÁNÍ OCELI .....	13
1.2.1 Ocel třídy 10.....	14
1.2.2 Ocel třídy 11.....	14
1.2.3 Ocel třídy 12 – 16.....	14
1.2.4 Ocel třídy 17.....	14
1.2.5 Ocel třídy 19.....	14
1.2.6 Význam doplňkových čísel .....	14
<b>2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>15</b>
2.1 ŽÍHÁNÍ.....	16
2.1.1 Žíhání bez překrytalizace .....	16
2.1.2 Žíhání s překrytalizací.....	17
2.2 KALENÍ.....	18
2.2.1 Způsoby kalení .....	18
2.3 POPOUŠTĚNÍ.....	21
2.4 CHEMICKO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	22
2.4.1 Cementování .....	23
2.4.2 Nitridování .....	23
2.4.3 Boridování.....	24
2.4.4 Alitování .....	24
2.4.5 Inchromování .....	24
2.4.6 Šeradování.....	24
2.5 TEPELNĚ MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....	24
2.5.1 Vysokoteplotní tepelné zpracování (VTMZ) .....	25
2.5.2 Nízkoteplotní tepelné zpracování (NTMZ).....	25
<b>3 TVRDOST .....</b>	<b>26</b>
3.1 MIKROTVRDOST.....	28
3.2 MIKROTVRDOST DLE VICKERSE.....	28
3.2.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	28
3.2.2 Podstata zkoušky .....	29
3.2.3 Zkušební těleso.....	30
3.2.4 Provedení zkoušky.....	30
3.3 MIKROTVRDOST DLE KNOOPA .....	31
3.3.1 Zkouška tvrdosti dle Knoopu .....	31
3.3.2 Podstata zkoušky .....	31
3.3.3 Zkušební těleso.....	32
3.3.4 Provedení zkoušky .....	32



3.4	MIKROTVRDOST DLE BERKOVIČE .....	33
3.5	MIKROTVRDOST DLE MEINCKA A ATTINGERA .....	33
3.6	MIKROTVRDOST DLE HANEMANNA .....	34
3.7	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI NA DVOJKUŽELY .....	34
<b>4</b>	<b>INSTRUMENTOVANÁ VNIKAJÍCÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI .....</b>	<b>36</b>
4.1	STANOVENÍ VTISKOVÉ TVRDOSTI $H_{IT}$ .....	36
4.2	STANOVENÍ VTISKOVÉHO MODULU $E_{IT}$ .....	37
4.3	STANOVENÍ VTISKOVÉHO TEČENÍ $C_{IT}$ .....	37
4.4	STANOVENÍ PLASTICKÉ A PRUŽNÉ ČÁSTI PRÁCE VNIKAJÍCÍHO PROCESU .....	37
4.5	INDENTAČNÍ KŘIVKY .....	38
<b>5</b>	<b>NANOTVRDOST .....</b>	<b>41</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
6.1	POUŽITÉ MATERIÁLY .....	43
6.2	PŘÍPRAVA MATERIÁLU .....	43
6.3	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ .....	44
6.4	CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO MATERIÁLU PRO ZKUŠEBNÍ VZORKY .....	45
6.4.1	Ocel 11600 .....	45
6.4.2	Ocel 12050 .....	46
6.4.3	Ocel 14220 .....	46
6.4.4	Ocel 15230 .....	46
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>47</b>
7.1	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ PRO MATERIÁL 11600 .....	47
7.2	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ PRO MATERIÁL 12050 .....	52
7.3	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ PRO MATERIÁL 14220 .....	57
7.4	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ PRO MATERIÁL 15230 .....	62
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>68</b>
8.1	VTISKOVÁ TVRDOST $H_{IT}$ (MPa) PŘI ZATÍŽENÍ 1N .....	68
8.2	VTISKOVÝ MODUL $E_{IT}$ (GPa) PŘI ZATÍŽENÍ 1N .....	69
8.3	VTISKOVÁ TEČENÍ – CREEP (%) PŘI ZATÍŽENÍ 1N .....	70
8.4	VICKERSOVA TVRDOST (HV) PŘI ZATÍŽENÍ 1N .....	71
8.5	ELASTICKÁ DEFORMAČNÍ PRÁCE (MM) PŘI ZATÍŽENÍ 1N .....	72
8.6	PLASTICKÁ DEFORMAČNÍ PRÁCE (MM) PŘI ZATÍŽENÍ 1N .....	73
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>79</b>

## ÚVOD

Tvrдость a pevnost jsou jedny z nejdůležitějších mechanických vlastností konstrukčních materiálů užívaných ve strojírenství. Tvrдость má významný vliv na odolnost materiálu proti opotřebení a otěru. Tvrдость je důležitá i u materiálů řezných nástrojů. Materiál řezného nástroje, který by byl měkčí než obráněná součást by se nemohl účinně obrábět. Tvrдость kovových technických materiálů lze ovlivnit tepelným, případně chemicko – tepelným zpracováním. Nevýhodou velmi tvrdého materiálu je křehkost.

Různé metody měření tvrdosti využívají různých přístupů. Například u Brinellovy zkoušky má výsledná hodnota tvrdosti charakter napětí a je závislá na velikosti působící síly. Jiné metody využívají částečnou přeměnu kinetické energie na elastickou deformaci. Množství nespotebované energie je pak mírou tvrdosti zkoušeného materiálu.

Zkoušky tvrdosti se řadí mezi zkušky nedustruktivní, byť při nich zpravidla vzniká lokální trvalá deformace (vryp, vtisk). Tvrдость není fyzikálně definovaná, neboť je závislá na velkém množství faktorů.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 OCEL

### 1.1 Rozdělení ocelí

Podle evropské normy ČSN EN 10020 (42 0002) je ocel slitinou železa s obsahem uhlíku nižším než 2 %, která obsahuje další prvky, při čemž hmotnostní podíl železa ve slitině je větší než obsah kteréhokoliv jiného prvku. [1]

Oceli se podle chemického složení dělí na legované a nelegované, kde obsah žádného prvku nepřekročí mezní obsah prvků uvedený v tabulce. [2]

Tab. 1 Mezní hodnota prvků

Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	Lantanidy	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb
0,30	0,0008	0,10	0,10	0,30	0,40	0,10	1,65	0,08	0,06	0,30	0,40

Tab. 2 Mezní hodnota prvků

Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Ostatní kromě C, P, S, N (každý)
0,10	0,60	0,10	0,05	0,10	0,30	0,05	0,10

#### 1.1.1 Nelegované oceli

Jsou ty, u nichž obsah žádaného prvku nepřekročí mezní hodnotu. U vícevrstvých (plátovaných) výrobků rozhoduje chemické složení základního materiálu.

Dělí se na:

- nelegované jakostní – jsou pro ně stanoveny určité požadavky, jako jsou houževnatost, velikost zrna nebo tvárnost. Nejsou určeny pro tepelná zpracování.
- nelegované ušlechtilé – mají vyšší stupeň čistoty, především méně nekovových vměstsků, jsou určeny především pro tepelná zpracování.

### 1.1.2 Legované oceli

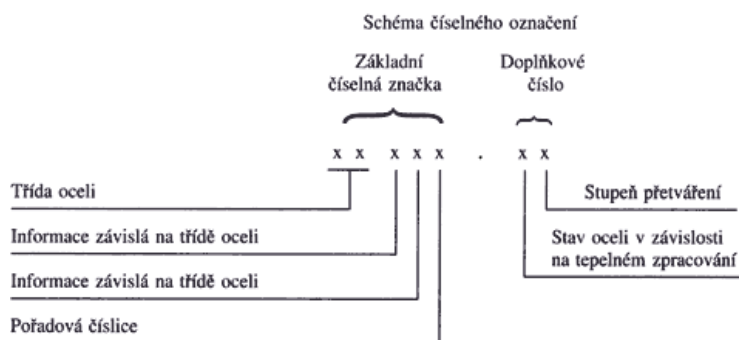
Jsou ty, u nichž alespoň jeden prvek překročí mezní hodnotu, při čemž neodpovídají definici pro korozivdorné oceli.

Dělí se na:

- legované jakostní oceli – jsou pro ně stanoveny určité požadavky, jako jsou houževnatost, velikost zrna nebo tvařitelnost. Nejsou určeny pro tepelná zpracování. Patří sem:
  - svařitelné jemnozrné konstrukční oceli
  - legované oceli na kolejnice, štetovnice a důlní výztuže
  - legované oceli pro plochy výrobky pro náročné použití válcované za tepla nebo za studena obsahující prvky zjemňující zrna, jako jsou B, Ni, Ti, V, Zr a dvoufázové feriticko-martenzitické oceli
  - oceli legované pouze Cu
  - oceli pro elektrotechniku legované zejména Si a Al
- legované ušlechtilé oceli – jsou ostatní oceli neuvedené v legovaných jakostních. Zahrnují legované konstrukční oceli, oceli pro valivá ložiska, nástrojové oceli, rychlořezné oceli a oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi [1]

## 1.2 Označování oceli

Oceli jsou podle ČSN označovány číselně i barevně. Číselné označení oceli k tváření se skládá z pětimístné základní číselné značky a zpravidla ještě dvou doplňkových číslic. První číslice základní číselné značky je 1. vyjadřuje, že jde o ocel tvářenou, druhá ve spojení s první číslicí značí jakostní třídu oceli, která charakterizuje druh oceli a její základní vlastnosti. [4]



Obr. 1 Schéma číselného označení

### 1.2.1 Ocel třídy 10

Dvojcíslicí dané třetí a čtvrtou číslicí v číselné značce oceli vyjadřuje u konstrukčních ocelí nejmenší pevnost v tahu v 10 MPa.

### 1.2.2 Ocel třídy 11

Dvojcíslicí dané třetí a čtvrtou číslicí v číselné značce oceli vyjadřuje u konstrukčních ocelí nejmenší pevnost v tahu v 10 MPa s výjimkou automatových ocelí, kde třetí číslice – 1 – označuje ocel obzvláště vhodnou k obrábění a čtvrtá číslice charakterizuje střední obsah uhlíku v desetinách procenta, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Je-li střední obsah uhlíku, menší než 0,1 %, používá se číslice 0.

### 1.2.3 Ocel třídy 12 – 16

U ocelí třídy 12 je třetí číslice v číselné značce oceli většinou 0. U ocelí tříd 13 až 16 vyjadřuje třetí číslice součet středních obsahů legovacích prvků v procentech, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Čtvrtá číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku v desetinách procenta se zaokrouhlením setin od 3 na vyšší desetinné číslo.

### 1.2.4 Ocel třídy 17

Třetí číslice v základní číselné značce oceli třídy 17 vyjadřuje typ legování oceli jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků. Čtvrtá číslice v základní značce oceli třídy 17 vyjadřuje obsah hlavních legovacích prvků Cr, Mn a Ni v jednotlivých druzích podle typů legování.

### 1.2.5 Ocel třídy 19

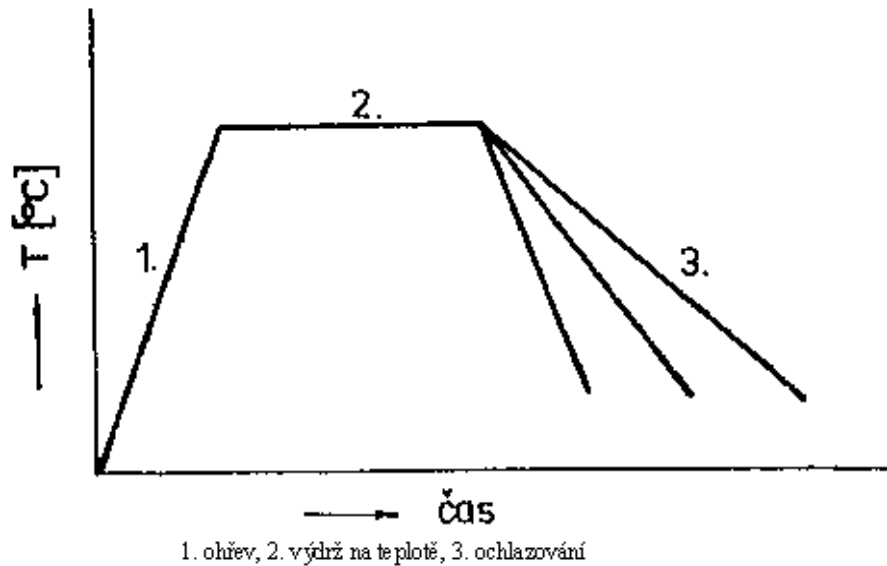
Třetí číslice v základní značce oceli třídy 19 vyjadřuje jednak nelegované oceli, jednak typ legování oceli jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků. Čtvrtá číslice v základní číselné značce legovaných ocelí třídy 19 má význam pořadový.  
[3]

### 1.2.6 Význam doplňkových číslic

Doplňkové číslice jsou odděleny od základní číselné značky tečkou. První doplňková číslice vyjadřuje druh tepelného zpracování, druhá doplňková číslice stupeň přetváření.

## 2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelným zpracováním se rozumějí pochody, při nichž se předmět nebo materiál v tuhém stavu zahřívá a různě rychle ochlazuje, tím se mění jeho struktura, a tak se získávají požadované vlastnosti.[4]



Obr. 2 Schematické znázornění cyklu tepelného zpracování

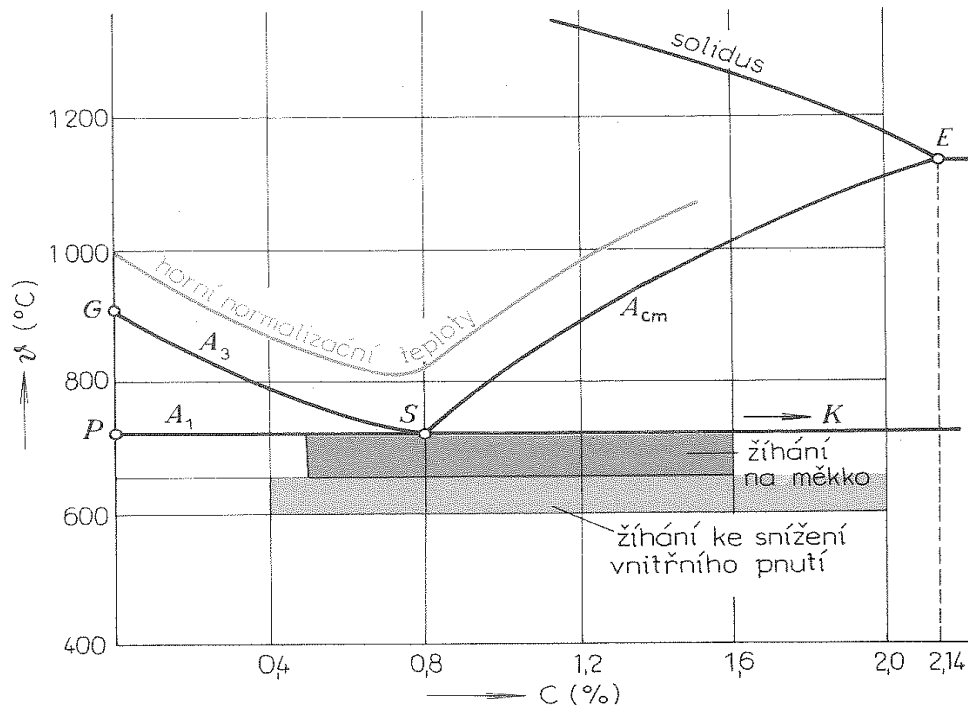
Podle výšky teploty, na kterou zpracovaný materiál zahřejeme a podle rychlosti ochlazení (u chemicko tepelného zpracování taktéž za použití vhodného difuzního síťování kovů nebo nekovů) rozeznáváme tyto způsoby tepelného zpracování:

- žihání
- kalení
- popouštění
- chemicko tepelné zpracování
- tepelné mechanické zpracování

Tepelné zpracování se volí dle požadovaných vlastností materiálu. [5]

## 2.1 Žihání

Je v podstatě pomalý ohřev na teplotu žihání, setrvání po určitou dobu na této teplotě a pomalé ochlazení. [4]



Obr. 3 Žihací teploty uhlíkových ocelí

### 2.1.1 Žihání bez překrystalizace

Při žihání bez překrystalizace se fázové oceli nemění, dochází pouze ke změnám ve struktuře (změna morfologie částic, rekystalizace a růst zrna, zotavení). Horní hranicí teplotní oblasti je kritická teplota  $A_1$ .

- a) Žihání ke snížení pnutí – provádí se po svařování, po rychlém a nestejném ochlazení předmětů složitějších tvarů a větších průřezů, po místním ohřevu při tváření za tepla, po tváření za tepla ukončením za teplot blízkých rekystalizačním, po některých způsobech obrábění apod. Žihací teploty leží v rozmezí 600 – 650 °C, výdrž na teplotě je několik hodin. Ochladuje se pomalu do teploty asi 200 °C v peci, aby se zabránilo vzniku nových pnutí. Pak následuje dochlazení na vzduchu.
- b) Žihání rekystalizační – slouží k odstranění zpevnění po tváření za studena a obnovení tvárnosti materiálu. Používá se především jako mezioperační žihání při tváření ocelí za studena. Žihací teploty leží v rozmezí 550 – 700 °C, doba setrvání na teplotě



tě bývá obvykle 1 – 5 hodin. Podmínky zpracování určitého druhu materiálu se řídí jeho chemickým složením, stupněm tváření a požadovanými vlastnostmi.

- c) Žihání na měkko – se provádí ke zlepšení obrobiteľnosti a snížení tvrdosti. Při ohřevu v blízkosti teploty  $A_1$  dochází ke změně morfologie perlity, kdy se lamelární perlit mění v lépe obrobiteľný perlit globulární. Podmínky žihání se opět řídí chemickým složením oceli – uhlíkové a nízkolegované konstrukční oceli se žihají při teplotách 680 – 720 °C asi 4 hodiny, pak následuje pomalé ochlazování v peci. U nadeutektoidních ocelí se ohřev provádí nad teplotu přeměny, ochlazuje se velmi pomalu na teplotu 600 °C a pak se dochladí na vzduchu.
- d) Žihání protivločkové – odstraňuje škodlivý vliv vodíku u některých slitinových ocelí. Protože s klesající teplotou rozpustnost vodíku v oceli klesá, provádí se protivločkové žihání v teplotní oblasti existence fáze  $\alpha$ , nejčastěji při 650 °C. Doba žihání je velmi dlouhá a řídí se velikostí průřezu polotovaru. Až do 200 °C musí být doba ochlazování co nejpomalejší.

### 2.1.2 Žihání s překrystalizací

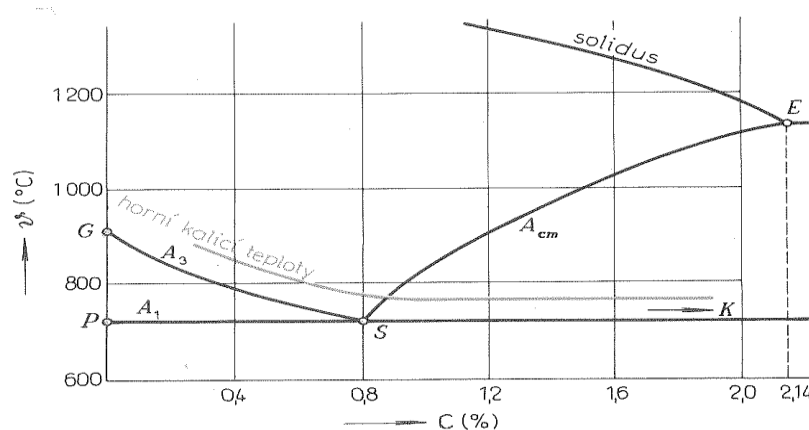
Překrystalizační žihání se provádí ohřevem nad teploty fázových přeměn, pokud je žihací teplota oceli o jiném než eutektoidním složení nižší než  $A_3$ , resp.  $A_1$ , dochází k částečné přeměně austenitu. Žihání s překrystalizací umožňuje odstranit strukturální nepravidelnosti, které jsou důsledkem předcházejících technologických operací. Správnou volbou ochlazovacích podmínek v oblasti perlitické přeměny lze získat požadovanou strukturu. Hrubší, tvárnější a měkčí struktury vznikají rozpadem austenitu při menší rychlosti ochlazování, zatímco vyšší ochlazovací rychlost má za následek vznik jemnější struktury s vyšší pevností a tvrdostí. Důležité je přitom sledovat další ochlazování pod teplotou perlitické přeměny, aby nedošlo ke vzniku tepelných vnitřních pnutí. Je proto třeba ochlazovat pomalu až do teplot 400 – 200 °C jako při žihání na odstranění vnitřních pnutí.

- a) normalizační žihání – lze provádět za základní druh překrystalizační žihání. Ohřev se provádí 30 – 50 °C nad teplotou  $A_3$ , resp.  $A_{cm}$ . Ochlazuje se na vzduchu, u velkých dílů v olejové lázni. Výdrž na teplotě se řídí tloušťkou stěny. Normalizačním žiháním se získá stejnoměrná struktura u výkovků a svařovaných polotovarů, také u odlitků z uhlíkových ocelí představují základní tepelné zpracování, neboť odstraňuje hrubou lici strukturu a snižuje chemickou heterogenitu.

- b) homogenizační žíhání – provádí se především u ingotů z uhlíkových i slitinových ocelí před tvářením za tepla nebo dalším tepelným zpracováním. Je určeno k vyrovnání rozdílů v chemickém složení, které vzniká při tuhnutí. Chemická heterogenita se snižuje při difúzních procesech, které probíhají tím účinněji, čím vyšší je teplota. Proto se žíhací teploty volí obvykle v rozmezí 1100 až 1250 °C. Výdrž na teplotě bývá podle velikosti polotovaru a druhu oceli 5 až 15 hodin, někdy i desítky hodin.
- c) izotermické žíhání – spočívá v rychlém ochlazení austenitizované oceli na teplotu izotermického rozpadu austenitu v oblasti perlitické přeměny a ochlazování na vzduchu po ukončení přeměny. Jeho použití je podmíněno znalostí IRA diagramu příslušné oceli. Účelem izotermického žíhání je snížení pevnosti a zlepšení obrobitelnosti zejména u legovaných ocelí. [6]

## 2.2 Kalení

Spočívá v pomalém a stejnosměrném ohřátí oceli na teplotu kalení a v rychlém ochlazení. Cílem je dosáhnout zvýšení tvrdosti oceli. U uhlíkových ocelí jsou teploty kalení o 30 – 50 °C vyšší než teploty dané v rovnovážném diagramu čarou GSK, u slitinových ocelí jsou ještě vyšší až 1320 °C. [4]



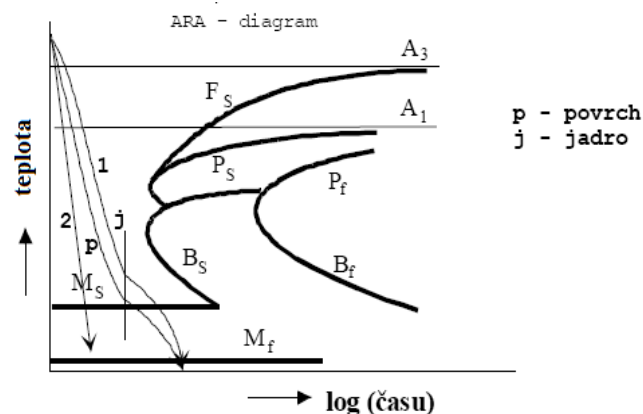
Obr. 4 Kalicí teploty uhlíkových ocelí

### 2.2.1 Způsoby kalení

U martenzitického i bainitického kalení se k dosažení požadované struktury užívá jak nepřetržitého ochlazování, tak i různých dalších způsobů s přerušením ochlazování, které má snížit úroveň vnitřního pnutí a omezit nebezpečí deformace kaleného předmětu. Při plynu-

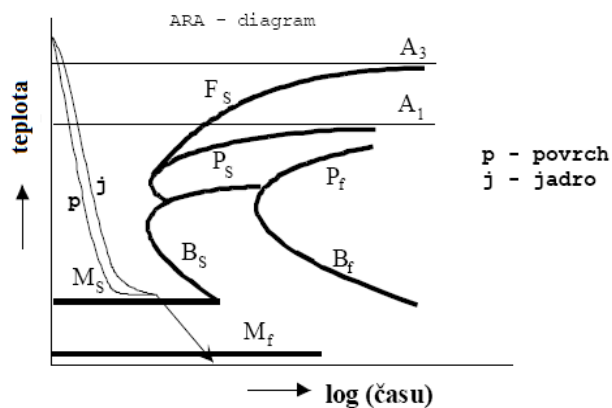
lém ochlazování se kalí do lázně studené (lázeň s pokojovou teplotou), při přerušovaném ochlazování se používá buď dvou prostředí s rozdílnou ochlazovací schopností o pokojové teplotě, nebo teplé lázně.

- a) martenzické kalení do studené lázně – je nejjednodušším a dosud nejčastěji používaným způsobem kalení. Zakalené předměty se dále popouštějí. Uhlíkové oceli se kalí obvykle do vody, nízkolegované a středně legované oceli většinou do oleje. K tomuto způsobu kalení patří i kalení vzduchem, používané u samokalitelných ocelí. Značný rozdíl teplot mezi kaleným předmětem a lázní spolu s objemovými změnami, vyvolanými fázovými přeměnami, vedou zejména po kalení do vody ke vzniku velkých vnitřních pnutí. Tomu je možno zabránit přerušovaným ochlazování u přerušovaného (lomeného) kalení nebo kalení termálního.
- b) přerušované (lomené) kalení – součást se intenzivně ochlazuje ve vodě až na teplotu  $M_s$ , tak, aby se potlačila perlitická přeměna. Pak pokračuje ochlazování v olejové lázni, kde proběhne martenzická přeměna. Podobný postup kalení představují kombinace chladicích prostředí voda – vzduch nebo olej – vzduch. U přerušovaného kalení je velmi důležité správné určení okamžiku pro přenesení součásti do dalšího kalicího prostředí. Přerušované kalení je nutné u některých rozměrnějších a tvarově složitějších součástí, které vyžadují vyšší rychlost ochlazování v oblasti perlitické přeměny, avšak při úplném ochlazení ve vodě nebo oleji praskají.



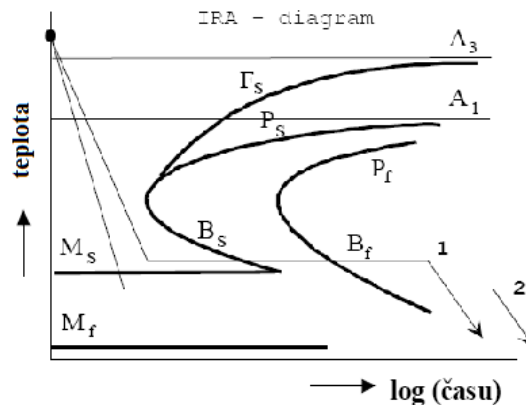
Obr. 5 Lomené kalení (křivka 1) a spojitě martenzické kalení (křivka 2)

- c) termální kalení – součást se ochlazuje v lázni, která leží obvykle těsně nad teplotou  $M_s$  kalené oceli. Následuje prodleva na teplotě, která nemá být delší než inkubační doba vzniku bainitu. Během prodlevy se vyrovná teplota v celém průřezu a při následujícím ochlazení (obvykle na vzduchu) proběhne martenzitická přeměna. Vnitřní pnutí je značně menší než u přímého kalení do studené lázně. I po tomto způsobu kalení se však předměty popouštějí. Termální kalení je vhodné u výroků z ocelí legovaných (zpravidla nástrojových) nebo u menších tenkostěnných a tvarově složitých výrobků z ocelí uhlíkových nebo nízkolegovaných.



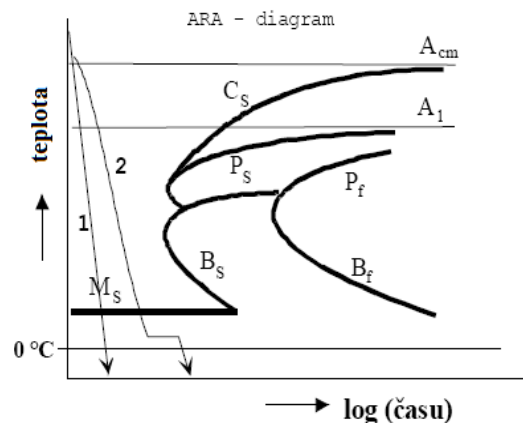
Obr. 6 Termální kalení

- d) izotermické zušlechťování – po austenitu se přenese součást rychle do solné příp. kovové lázně o teplotě v oblasti bainitické přeměny (300 až 400 °C). Tam proběhne izotermický rozpad austenitu na bainit. Následující dochlazení probíhá na vzduchu. Při tomto způsobu zpracování se tepelná pnutí vyrovnávají v teplé lázni ještě před začátkem přeměny, také strukturální pnutí při vzniku bainitu jsou malé. Protože nehrozí nebezpečí deformací a vzniku trhlin, není třeba dále součást popouštět.
- e) izotermické kalení – je postup, kdy teplota lázně leží pod teplotou  $M_s$  příslušné oceli. Výsledná struktura je pak tvořena směsí bainitum martenzitu a zbytkového austenitu. Takovou strukturu lze získat u ocelí s vhodným tvarem IRA diagramu také při plynulém ochlazení. Směsné struktury s podílem martenzitu se obvykle popouštějí.



Obr. 7 Izotermické bainitické zušlechťování

- f) kalení se zmrazováním – je způsob, kdy je martenziticky zakalený předmět přenesen co nejrychleji do popředí s teplotou pod bodem mrazu. Zmenší se tak podíl zbytkového austenitu ve struktuře (zvýší se množství martenzitu). Aby nedošlo ke stabilizaci zbytkového austenitu, musí zmrazování následovat ihned po zakalení. Tento postup je používán u výrobků, u nichž se klade důraz na rozměrovou stabilitu (měřidla, nástroje aj.) [6]

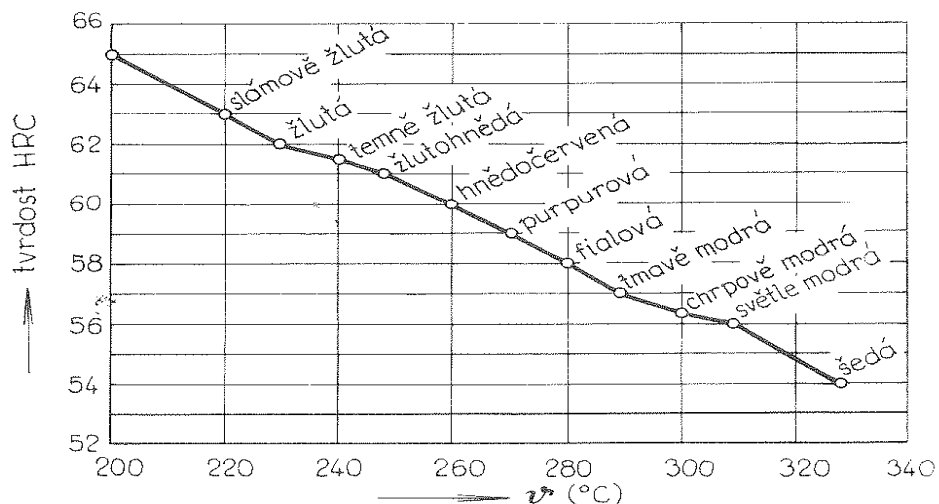


Obr. 8 Kalení se zmrazováním

### 2.3 Popouštění

Zmírňuje se nežádoucí křehkost a vnitřní pnutí zakalených předmětů a do jisté míry se zvyšuje jejich houževnatost, ovšem na úkor tvrdosti. Zakalený předmět se ohřeje na popouštěcí teplotu a ochladí se. Podle její výše (200 až 300 °C) se změní martenzit v méně

tvrdou strukturu (bainit). Popouštění následuje hned po zakalení. Kalený předmět se nechá zcela vychladnout, znovu se ohřeje na popouštěcí teplotu a ochladí se ve vodě (popouštění vnějším teplem). Může se avšak postupovat také tak, že se předmět vyjme z ochlazovací lázně před jeho úplným ochlazením, vyčká se, až teplo zevnitř prohřeje povrch a předmět se znovu ponoří do ochlazovací lázně, jakmile jeho očištěný povrch získá příslušnou popouštěcí barvu (popouštění vnitřním teplem). Popouštěcí teploty a jim odpovídající barvy jsou na obr. 5, na němž je vidět i závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě. Po zakalení se popouštějí všechny nástroje, které jsou při práci namáhány rázy (sekáče, dláta aj.) nebo které mají jemné břity a snadno by se při práci vylamovaly. Nástroje ze slitinových ocelí se popouštějí při vyšších teplotách (300 až 600 °C). [4]



Obr. 9 Diagram závislosti na tvrdosti na popouštěcí teplotě

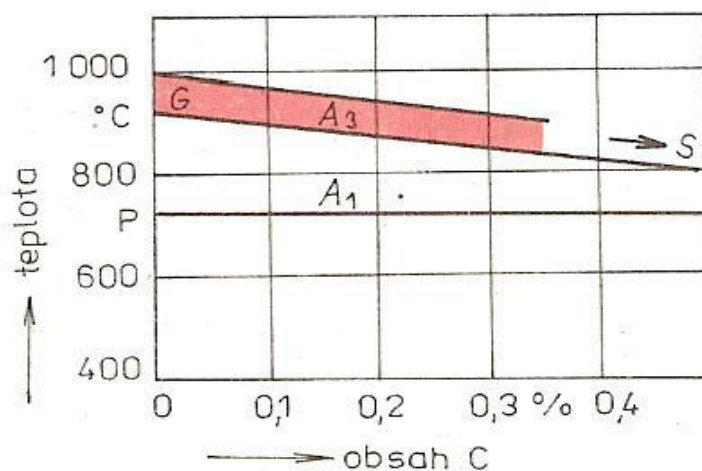
## 2.4 Chemicko tepelné zpracování

Chemicko tepelné zpracování oceli je kombinací změn chemického složení povrchových vrstev ocelové součásti a tepelného zpracování. Každé chemicko tepelné zpracování se staví ze čtyř základních pochodů. Adsorbce je uchycení molekul chemických látek na kovovém povrchu. Disociace je rozpad molekul látky, která je nosným médiem, vnikajícím do povrchu mřížky. Tak např. rozpad  $\text{CH}_4$  vznikají 2 molekuly vodíku a 1 molekula uhlíku, o němž říkáme, že je ve stavu zrodu. Absorbce je pohlcení atomů mřížkou kovu. Difuze je pak přenos atomů látky z povrchu dovnitř kovové mřížky. Protože je teplota závislá, che-

micko tepelné zpracování se uskutečňuje za vyšších teplot. Mezi popsanými pochody není možno vždy položit ostrou hranici. Celý přenos chemicko tepelného zpracování ovlivňuje rozhodujícím způsobem rychlost růstu difusní vrstvy. Struktura obohacené vrstvy oceli difundujícím prvkem souvisí s příslušným stavovým diagramem železo – difundující prvek. [7]

#### 2.4.1 Cementování

Je jedním z nejpoužívanějších způsobů chemicko tepelného zpracování. Při něm se povrch předmětu z měkké oceli (s obsahem uhlíku max. 0,3 %) nasycuje uhlíkem v plynném, kapalném nebo pevném prostředí při teplotách 800 – 950 °C na obsah 0,7 – 0,9 % uhlíku. Zakalením této vrstvy se dosáhne velké tvrdosti, přičemž se zachová houževnaté jádro. Nauhličená vrstva bývá 0,5 – 1,5 mm tlustá. Zastaralý způsob cementování v pevném prostředí je pomalejší než cementování v plynném prostředí nebo v cementační lázni.

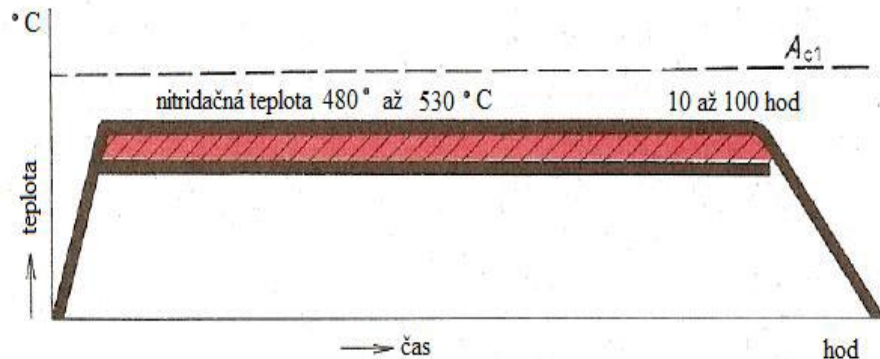


Obr. 10 Část rovnovážného diagramu Fe – Fe<sub>3</sub>C s vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot

#### 2.4.2 Nitridování

Je nasycování povrchu slitinové oceli dusíkem při teplotě 480 – 550 °C, aby se získal tvrdý povrch. Předměty určené k nitridování se vkládají do vzduchotěsné uzavřené elektrické pece, do níž se přivádí plynný amoniak (NH<sub>3</sub>), který se při styku s horkým kovem rozkládá na vodík a dusík. Dusík pak vniká do povrchu oceli a tvoří se slitinovými prvky (hlavně s Al a Cr) nitridy, které dávají oceli velkou povrchovou tvrdost. Výhodou nitridování je

nízká teplota a také to, že nitridované předměty se již nekalí, takže nenastává vnitřní pnutí a deformace. [4]



Obr. 11 Průběh času a teplot při nitridování

### 2.4.3 Boridování

Sycení povrchu oceli borem. Teploty 900 – 1050 °C. Pro zvýšení trvanlivosti nástrojů. Potom už nekalíme. [5]

### 2.4.4 Alitování

Sycení povrchu oceli hliníkem, aby získala odolnost proti oxidaci za vysokých teplot.

### 2.4.5 Inchromování

Sycení povrchu oceli chromem, k získání odolnosti zejména proti účinkům slané vody.

### 2.4.6 Šeradování

Sycení povrchu oceli zinkem k získání odolnosti proti škodlivým vlivům atmosféry. [4]

## 2.5 Tepelně mechanické zpracování

Při tepelně mechanickém zpracování se využívá kombinace tváření a tepelného zpracování. Společným účinkem zpěvnění a probíhajících fázových přeměn se dosahuje vysoké pevnosti, kterou nelze jiným způsobem tepelného zpracování získat. V praxi se nejvíce užívá postupů, kdy plastická deformace probíhá v oblasti stabilního nebo metastabilního sutenity a po deformaci následuje martenzitická přeměna (obr. 6). Tvářením austenitu se zjemní jeho zrno, takže i vznikající martenzit bude velmi jemný. Vlivem tváření dojde zá-



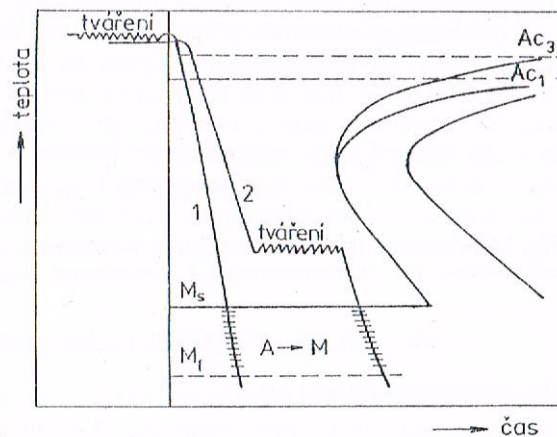
rovenž ke zvýšení hustoty dislokací, které se v martenzitu podílejí na zvýšení pevnostních hodnot. Příspěvkem martenzitické přeměny je pak dislokační a intersticiální zpevnění. Další zpevňující účinek pak představuje precipitační zpevnění jemnými částicemi karbidu při následujícím nízkoteplotním popouštění.

### 2.5.1 Vysokoteplotní tepelné zpracování (VTMZ)

Ocel se tváří v oblasti stabilního austenitu nad teplotou  $A_{c3}$  při 40 – 90 % stupni deformace. Aby nedošlo k rekrytalizaci plasticky deformovaného austenitu, musí bezprostředně následovat kalení. Dosažené vlastnosti po vysokoteplotním tepelném zpracování závisí na složení oceli, teplotě a stupni deformace a na době mezi ukončením deformace a kalení.

### 2.5.2 Nízkoteplotní tepelné zpracování (NTMZ)

Spočívá v austenitizaci za teploty nad  $A_{c3}$ , ochlazení do oblasti metastabilního austenitu nad  $M_s$  (obvykle 500 – 600 °C), tváření v inkubační době a následujícím zakalení. Stupeň deformace je přitom kolem 50 %. V tomto případě probíhá tváření austenitu pod rekrytalizační teplotou (austenitická zrna zůstávají deformována) a přetvárný odpor je proto ve srovnání s deformací při vysokoteplotním tepelném zpracování vyšší. [6]



Obr. 12 Schema průběhu tepelně mechanického zpracování 1 – VTMZ, 2 - NTMZ

### 3 TVRDOST

Patří mezi významné mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů a je velmi často využívána v technické praxi. Hlavní předností zkoušek tvrdosti je jejich relativní jednoduchost, opakovatelnost a dále také skutečnost, že v mnoha případech lze měření provádět buď přímo na výrobku a jeho polotovaru nebo na zkušebních tělesech vyrobených a určených pro jiné druhy mechanických zkoušek. [5]

Tvrдость je definována jako odolnost materiálu vůči vnikání jiného pevného tělesa. Je to vlastnost materiálu, která udává jeho schopnost vzdorovat trvalé plastické deformaci. Tedy vtiková tvrdost je definována jako odpor, vyvolaný materiálem, který klade proti vytvoření vtisku. Tvrдость poté posuzujeme z velikosti trvalé deformace (vtisku), kterou vtlačené cizí těleso v povrchu zkoušeného vzorku vyvolá. Vnikající těleso přitom nesmí podléhat plastickým deformacím a musí proto vykazovat vysokou tvrdost, Youngův model a mez pevnosti a proto se nejčastěji jako materiál indentoru volí diamant. Vzhledem ke skutečnosti, že při měření tvrdosti dochází k více osému namáhání měřeného vzorku, jsou výsledné hodnoty tvrdosti ovlivněny celou řadou faktorů a výsledná tvrdost je tak ovlivněna komplexem mechanických a fyzikálních vlastností, například záleží na:

- elatických vlastnostech měřeného materiálu, zejména na modulu pružnosti v tahu a ve smyku,
- plastických vlastnostech zkoušeného materiálu, zejména na mezi kluzu a míře deformačního zpevnění zkoumaného materiálu,
- velikosti zátěžné síly a rychlosti, kterou indentor vniká do měřeného vzorku.

Tvrдость stejného kovu může mít různou tvrdost v závislosti na:

- velikosti zrna (jemnozrné materiály vykazující vyšší hodnoty tvrdosti v důsledku vyššího odporu hranic zrn vůči vtlačovanému indentoru,
- teplotě (v důsledku vyšší teploty se vlivem roztažnosti stavají vazby mezi atomy méně pevné),
- množství cizích příměsí (veškeré příměsí, zejména heterogenní, snižují schopnost materiálu se plasticky deformovat a zvyšují tak tvrdost),
- úrovni vnitřního pnutí (způsobené např. tvářením za studena, nerovnoměrným ohlazením součástí atd. zvyšují tvrdost).

Z výše jmenovaných důvodů vyplývá, že není možné tvrdost charakterizovat jako jednoznačně definovanou fyzikální veličinu. Lze tedy říci, že výsledná hodnota tvrdosti je ovlivněna nejen souhrnem základních fyzikálních veličin, ale i materiálovými vlastnostmi měřeného vzorku.

Zkoušky tvrdosti lze rozdělit několika způsoby. Podle použité síly na indenter (vtlačované těleso) a podle odezvy materiálu na působící sílu, dostáváme tři skupiny vtiskových zkoušek:

- 1) staticko – plastické – Brinell, Vickers, Rockwell,
- 2) dynamicko – plastické – Poldi kladívko, Baumanovo kladívko,
- 3) dynamicko – elastické – Shoreho skleroskop, duroskop.

Staticko – plastické zkoušky jsou v současné době nerozšířenější zkoušky hlavně v oblasti laboratorního výzkumu. V takových zkouškách je tvrdý hrot, nejčastěji vyrobený z diamantu, tlačěn do zkoumaného vzorku známou silou. Další dvě skupiny zkoušek dynamicko – plastické/elastické jsou s výhodou používány zejména ve výrobě jako kontrolní zkoušky, potvrzují správnost požadované kvality, kladené na součástku. Podle normy ISO 14577 jsou statistické zkoušky tvrdosti rozděleny dle velikosti síly, působící na indenter během indentace do tří skupin:

- 1) Zkoušky makrotvrdosti –  $2 \text{ N} < F < 30 \text{ kN}$ ,
- 2) Zkoušky mikrotvrdosti –  $2 \text{ N} > F$ ,  $h > 200 \text{ nm}$ ,
- 3) Zkoušky nanotvrdosti –  $h < 200 \text{ nm}$ .

Kde  $F$  značí maximální sílu, dosaženou v průběhu indentačního testu a  $h$  maximální hloubku vytvořeného vtisku. Další rozdělení zkoušek tvrdosti můžeme provést dle použitého principu měření tvrdosti na:

- 1) Vrypové – tvrdým hrotem, obvykle diamantovým, se při malém zatížení vytvoří na broušeném povrchu zkoušeného materiálu rýha resp. vryp a podle šířky tohoto vrypu se následně určí tvrdost měřeného materiálu.
- 2) Odrazové – při této zkoušce se tvrdost měří podle velikosti odrazu závaží kulovité vybroušeným diamantovým hrotem, které dopadá z určité výšky na zkoušený předmět.
- 3) Vtiskové – jak již bylo řečeno, tyto zkoušky jsou nejběžnější a také nejrozšířenější. Tvrdost se určuje z velikosti povrchu vtisku, způsobeného vnikajícím tělískem. [8]

### 3.1 Mikrotvrдость

V tomto případě je měření tvrdosti realizováno vtláčováním diamantového tělesa tvaru Vickersa nebo Knoopova jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1 g (0,09807 N) do 1000 g (9,807 N). Zatímco běžné zkoušky (makro) tvrdosti podle Vickerse jsou prováděny při zatíženích mezi 10 a 1200 N, první použití sil nižších než 10 N se datuje do roku 1932, kdy byly tyto zkoušky provedeny v National Physical Laboratory ve Velké Británii.

S klesajícími aplikovanými silami (se zmenšující se velikosti vtisku) při měření tvrdosti přesnost měření klesá. Navíc s klesající zátěžnou silou do oblasti mikrotvrdsti již není Vickersova tvrdost (jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisku u hodnot makrotvrdsti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení. Protože vtisky při zkoušení mikrotvrdsti jsou malé, je použití této metody vhodné pro:

- malé nebo tenké součásti
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušební vzorku
- měření mikrotvrdsti strukturních složek
- hodnocení vrstev po chemicko tepelném zpracování
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků
- hodnocení svarových spojů
- pro hodnocení oduhlčujících procesů
- studium difúzních pochodů
- měření křehkých materiálů
- atd. [5]

### 3.2 Mikrotvrдость dle Vickerse

#### 3.2.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Princip, průběh a podstata zkoušek tvrdosti a mikrotvrdsti (nanotvrdsti) se od sebe vzájemně nijak neliší. Hlavní rozdíl mezi zkouškami spočívá ve velikosti konečného zatížení, které působí na indentor. Zkoušku tvrdosti a mikrotvrdsti dle Vickerse předepisuje evropská norma ČSN EN ISO 6507-1 pro tři různé oblasti zatížení (viz. tab. 2). Hodnoty zatížení, udávané evropskou normou, jsou v kilogramech. Důvodem je historické hledisko, neboť zatížení pro tvrdost a z toho plynoucí jednotka tvrdosti, byla stanovena před přijetím mezinárodní soustavy jednotek.

Tab. 3 Tvrdost dle Vickerse – oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály

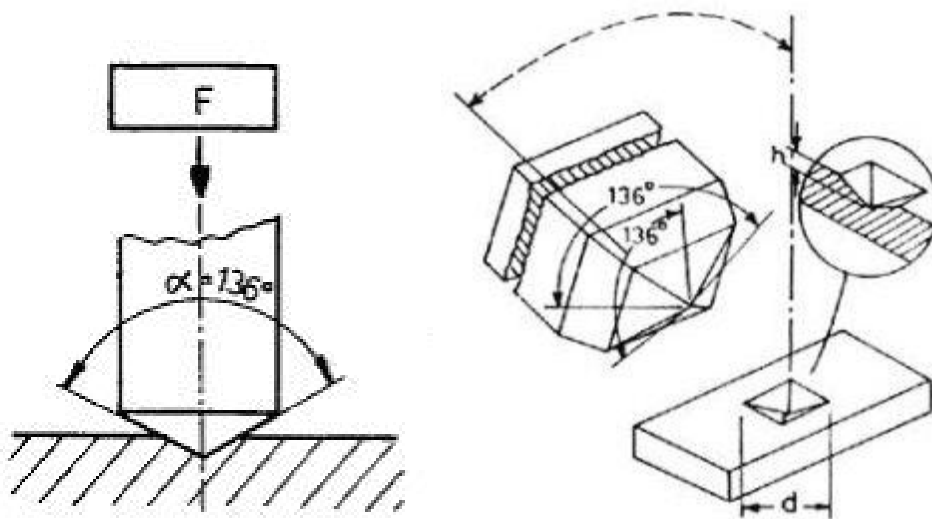
Oblast zkušebního zatížení F [N]	Označení tvrdosti	Rozdělení zkoušek dle ISO 6507-01
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Při měření tvrdosti se používá zatížení v kilogramech, ale zatěžující síla se udává v newtonech.

Např. tvrdost HV 10 znamená, že při zkoušce bylo použito zatížení 10 kg, ale maximální síla dosažená v průběhu zkoušky, která působila na indenter, byla 98,07 N.

### 3.2.2 Podstata zkoušky

Při zkoušce tvrdosti a mikrotvrdosti podle Vickerse, je do měřeného vzorku vtlačován pravidelný čtyřboký jehlan (pyramida) vyrobený z diamantu. Osy protilehlých stěn jehlanu svírají úhel  $136^\circ$  a určují tak rozevření jehlanu. Vzhledem k tomu, že podstava jehlanu tvoří čtverec, má půdorys vzniklého vtisku v materiálu tvar čtverce. Velikost tvrdosti je rovna jako podíl použité síly  $F$  a velikosti plochy vtisku  $A_s$  tj. plocha stěn nikoliv projekční plocha. K určení tvrdosti se změří úhlopříčka vtisku  $d$ .



Obr. 13 Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse

$$HV = 0,012 \times \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \times \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

### 3.2.3 Zkušební těleso

Zkouška zkušební tělesa nebo vrstvy musí být nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku. Na protilehlé straně zkušební tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace. Po dobu zkoušky musí být zkušební přístroj chráněn proti otřesům a chvění. Vzdálenost středů každého vtisku od okraje zkušební tělesa musí být nejméně 2,5 násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku a nejméně 3 násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3 násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (v případě oceli, mědi a slitin mědi) a nejméně 6 násobek v případě lehkých kovů (např. olova, cínu a jejich slitin). [8]

### 3.2.4 Provedení zkoušky

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce tak, aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indentor) se zatlačuje do zkušební tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí být menší než 2 s a větší než 8 s. Tato doba nesmí u zkoušky u tvrdosti při nízkém zatížení a zkoušky mikrotvrdosti nesmí překročit 10 s a současně nesmí rychlost zatěžování překročit 0,2 mm/s. Doba plného zkušebního zatížení musí být 10 až 15 s. [4]

Tab. 4 Zkušební zatížení pro zkoušky tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti HV	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti HV	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti HV	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
5	49,03	0,2	1,961	0,01	0,09807
10	98,07	0,3	2,942	0,015	0,1471
20	196,1	0,5	4,903	0,02	0,1961
30	294,2	1	9,807	0,025	0,2942
50	490,3	2	19,61	0,05	0,4903
100	980,7	3	29,42	0,1	0,9807

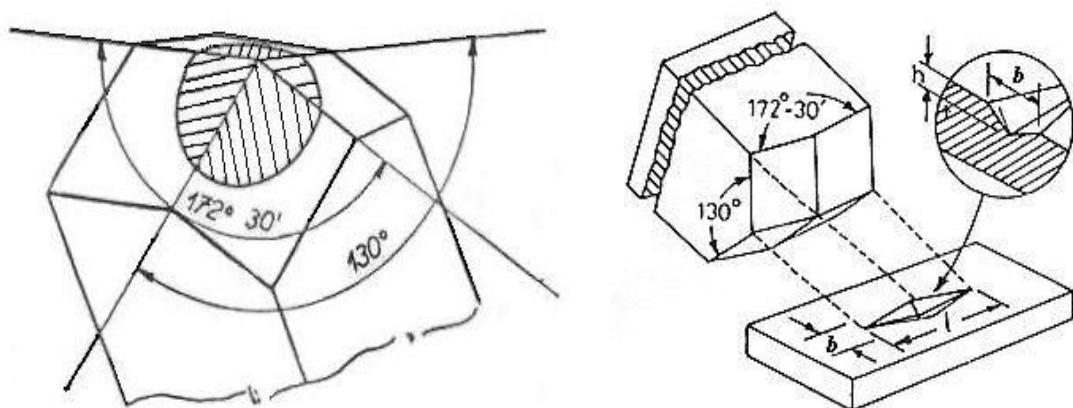
### 3.3 Mikrotvrdost dle Knoop

#### 3.3.1 Zkouška tvrdosti dle Knoop

Knoopův indentor byl vyvinut speciálně pro vtiskové zkoušky s nízkým zatížením za účelem hodnocení mikrotvrdosti tenkých plechů a křehkých materiálů.

#### 3.3.2 Podstata zkoušky

Knoopův indentor má tvar čtyřstěnného diamantového jehlanu, jehož vtisky mají tvar kosodélníka. Protilehlé hrany svírají po řadě úhel  $175,5^\circ$  a  $130^\circ$ . Poměr délek vedlejší a hlavní uhlopříčky je 1:7,11 a poměr délky hlavní uhlopříčky ku hloubce vtisku je 30:1. [8]



Obr. 14 Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoop

Tvrdoost dle Knoopa je následně vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenže se uvažuje jako jehlan s kosočtvercovou základnou a s vrcholovými úhly rovnající se úhlům vnikajícího tělesa.

$$HK = \frac{P}{c_p \times L^2} \quad (2)$$

### 3.3.3 Zkušební těleso

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

Hodnocený zkušební vzorek musí mít hladký a rovný povrch, bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se připravuje jako metalografický výbrus, tzn., že nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Běžně se příprava provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. [4]

### 3.3.4 Provední zkoušky

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce tak, aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indentor) se zatlačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od začátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa musí být v rozmezí od 15 $\mu$ m/s do 70 $\mu$ m. Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s. [4]

Tab. 5 Zkušební zatížení dle Knoopa

Zkouška tvrdosti podle Knoppa	
Symbol tvrdosti HK	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
0,01	0,09807
0,02	0,1961
0,025	0,2452
0,05	0,4903
0,1	0,9807
0,2	1,961
0,3	2,942
0,5	4,903
1	9,807



### 3.4 Mikrotvrdomost dle Berkoviče

Průběh a princip indentační zkoušky se od Vickersova testu nijak neliší. Hlavním důvodem uvedení nového indetoru byly problémy s výrobou čtyřbokého jehlanu a dodržení geometrické podmínky sbíhavosti hran Vickersova jehlanu, který v případě výroby třístěnného jehlanu odpadá. Rovněž díky svému tvaru je jehlan během svého provozního namáhání méně citlivý na nárazy a nepatrné zacházení. V současné době je Berkovičův indentor zcela běžně používán v nanoindentačních zkouškách. Původní „standardní“ Berkovičův indentor byl navržen tak, aby byl stejný poměr plochy stěn jehlanu k jeho výšce jako v případě Vickersova jehlanu. Později, s rozšířením koncepce tvrdosti jako poměr síly a projekční plochy vtisku, byl vyroben tzv. 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.

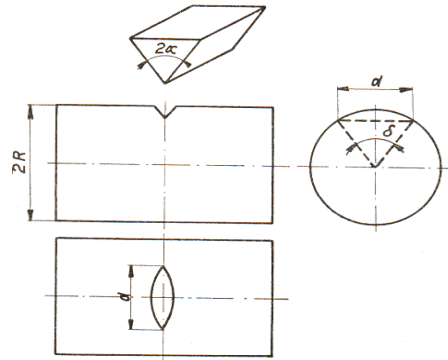
Hodnota mikrotvrdomosti pro Berkovičův indentor s úhlem  $65,03^\circ$ , vyjádřena jako poměr velikosti zatížení a plochy je:

$$H_{CH} = 1570 \times \frac{W}{l^2} \quad (3)$$

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

### 3.5 Mikrotvrdomost dle Meincka a Attingera

Tato metoda je vhodná pro zjišťování tvrdosti na jemných válcovaných předmětech. Vtlačované zkušební těleso má tvar jehlanu s vrcholovým úhlem  $2\alpha$  a je vybroušené z diamantu. Vtlačování se provádí tak, aby hrana jehlanu byla kolmá k povrchovému vláknu předmětu. Tvar vzniknutého vtisku je zobrazený na následujícím obrázku.



Obr. 15 Podstata zkoušky mikrotvrlosti dle Meincka a Attingera

### 3.6 Mikrotvrlost dle Hanemanna

Zkušební zatížení pro zkoušku mikrotvrlosti dle Vickersa na mikrotvrdoměru dle Hanemanna uvádí tabulka 5. V porovnání s normovanou metodou je možné měřit na tomto typu mikrotvrdoměru i velmi nízké hodnoty (HV 0,005), ale chybí zde možnost měřit mikrotvrlost HV 0,015 a HV 0,025.

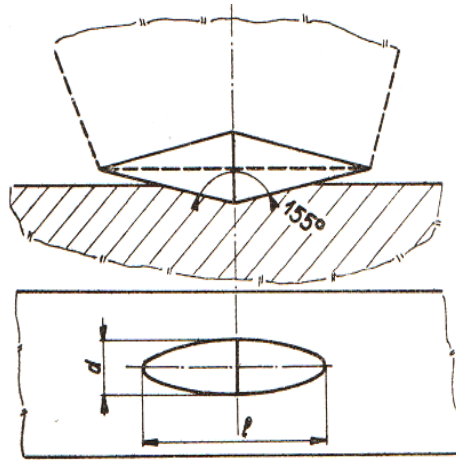
Tab. 6 Zkušební zatížení dle Hanemanna

Zkouška tvrdosti podle Hanemann	
Symbol tvrdosti HK	Nominální hodnota zkušební zatížení F [N]
0,005	0,04903
0,01	0,09807
0,02	0,1961
0,05	0,4903
0,1	0,9807

### 3.7 Zkouška mikrotvrlosti na dvojkužely

V poslední době se dostává do popředí metoda stanovení mikrotvrlosti pomocí dvojkužele (Grodzinky). Zkušební těleso má tvar dvojtého kužele, spojeného základnou a vtláčuje se do zkušebnímu materiálu kolmo ve směru osy souměrnosti (na ležato). Tímto vznikají vtisky podobné vtiskům Knoopového jehlanu. Oba kužele svírají úhel  $155^\circ$ . Vzniknutý vtisk má poměr délky k šířce 22:1 a poměr délky k hloubce vtisku 80:1. Tento tvar zkušebnímu

tělesa dovoluže zkoušky tvrdosti na velmi tvrdých materiálech, jako jsou karbidy bóru, keramika apod. [9]



Obr. 16 Podstata zkoušky mikrotvrdosti pomocí dvojkužeře

## 4 INSTRUMENTOVANÁ VNIKAJÍCÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI – DSI

Jedním z hlavních důvodů pro vznik nové indentační techniky byla snaha o zjištění mechanických vlastností tenkých vrstev. Tradiční zkoušky mikrotvrdomosti resp. přístroje 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. A pokud se vytvoří vtisk dle daného požadavku, nebylo možné jeho rozměry v klasickém tj. optickém mikroskopu přesně změřit. Rozměry vtisku se musely proměřit elektronovým mikroskopem, což práci prodlužovalo a znesnadňovalo, určování mikro, resp. ultramikrotvrdomosti se stávalo nepohodlným.

Metoda DSI (Depth Sensing Indentation) pro niž byl zvolen český ekvivalent Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti má své počátky v sedmdesátých letech 20 století. Zásadní vylepšení metodologie, analýzy a shromáždění dat provedli až Oliver a Pharr na počátku let osmdesátých. Principem metody je, že měřicí přístroj dekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu/poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení – hloubka vtisku. Díky možnosti napojení měřicího přístroje na PC jsou průběhy zkoušek ihned zaznamenány současně s vyhodnocením některých materiálových parametrů.

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

Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  je mírou rezistence k trvalé deformaci nebo poškození

$$HIT = \frac{F_{max}}{A_p} \quad (4)$$

kde  $F_{max}$  maximální zkušební zatížení,

$A_p$  průměr kontaktní plochy vnikajícího tělesa a zkušební tělesa určený z křivky zatížení – hloubka vtisku a ze znalosti funkce plochy vnikajícího tělesa.

## 4.2 Stanovení vtiskového modulu $E_{IT}$

Vtiskový modul  $E_{IT}$  se může vypočítat ze směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti  $H_{IT}$  a je srovnatelný s Youngovým modulem materiálu. Avšak mezi vtiskovým modulem  $E_{IT}$  a Youngovým modulem se mohou vyskytovat významné rozdíly v případech, kdy vtisková deformace je provázána formacemi „pile – up“ nebo „sink – in“.

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

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2C\sqrt{A_p}} \quad (5)$$

- kde  $v_s$  Poissonův poměr zkušebního tělesa,  
 $v_i$  Poissonův poměr vnikajícího tělesa  
 $E_r$  redukovaný modul vtiskového kontaktu  
 $E_i$  kontaktní poddajnost  
 $A_p$  průmět kontaktní plochy

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

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

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 \quad (6)$$

- kde  $h_1$  hloubka vtisku v milimetrech v čase ( $t_1$ ), kdy je dosaženo zkušebního zatížení (které je udržováno na konstantní úrovni)  
 $h_2$  hloubka vtisku v milimetrech v čase ( $t_2$ ) výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení

## 4.4 Stanovení plastické a pružné části práce vnikajícího procesu

Celková mechanická práce  $W_{total}$  vnikajícího procesu je pouze částečně spotřebovaná jako deformační práce plastická,  $W_{plast}$ . V průběhu odlehčování zkušebního zatížení je zbytková

část považována za práci pružné zpětné deformace,  $W_{elast}$ . Podle definice mechanické práce,  $W = \int F \times dh$ , se obě části na obrázku 17 jeví jako odlišné plochy. Vztah

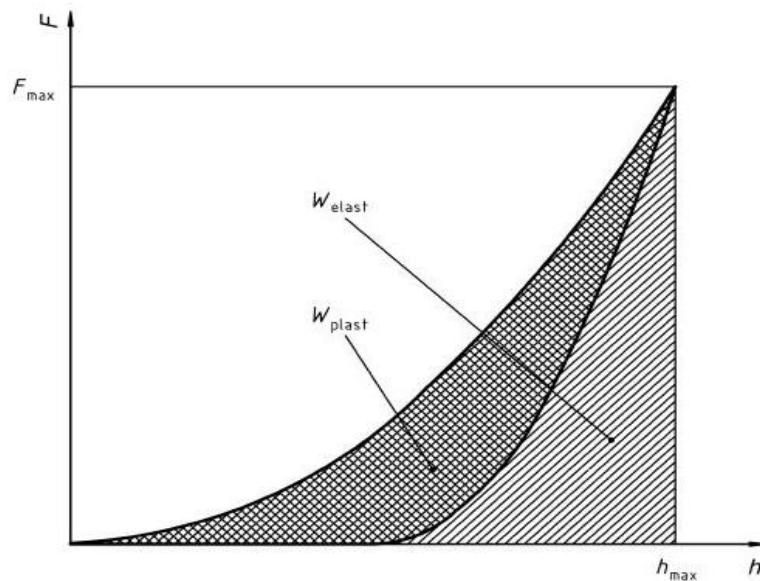
$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \times 100 \quad (7)$$

obsahuje informaci, která je vhodná k charakterizování zkušební tělesa, kde

$$W_{total} = W_{elast} + W_{plast} \quad (8)$$

Plastická část  $W_{plast}/W_{total}$  je pak

$$100\% - \eta_{IT} \quad (9)$$



Obr. 17 Plastická a pružná část práce vnikajícího procesu

#### 4.5 Indentační křivky

Hlavním cílem indentačních mikro a nanotechnik je určení mikro a nanotvrdomosti a současně elastického modulu zkoušeného vzorku, zaznamenáváním průběhu hodnot působící zatížení narůstá ze své nulové hodnoty do svého maxima a poté z maximální hodnoty zpět

do nuly. Jestliže se indentovaný vzorek plasticky deformuje, zůstává v jeho povrchu trvalý vtisk. Velikost vzniklého vtisku (a tedy projekční plocha) je příliš malá na přesné měření optickými technikami, tak jako je tomu u konvenčních zkoušek tvrdosti. Geometrie indentoru a jeho hloubka průniku do materiálu tak poskytují nepřímou informaci o velikosti kontaktní plochy při plném zatížení, ze které se vypočte průměrný kontaktní tlak a tak i tvrdost. Při odlehčování dochází k tzv. zotavování vtisku, tj. materiál se snaží dostat do svého původního tvaru uvolňováním elastických deformací. Zejména u kovů však k zotavení nikdy nedojde v plné míře díky již vzniklé plastické deformaci. Analýza počáteční části elastické relaxace v průběhu odlehčování tak umožňuje určit elastický modul zkoumaného materiálu. Tvary indentačních křivek, respektive křivek poddajnosti jsou si bez ohledu na použitý indenter velice podobné.

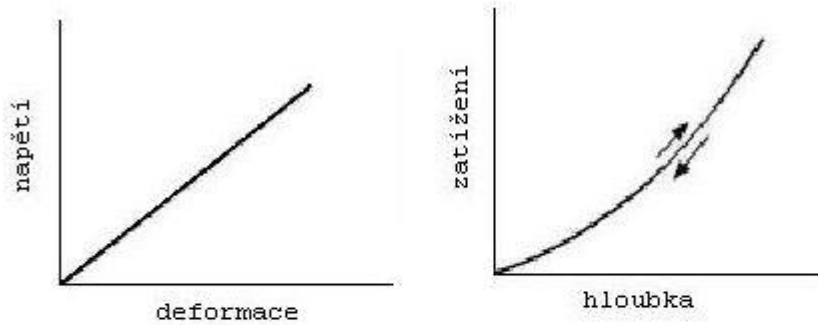
Je nutné si uvědomit, že metoda DSI se v praxi používá na širokém a rozmanitém množství materiálu, měkkými polymery počínaje a tvrdými uhlíkovými diamantu podobnými vrstvami konče. Jinými slovy odezva měřeného materiálu na indentaci je hlavním činitelem, který ovlivňuje tvar indentační křivky. Tvar indentační křivky neslouží pouze k výpočtu tvrdosti a modulu pružnosti, ale je zdrojem velmi důležitých informací, které se projeví náhodným nespojitým průběhem např. fázová transformace, trhliny a delaminace vrstvy.

Platí však, že trvalá deformace nebo zbytkový vtisk, nemusí být výsledkem čistě plastické deformace, ale může zahrnovat trhliny, nebo fázové transformace vzorku. Jako doplňkovou informaci vypovídající o odezvě materiálu na plynulé zatěžování/odlehčení lze použít grafickou závislost zatížení – čas a nebo závislost hloubka průniku – čas.

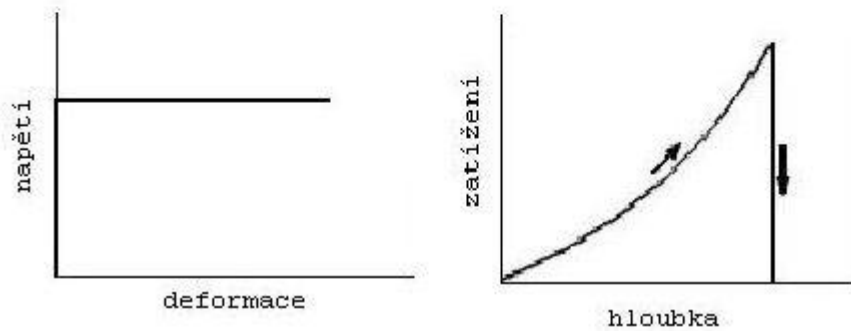
Avšak, obecně je nutné si uvědomit, že materiály lze rozdělit do čtyř skupin podle reakce na vnější silové působení viz.obr.: 18

- elastické
- elasticko – plastické
- plastické
- viskoplastické [8]

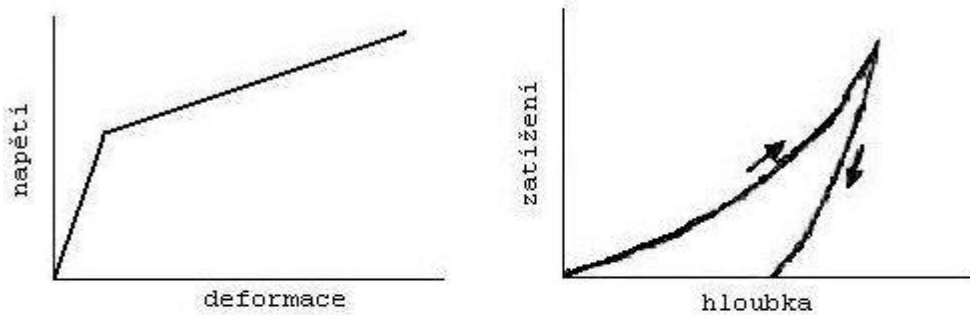
*ideálně elastický*



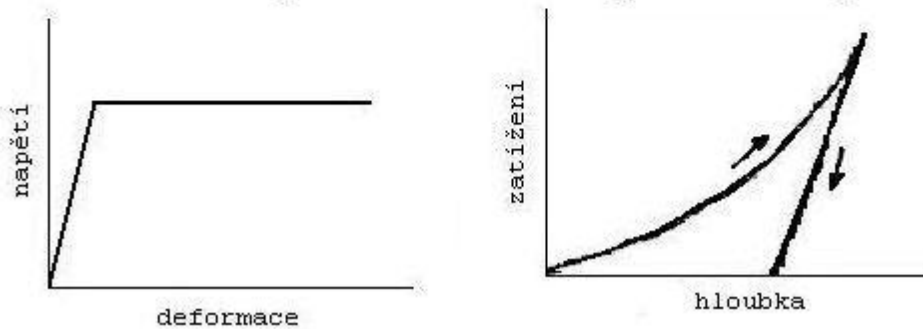
*ideálně tuhý-dokonale plastický*



*ideálně elasto-plastický*



*elastický - ideálně plastický*



Obr. 18 Porovnání odezvy materiálu na jednoosé a víceosé namáhání



## 5 NANOTVRDOST

Při měření nanotvrdosti se používá řada vnikajících tělísek vyrobených z různých materiálů, nejčastějším materiálem je diamant. Vzhledem k jeho tvrdosti a vysokému modulu pružnosti, což významně snižuje vliv deformace indentoru na výsledky měření. Jako vnikající těleso se v oblasti nanotvrdosti přednostně používá trojboký jehlan dle Berkoviche, který zachovává stejný poměr hloubky a plochy vtisku Vickersův jehlan, ale oproti jehlanu Vickerse (který je zakončen krátkým – u nejlepších hrotů jen cca 0,5 mikron dlouhým – příčným ostřím) má výhodu v možnosti vybrousit jeho špičku do bodu a zachovat tak geometrickou podobnost různě velkých a tedy i těch nejmenších vtisků. Jiným používaným indentorem je kulička, která oproti Berkovičovu vnikajícímu tělesu má výhodu postupného nárůstu zatížení nejprve v rozsahu elastických deformací a umožňuje tak identifikovat přechod od elastických k plastickým deformacím a vyhodnotit mez kluzu a zpevnování materiálu. Problémy s výrobou kulových indentorů pro měření nanotvrdosti z tvrdých materiálů jsou příčinou, proč je v oblasti nanotvrdosti přednostně používána Berkovichova metoda. Někdy se jako vnikající těleso používá také hrot ve tvaru rohu krychle, což je ostřejší hrot v porovnání s hrotem podle Berkoviche, tím tento hrot vyvolává větší napětí a deformace v okolí vtisku, čímž v okolí vtisku u křehkých materiálů vznikají dobře definované trhlinky. To je mnohdy s výhodou využíváno při měření lomové houževnatosti v mikroobjech. Nanoindentory ve tvaru kužele mají výhodu vyplývající ze skutečnosti, že u tohoto tvaru nevzniká koncentrace napětí na ostrých hranách jako u ostatních indentorů. Malý rozsah použití konických tvarů indentorů je způsoben potížemi při výrobě diamantového hrotu s bodovým zakončením.

Vlastní proces zkoušení materiálu probíhá pro všechny tvary vnikajících těles následovně:

Při vtláčování vnikajícího tělesa do materiálu vznikají jak elastické tak plastické deformace a tvar vtisku je dán tvarem vnikajícího tělíska. Po odlehčení zůstanou jen nevratně plastické deformace, což umožňuje rozlišit velikost elastických a plastických deformací. [4]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce byl výzkum vlivu tepelného zpracování různých druhů kovových materiálů na mikromechanické vlastnosti (mikrotvrdość). Měřili jsme čtyři typy kovových materiálů, které byly bez tepelného zpracování a s tepelným zpracováním zatěžovány čtyřmi druhy zatížení a to, 0,5 N, 1 N, 3 N, 5 N, byly statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny.

### 6.1 Použité materiály

Pro praktickou část, byly použity čtyři typy kovových materiálů. Jedná se o materiály:

- 11600 bez tepelného zpracování a 11600 kalený a popuštěný,
- 12050 bez tepelného zpracování a 12050 popuštěný,
- 14220 bez tepelného zpracování a 14220 cementovaný,
- 15230 bez tepelného zpracování a 15230 zušlechtěný.

### 6.2 Příprava materiálu

Leštění vzorků bylo provedeno na leštičce BUEHLER EcoMet 250 PRO. Zkušební vzorky byly zalisovány do materiálu EpoMet G Molding Compound 20-3380-064, od firmy Buehler z důvodu upnutí do metalografické leštičky. Vzorky byly leštěny v několika krocích, nejprve pomocí brousících kotoučů s 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. 19 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO

### 6.3 Měřicí přístroj

K měření mikrotvrdomosti zadaných zkušebních vzorků byl použit přístroj Micro-Combi-Tester od firmy CSM Instruments. Tímto přístrojem lze měřit mikrotvrdomost, nanotvrdomost, elastické vtiskové moduly, deformační práce a creep. Má velký rozsah měření, a to od minimální hodnoty 10 mN do maximální hodnoty 30 N. Po dokončení měření přístroj vyhodnotí určité hodnoty

- vtisková tvrdost  $H_{IT}$  (MPa)
- vtiskový modul  $E_{IT}$  (GPa)
- modul redukovaného  $E_r$
- modul komplexového  $E^*$
- mikrotvrdomost podle Vickersa



Obr. 20 Mikrotvrdoměr Micro-Combi-Tester – pohled 1



Obr. 21 Mikrotvrdoměr Micro-Combi-Tester – pohled 2

## 6.4 Charakteristika použitého materiálu pro zkušební vzorky

### 6.4.1 Ocel 11600

Neušlechtilá konstrukční ocel obvyklé jakosti s vyšším obsahem uhlíku. Vhodná na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost. Součásti vystavené velkému měrnému tlaku. Hřídele, osy, ozubená kola, řetězová kola, páky, čepy, pístnice, kolíky, podpěry, držátka, objímky, šrouby a matice, klíny, pera, kluzné kameny, ozubené hřebeny, kladky, spojky, segmenty a vložky axiálních ložisek, distanční kroužky, různé upínací elementy, tělesa fréz apod. Pásky a pruhy ke tvarování ohybem.

#### 6.4.2 Ocel 12050

Konstrukční ocel nelegovaná k zušlechtování, povrchovému kalení a pro velké výkovky. Uklidněná ocel vhodná na hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů apod., na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce, rotory šroubových kompresorů, ojnice, pístnice, vřetena, plunžry lisů, písty kompresorů, čepy, šrouby, stavěcí šrouby, dopravní válečky, vodící čepy, lamely spojek, kladičky, lůžka, páky, zarážky, kolíky, různé spojovací součásti, posouvací vidlice, držáky, unášče satelitů, vahadla, západky, kované svorníky tlakových nádob, upínací a stavebnicové části nástrojů, vrtací tyče, frézovací trny. Svařitelnost obtížná.

#### 6.4.3 Ocel 14220

Ocel Mn-Cr k cementování a ke kyanování. Ocel je dobře tvařitelná za tepla, po žíhání na měkko i za studena, se zaručeným rozmezím prokalitelnosti. Je dobře obrobitelná - pro hladké obrábění se doporučuje ocel zušlechtěná na pevnost 690 - 880 MPa. Je vhodná pro strojní součásti pro zušlechtění do  $\varnothing$  35 mm, k cementování s velmi tvrdou cementovanou vrstvou s velkou pevností v jádře (hřídele, ozubená kola, vačkové hřídele, zdviháky ventilů, pístní čepy, zubové spojky), pro sériovou výrobu strojních součástí za předpokladu dodržení téže technologie tepelného zpracování také u odběratele. Svařitelnost dobrá.

#### 6.4.4 Ocel 15230

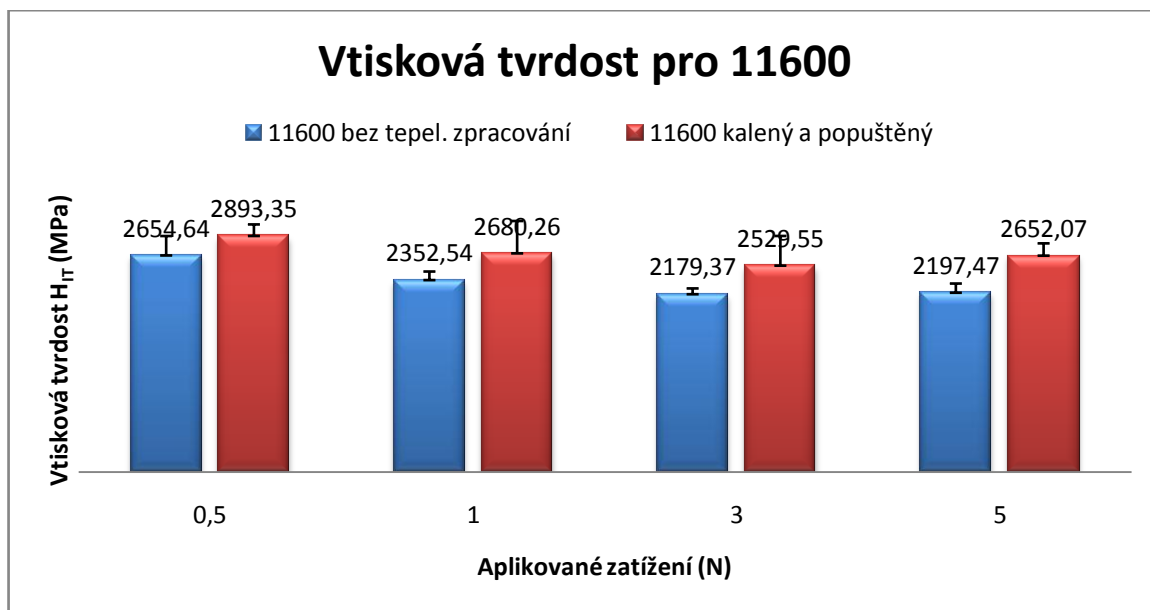
Ocel Cr-V k zušlechtování, k povrchovému kalení, pro velké výkovky. Ocel je za tepla dobře tvárná, ve stavu žíhaném na měkko je dobře obrobitelná. Je vhodná na velmi namáhané strojní součásti s vysokou pevností a pro velké výkovky, na zušlechtěné strojní části a části nitridované (ozubená kola). Svařitelnost dobrá (podle druhu a rozměrů polotovaru).

[4]

## 7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

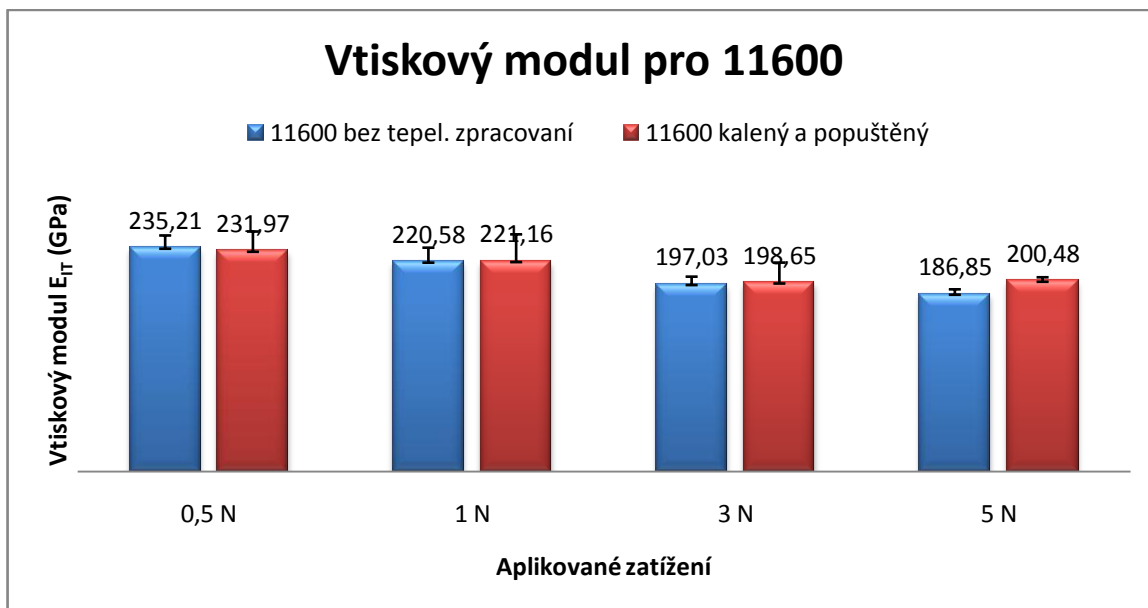
Měření mikrotvrdomosti probíhalo na každém zkušebním vzorku vždy 10 x formou maticových vtisků. Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

### 7.1 Grafické vyhodnocení pro materiál 11600

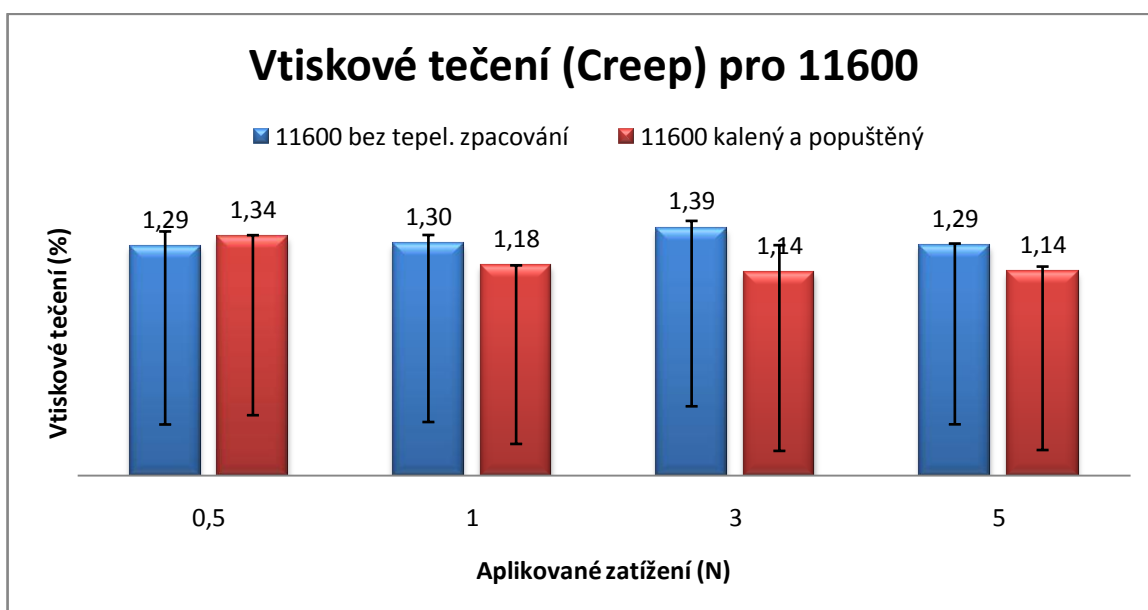


Obr. 22 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  (MPa) pro materiál 11600

Při zatížení 1 N byla naměřená hodnota vyšší o 14 % u materiálu, který byl tepelně zpracovaný kalením a popuštěním. Nejvyšší dosažená vtisková tvrdost byla u kaleného a popuštěného materiálu při zatížení 0,5 N (2893,35 MPa). Naopak nejnižší při zatížení 3 N (2179,37 MPa) bez tepelného zpracování.

Obr. 23 Vtiskový modul  $E_{IT}$  (GPa) pro materiál 11600

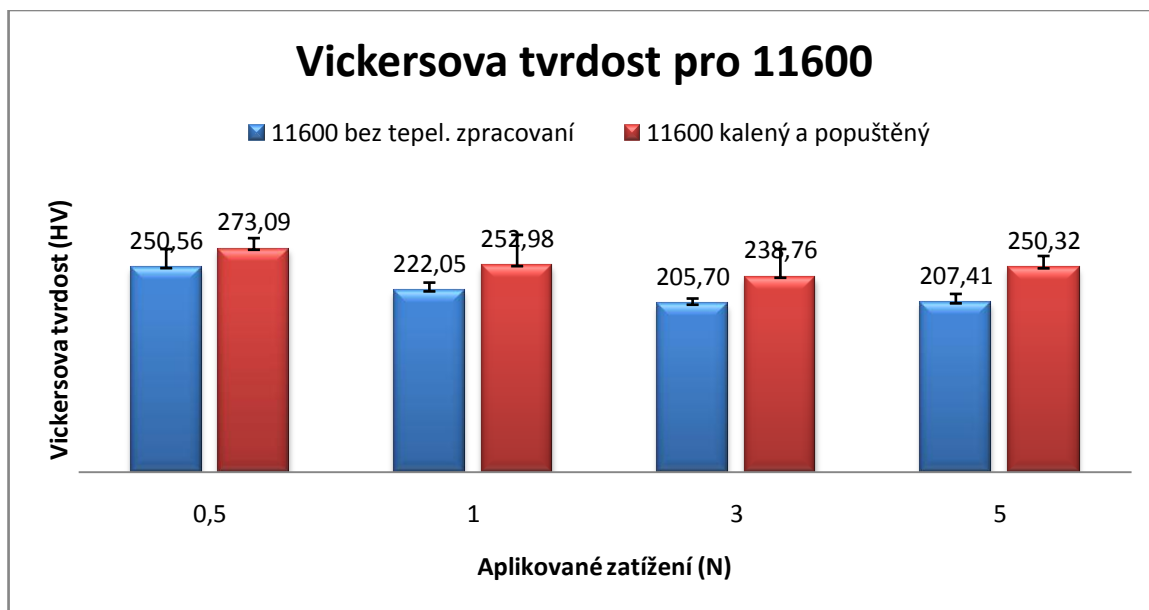
Při zatížení 1 N u kaleného a pouštěného materiálu byl vtiskový modul o 0,2 % vyšší než bez tepelného zpracování. Při měření vtiskového modulu byla nejvyšší naměřená hodnota pro materiál bez tepelného zpracování při zatížení 0,5 N (235,21 GPa), zatím co nejnižší taktéž bez tepelného zpracování, ale při zatížení 5 N (186,85 GPa).



Obr. 24 Vtiskové tečení (%) pro materiál 11600

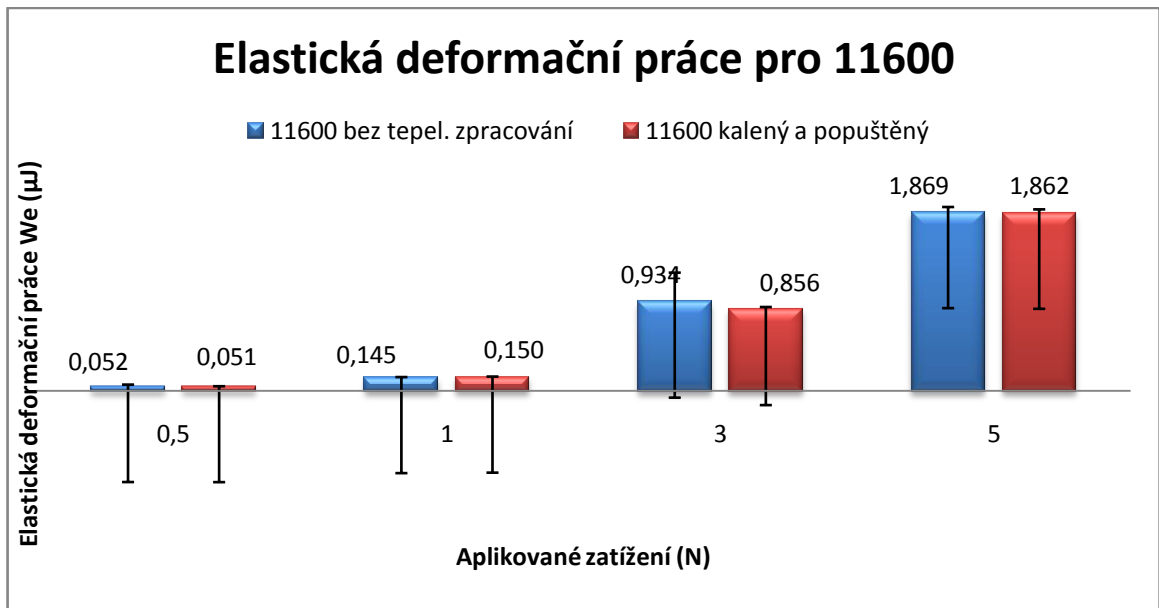


Zde však vtiskové tečení bylo naměřeno o 10 % větší při zatížení 1 N u materiálu bez tepelného zpracování. Z naměřených hodnot je patrné, že nejvyšší dosažená hodnota vtiskového tečení byla při zatížení 3 N (1,39 %) bez tepelného zpracování, nejnižší naopak při zatížení 3 N (1,14 %) kaleném a popuštěném materiálu.

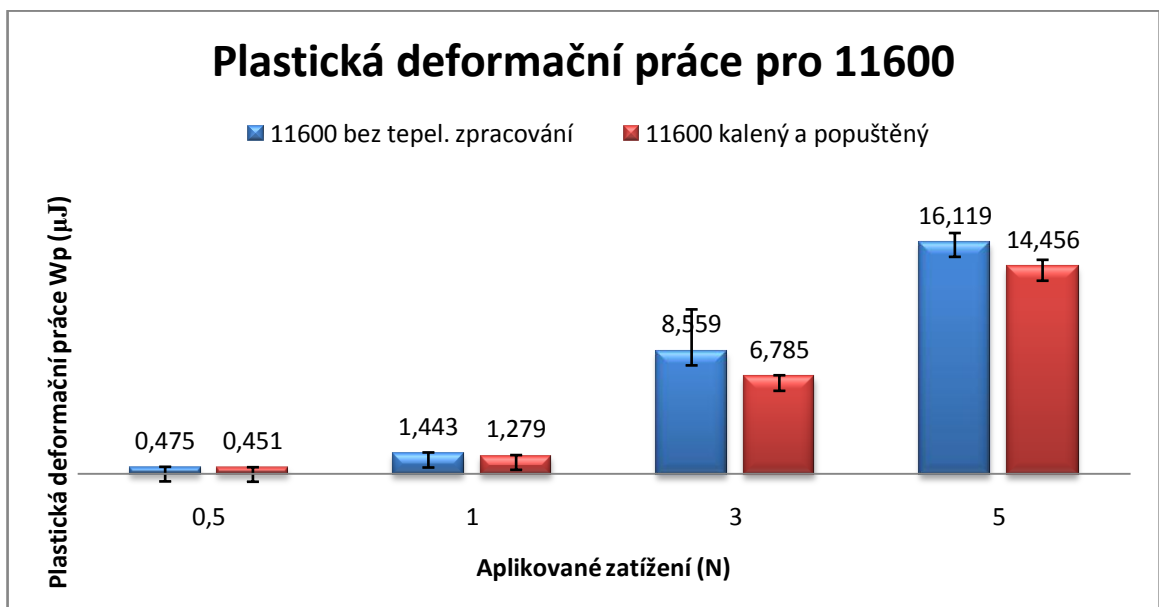


Obr. 25 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 11600

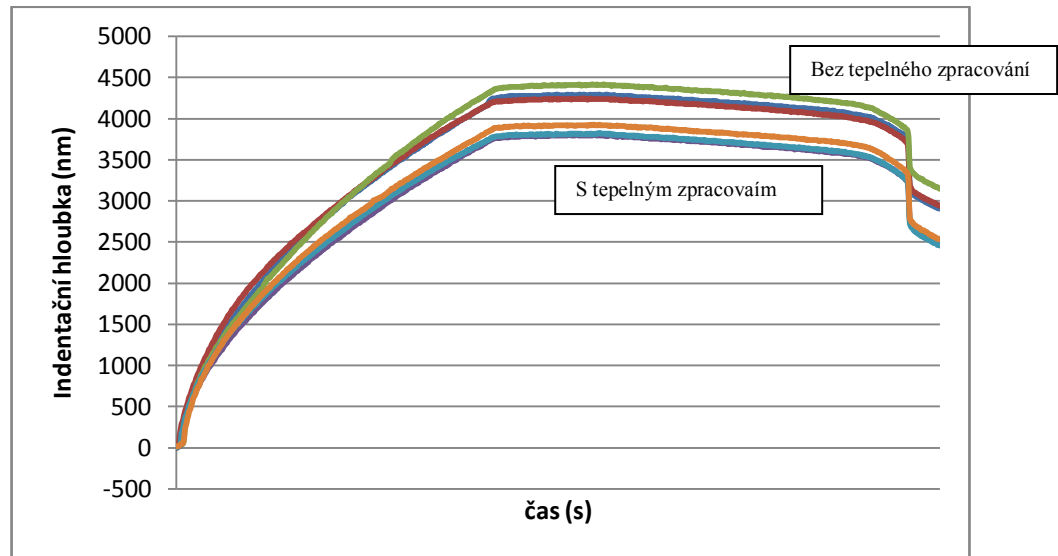
Při zatížení 1 N byla naměřená hodnota o 13 % vyšší u kaleného a popuštěného materiálu. Z výsledků měření je zřejmé, že Vickersova tvrdost byla nejvyšší při zatížení 0,5 N (273,09 HV) pro kalený a popuštěný materiál. Nejnižší hodnota byla při zatížení 3 N (205,70 HV) bez tepelného zpracování.

Obr. 26 Elastická deformační práce pro materiál  $W_e$  ( $\mu\text{m}$ ) 11600

Při zatížení 1 N byla hodnota vyšší o 3 % u kaleného a popuštěného materiálu. Nejvyšší naměřená hodnota elastické deformační práce byla u zatížení 5 N (1,869  $\mu\text{m}$ ). Zatímco nejnižší při zatížení 0,5 N (0,051  $\mu\text{m}$ ) kaleném a popuštěném materiálu.

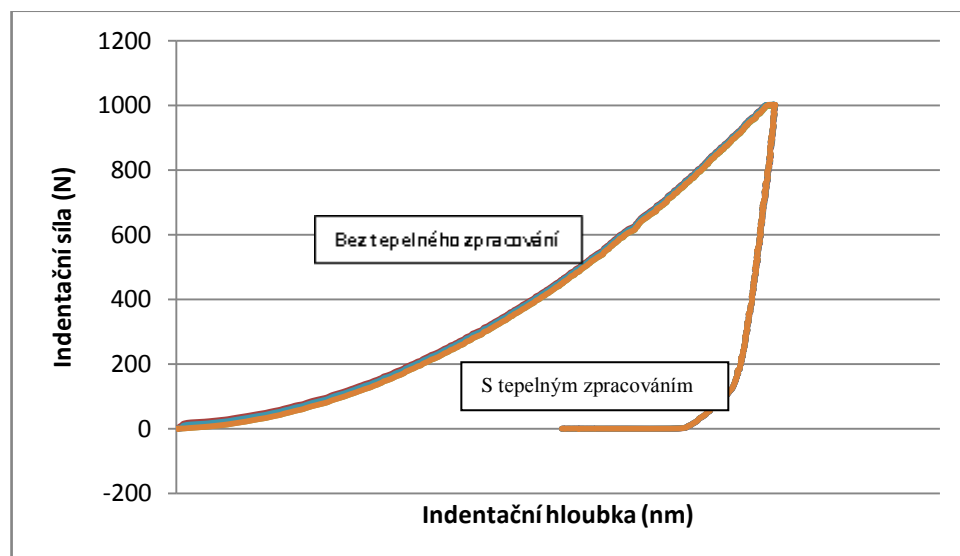
Obr. 27 Plastická deformační práce pro materiál  $W_p$  ( $\mu\text{m}$ ) 11600

U zatížení 1 N byla hodnota plastické deformační práce vyšší o 14 % bez tepelného zpracování. Nevyšší hodnota plastické deformační práce byla u zatížení 0,5 N (0,451  $\mu\text{m}$ ) kaleném a popuštěném materiálu. Naopak nevyšší deformační práce byla při 5N (16,119  $\mu\text{m}$ ) u materiálu bez tepelného zpracování.



Obr. 28 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N

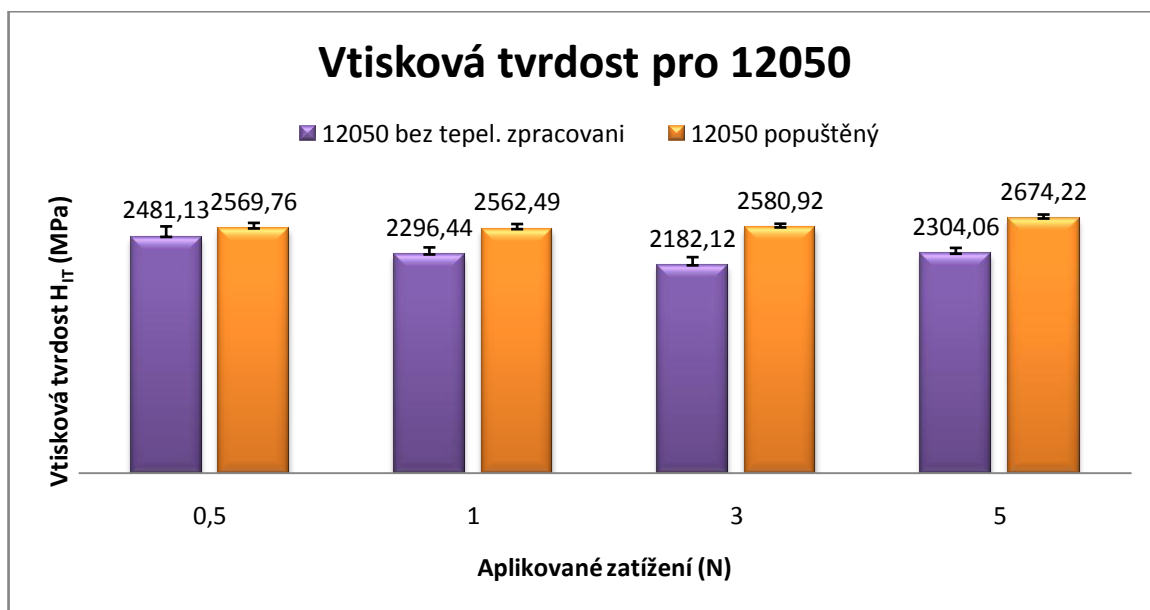
Zde můžeme vidět základní indentační křivky, které charakterizují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je hloubka indentace 4409,155 nm a u materiálu s tepelným zpracováním indenter pronikl do hloubky 3922,790 nm.



Obr. 29 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N

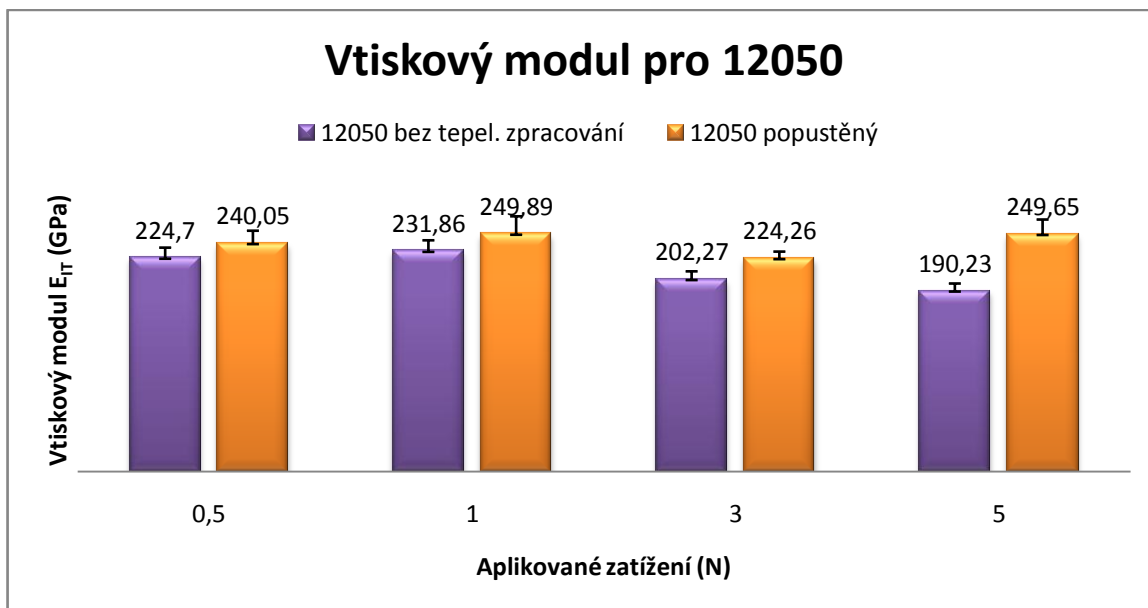
Zde můžeme vidět základní indentační křivky, které popisují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je indentační síla 1000,424 F a u materiálu s tepelným zpracováním je indentační síla 1000,737 F.

## 7.2 Grafické vyhodnocení pro materiál 12050

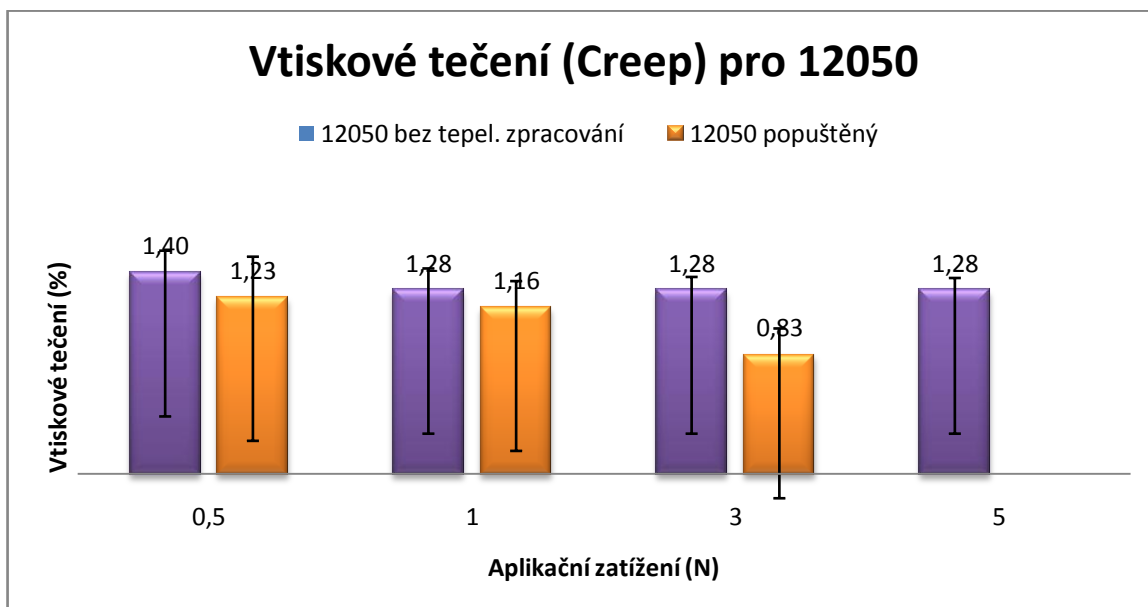


Obr. 30 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  (MPa) pro materiál 12050

Při zatížení 1 N byla naměřená hodnota o 11,5 % vyšší u popuštěného materiálu. Z výsledků je patrné, že nejvyšší hodnota byla, při zatížení 5 N (2674,22 HV) pro popuštěný vzorek. Nejnižší hodnota byla při zatížení 3 N (2182,12 HV) bez tepelného zpracování.

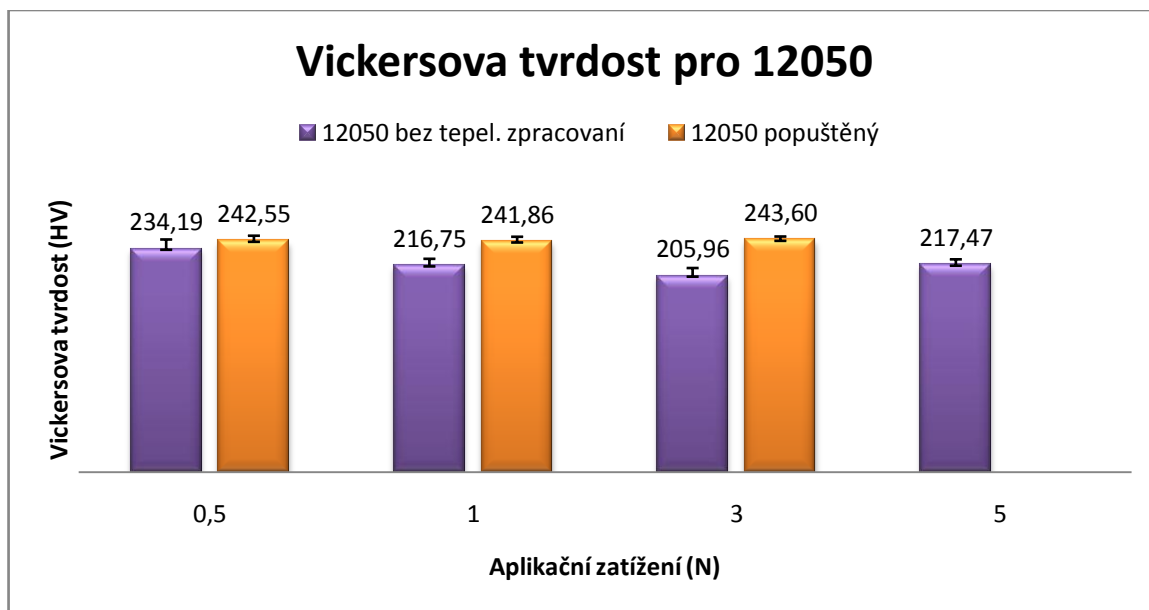
Obr. 31 Vtiskový modul  $E_{IT}$  (GPa) pro materiál 12050

Při zatížení 1 N byla hodnota vyšší o 8 % u popuštěného materiálu. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskového modulu byla u zatížení 1 N (249,89 GPa) popuštěného zkušebního vzorku. Zatímco nejnižší při zatížení 5 N (190,23 GPa) bez tepelného zpracování.



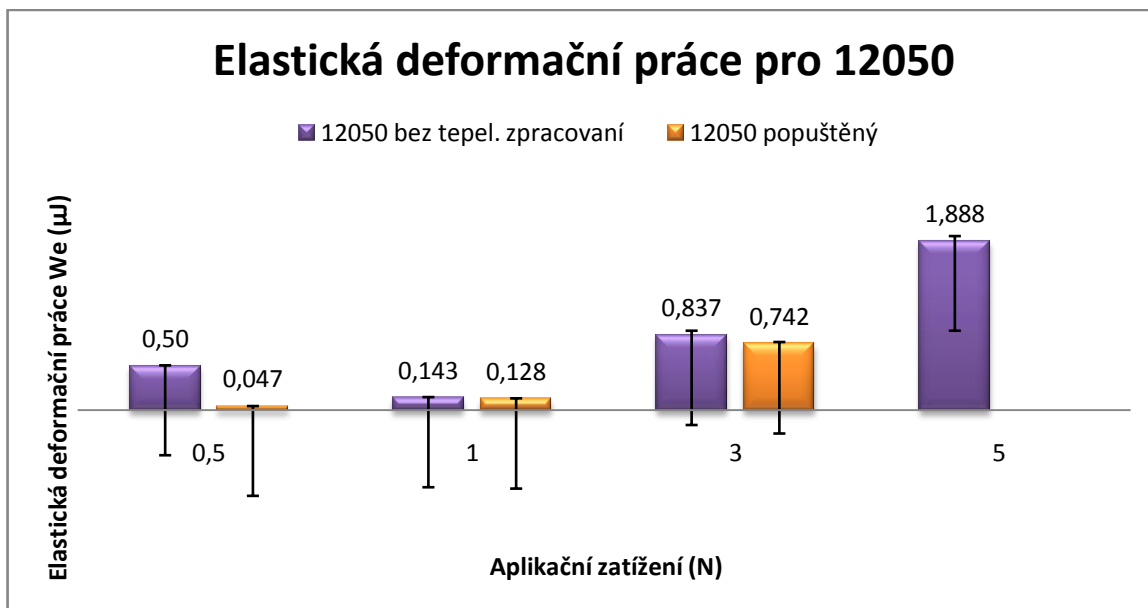
Obr. 32 Vtiskové tečení (%) pro materiál 12050

Při zatížení 1 N u popuštěného zkušebního vzorku bylo vtiskové tečení o 10 % vyšší než bez tepelného zpracování. Při měření vtiskového tečení byla nejvyšší naměřená hodnota pro měřené těleso bez tepelného zpracování při zatížení 0,5 N (1,40 %), zatímco u zatížení 5 N popuštěného vzorku nebyla hodnota naměřena.

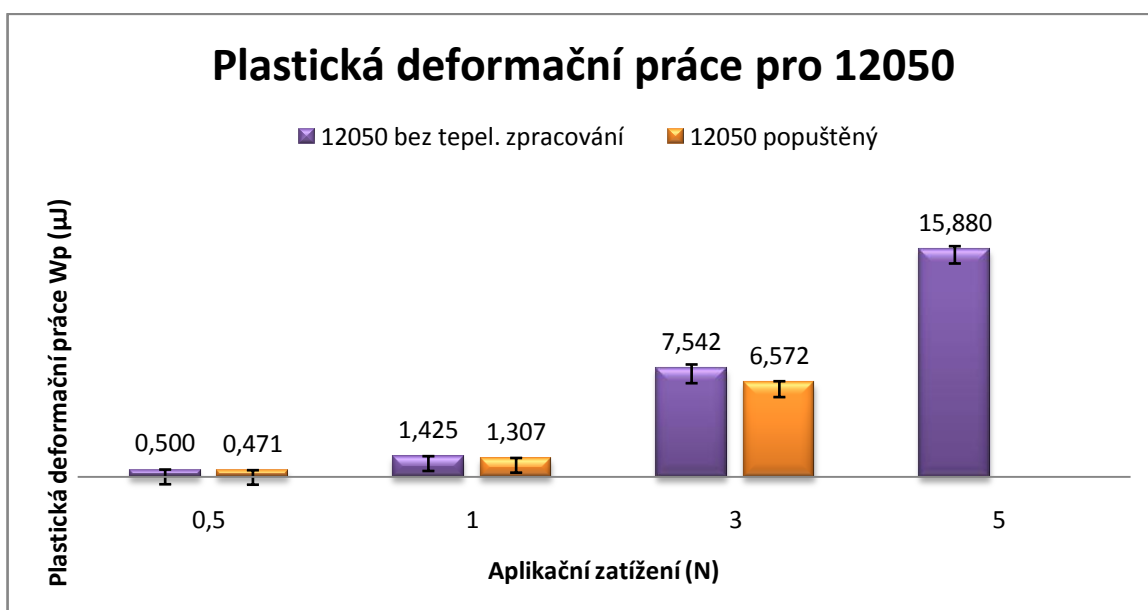


Obr. 33 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 12050

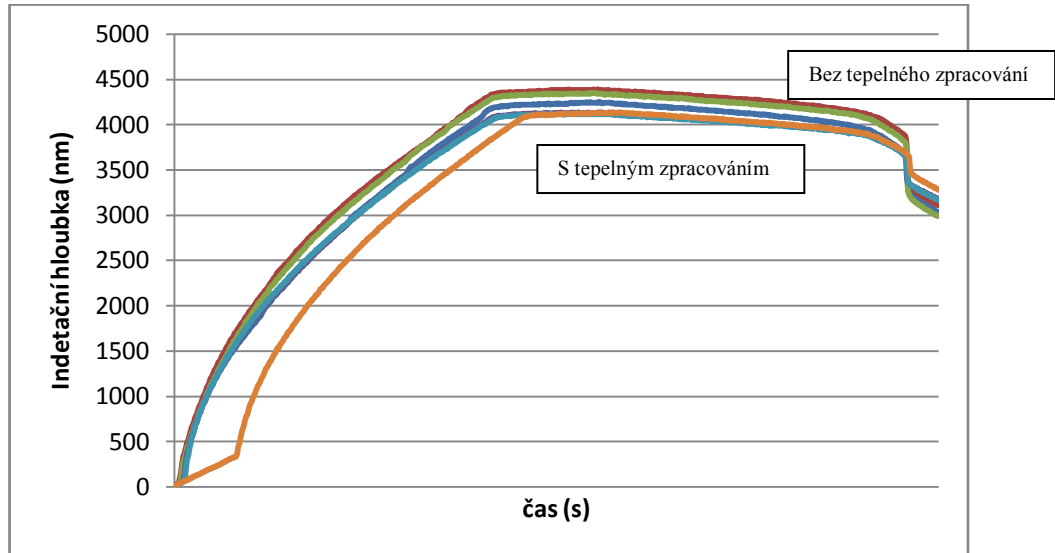
U zatížení 1 N byla Vickersova tvrdost o 11,5 % vyšší u popuštěného materiálu. Nejvyšší dosažená hodnota byla při 3 N (243,60 HV) zatímco při 5 N popuštěného materiálu nebyla hodnota naměřena.

Obr. 34 Elastická deformační práce  $W_e$  ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 12050

Při zatížení 1 N měl materiál bez tepelného zpracování o 12 % vyšší naměřenou hodnotu než popuštěný. Nevyšší hodnota elastické deformační práce byla naměřena při zatížení 5 N (1,88  $\mu\text{m}$ ) bez tepelného zpracování. Naopak při 5 N popuštěném měřeném vzorku nebyla hodnota naměřena.

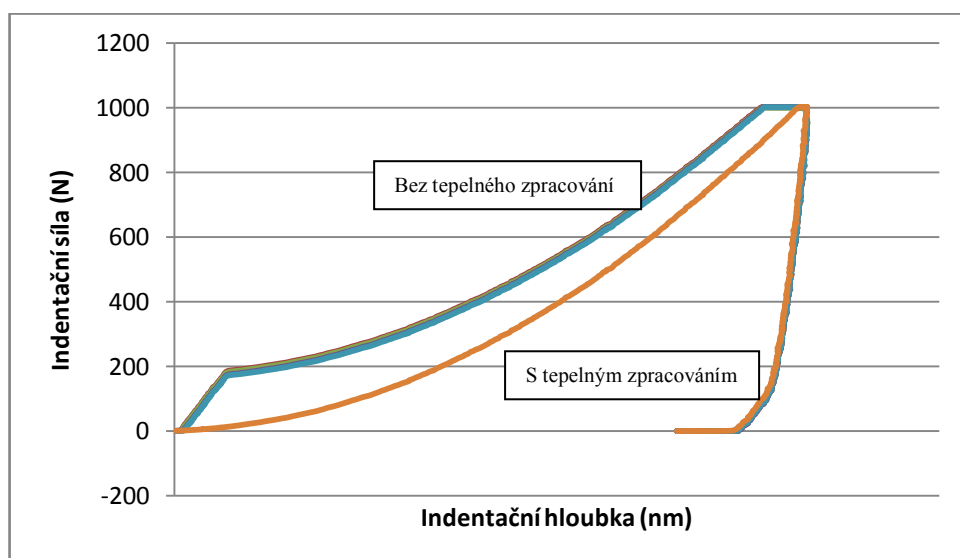
Obr. 35 Plastická deformační práce  $W_p$  ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 12050

Při zatížení 1 N byla hodnota větší o 9 % u materiálu bez tepelného zpracování. Nejvyšší naměřená hodnota byla při zatížení 5 N (15,880  $\mu\text{m}$ ) u vzorku bez tepelného zpracování. U zatížení 5N popuštěném ovzorku nebyla hodnota naměřena.



Obr. 36 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N

Zde můžeme vidět základní indentační křivky, které charakterizují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je hloubka indentace 4388,596 nm a u materiálu s tepelným zpracováním indentor pronikl do hloubky 4137,666 nm.

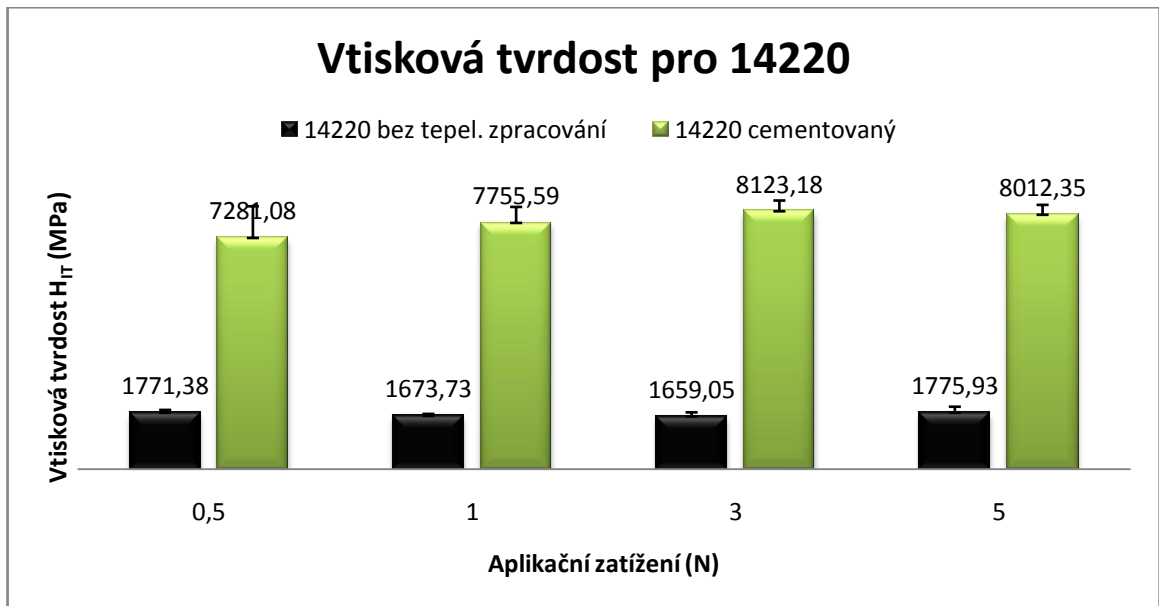


Obr. 37 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N



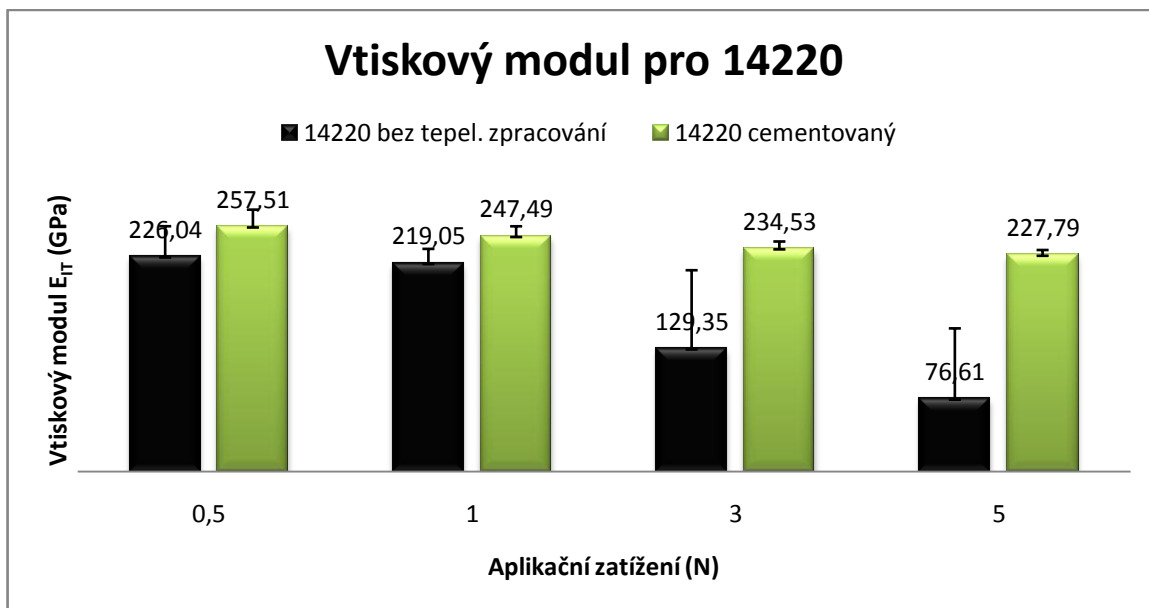
Zde můžeme vidět základní indentační křivky, které charakterizují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je síla indentace 1000,664 F a u materiálu s tepelným zpracováním je indentační síla 1001,968 F.

### 7.3 Grafické vyhodnocení pro materiál 14220

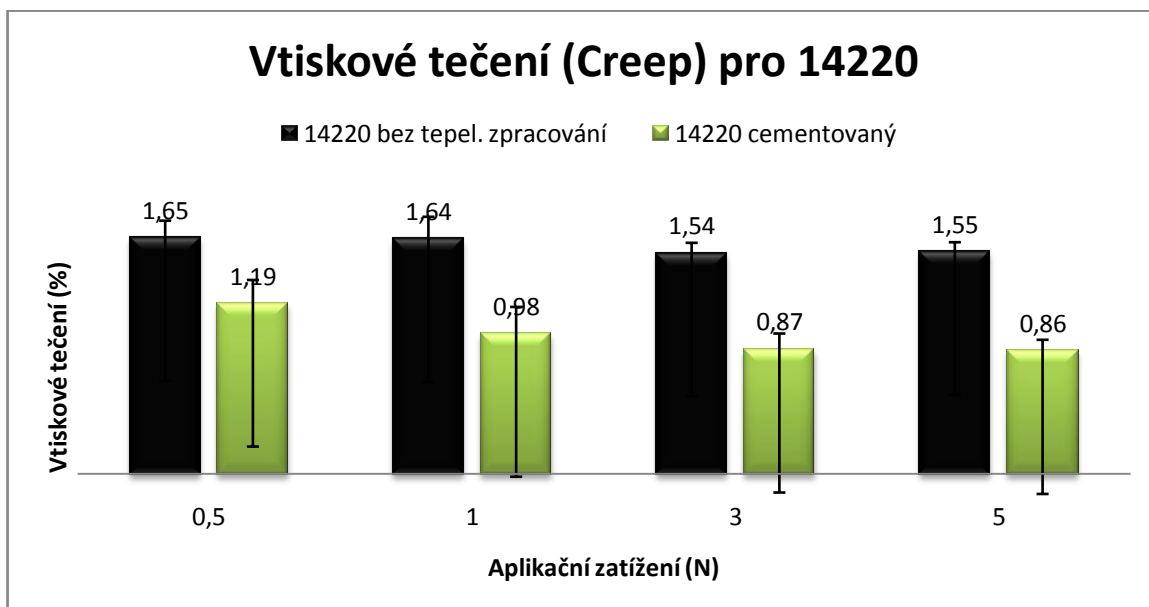


Obr. 38 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  (MPa) pro materiál 14220

U zatížení 1 N byla hodnota cementovaného vzorku o 363 % vyšší než u měřeného tělesa bez tepelného zpracování. Nejvyšší naměřená hodnota byla při zatížení 3 N (8123,18 MPa) u cementovaného měřeného vzorku. Naopak nejnižší hodnota byla změřena u materiálu bez tepelného zpracování, při zatížení 3 N (1659,05 MPa).

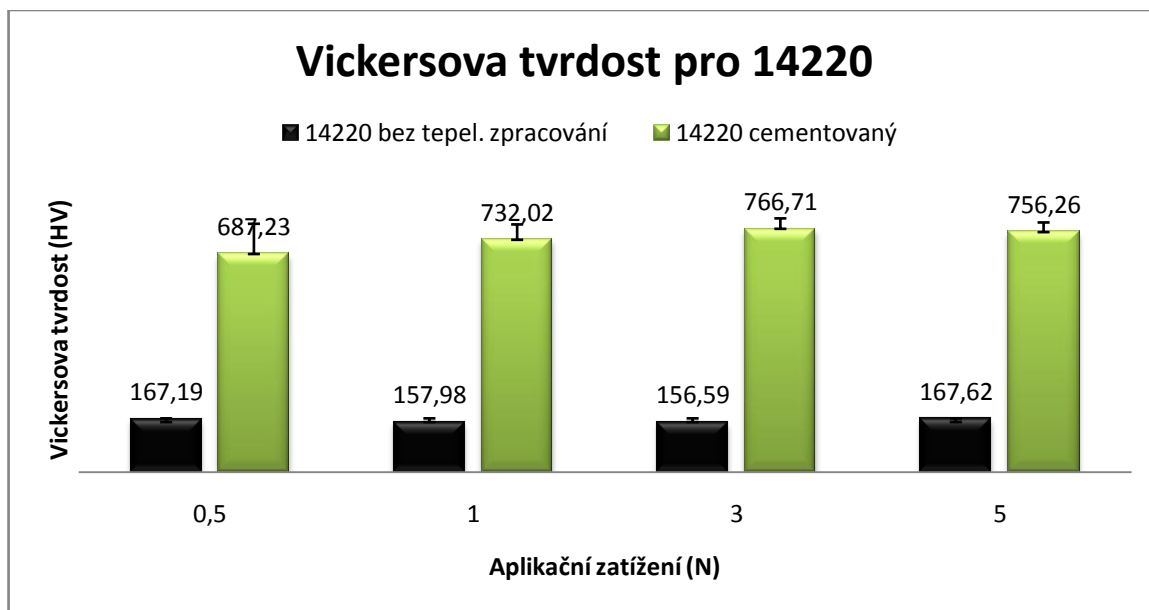
Obr. 39 Vtiskový modul  $E_{IT}$  (GPa) pro materiál 14220

Při zatížení 1 N je vtiskový modul u cementovaného materiálu o 13 % vyšší než bez tepelného zpracování. Nejvyšší naměřená hodnota byla u zatížení 0,5 N (257,51 GPa) u cementovaného vzorku, avšak nejnižší při zatížení 5 N (76,61 GPa) bez tepelného zpracování.



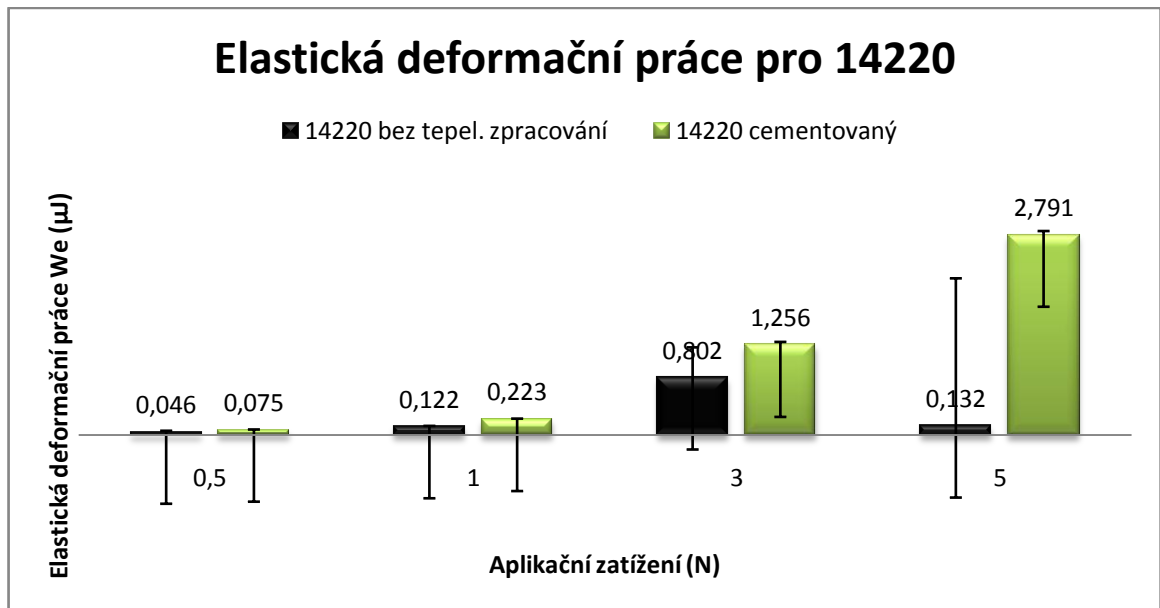
Obr. 40 Vtiskové tečení (%) pro materiál 14220

Při aplikačním zatížení 1 N byl zkušební vzorek bez tepelného zpracování o 67 % vyšší než materiál cementovaný. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskového tččení byla při zatížení 0,5 N (1,65 %) u měřeného tělesa bez tepelného zpracování. Zatímco nejnižší při zatížení 5 N (0,86 %) u cementovaného vzorku.

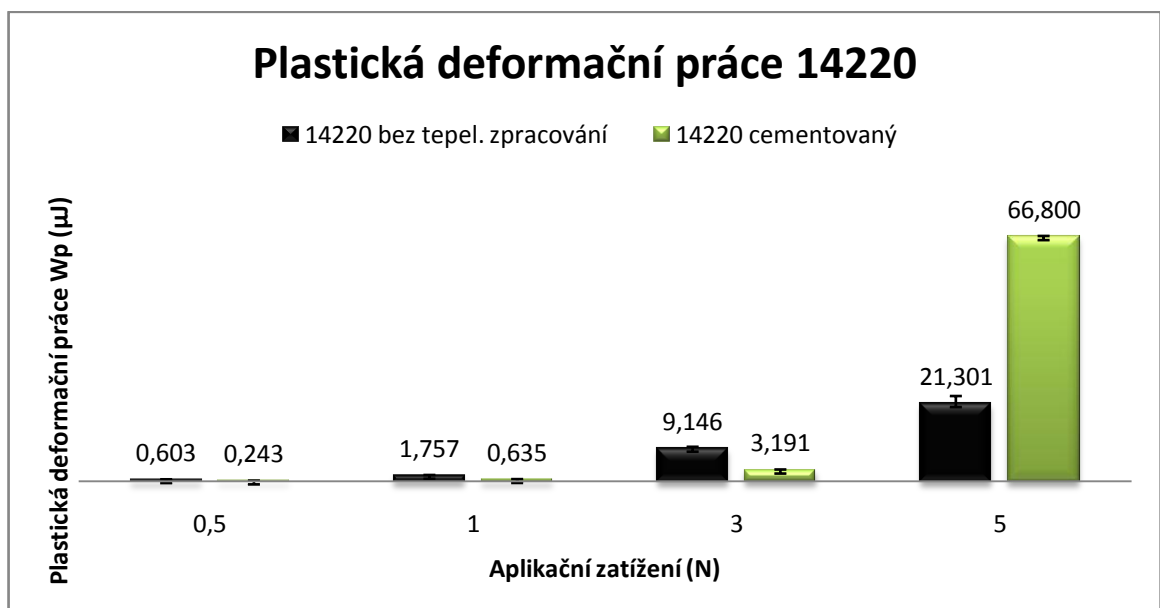


Obr. 41 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 14220

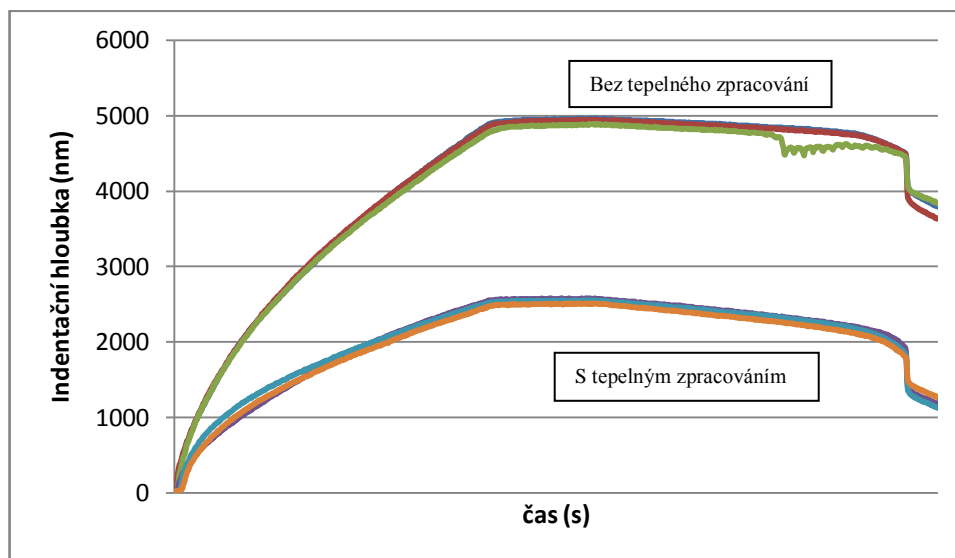
Cementovaný měřený vzorek je při zatížení 1 N vyšší o 363 % než materiál bez tepelného zpracování. Nevyšší naměřená hodnota byla u vtiskové tvrdosti při zatížení 3 N (766,71 HV) u cementovaného zkušebního tělesa. Nejnižší však bez tepelného zpracování při zatížení 3 N (156,59 HV).

Obr. 42 Elastická deformační práce  $W_e$  ( $\mu\text{m}$ ) pro materiálu 14220

Při zatížení 1 N byla naměřená hodnota vyšší o 83 % u materiálu, který byl tepelně zpracovaný cementováním. Nejvyšší dosažená elastická deformační práce byla u cementovaného vzorku při zatížení 5 N (2,791  $\mu\text{m}$ ). Naopak nejnižší při zatížení 0,5 N (0,046  $\mu\text{m}$ ) bez tepelného zpracování.

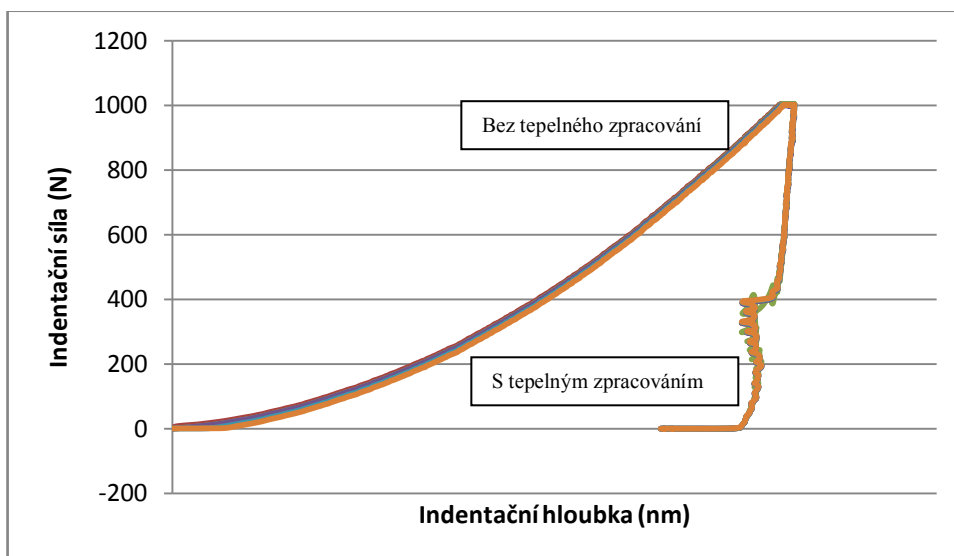
Obr. 43 Plastická deformační práce  $W_p$  ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 14220

U zatížení 1 N byla hodnota plastické deformační práce vyšší o 176 % bez tepelného zpracování. Nevyšší hodnota plastické deformační práce byla u zatížení 5 N (66,800  $\mu\text{m}$ ) na cementovaném měřeném tělísku. Naopak nejnižší plastická deformační práce byla při 0,5 N (0,243  $\mu\text{m}$ ) u zkušebního cementovaného vzorku.



Obr. 44 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N

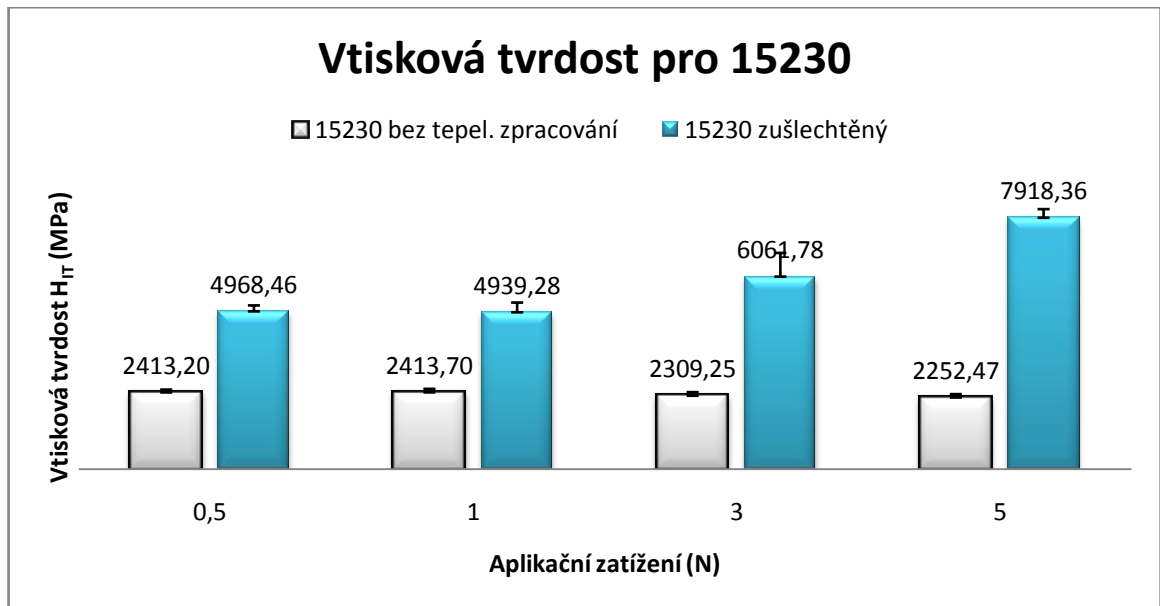
V grafu můžeme vidět základní indentační křivky, které charakterizují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je hloubka indentace 4960,283 nm a u materiálu s tepelným zpracováním indentor pronikl do hloubky 2577,640 nm.



Obr. 45 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N

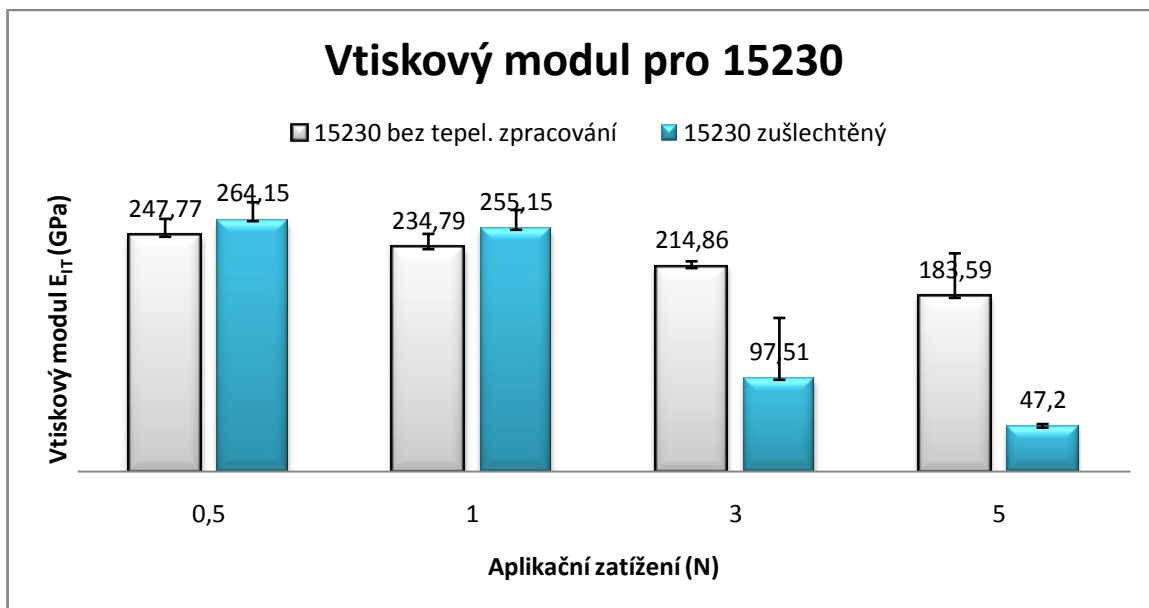
V grafu můžeme vidět základní indentační křivky, které charakterizují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je síla indentace 1003,613 F a u materiálu s tepelným zpracováním je indentační síla 1001,061 F.

#### 7.4 Grafické vyhodnocení pro materiál 15230

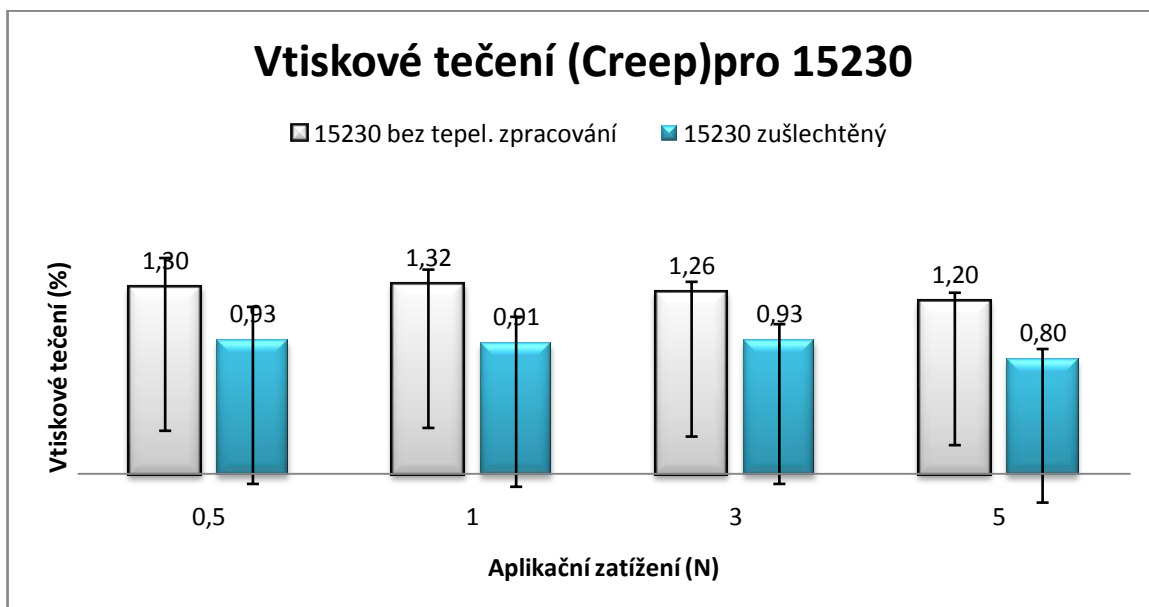


Obr. 46 Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  (MPa) pro materiál 15230

Při zatížení 1 N byla naměřená hodnota vyšší o 104 % u materiálu, který byl tepelně zpracovaný zušlechtěním. Nejvyšší dosažená vtisková tvrdost byla u zušlechtěného vzorku při zatížení 5 N (7918,36 MPa). Nejnižší hodnota byla také při zatížení 5 N (2252,47 MPa) bez tepelného zpracování.

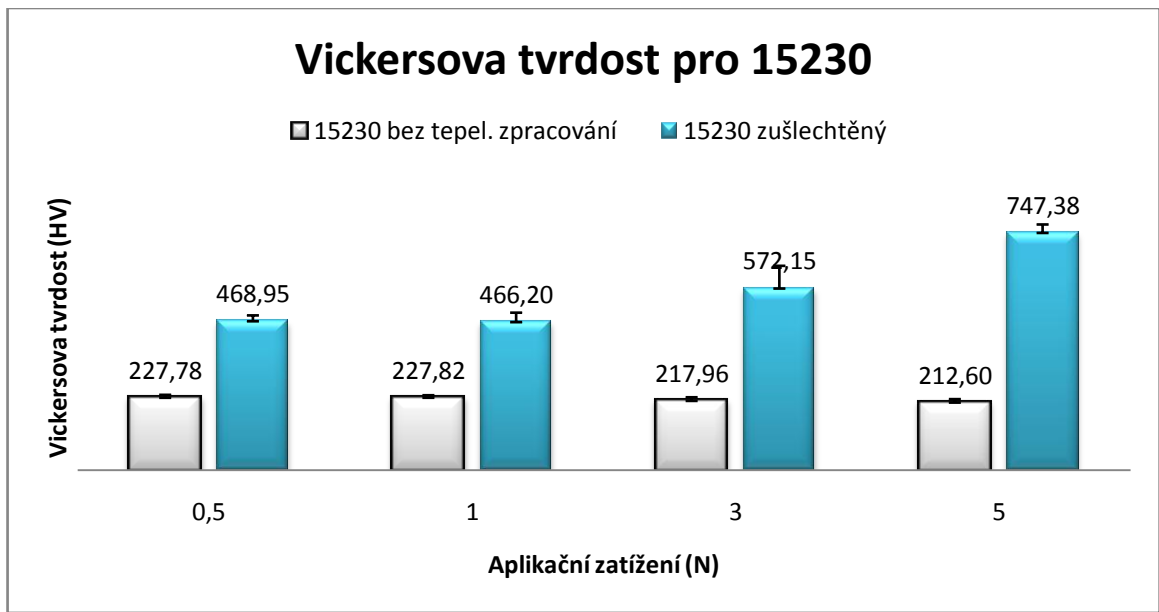
Obr. 47 Vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$  (GPa) pro materiál 15230

Při zatížení 1 N byla hodnota vyšší o 9 % u zušlechtěného vzorku. Nejvyšší naměřená hodnota vtiskového modulu pružnosti byla u zatížení 0,5 N (264,15 GPa) na zušlechtěném měřeném tělísku. Zatímco nejnižší při zatížení 5 N (47,2 GPa) taktéž zušlechtěném vzorku.



Obr. 48 Vtiskové tečení (%) pro materiál 15230

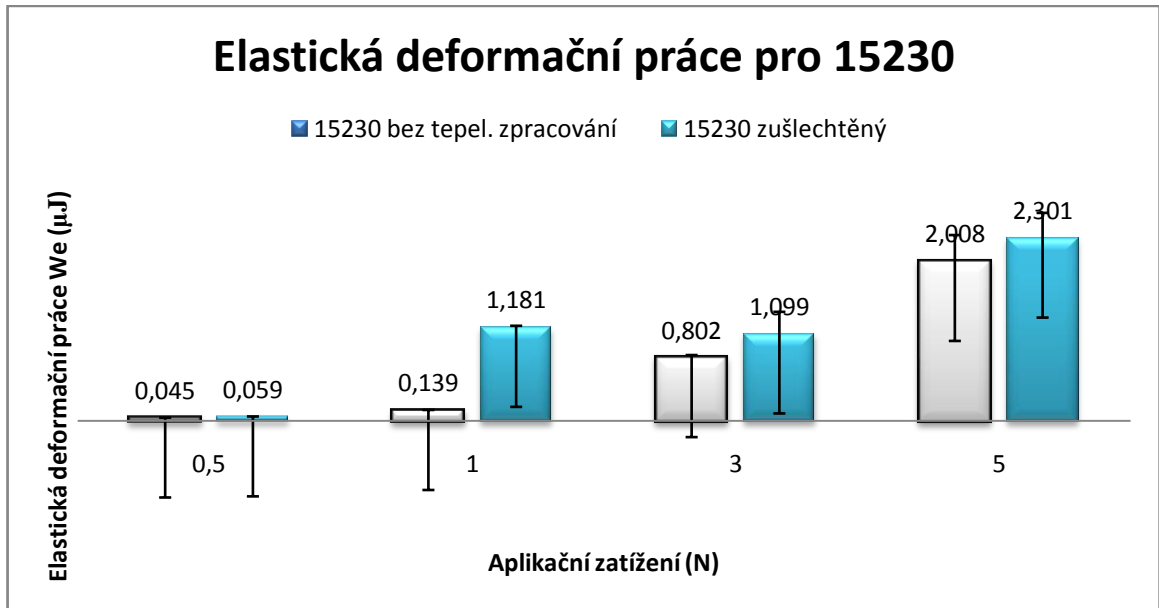
Při zatížení 1 N u měřeného tělesa bez tepelného zpracování bylo vtiskové tečení o 45 % vyšší než u zušlechtěného zkušební vzorku. Při měření vtiskového tečení byla nejvyšší naměřená hodnota pro vzorek bez tepelného zpracování při zatížení 1 N (1,32 %), zatímco nejnižší hodnota byla naměřena při zatížení 5 N (0,80%) u zušlechtěného zkušební tělesa.



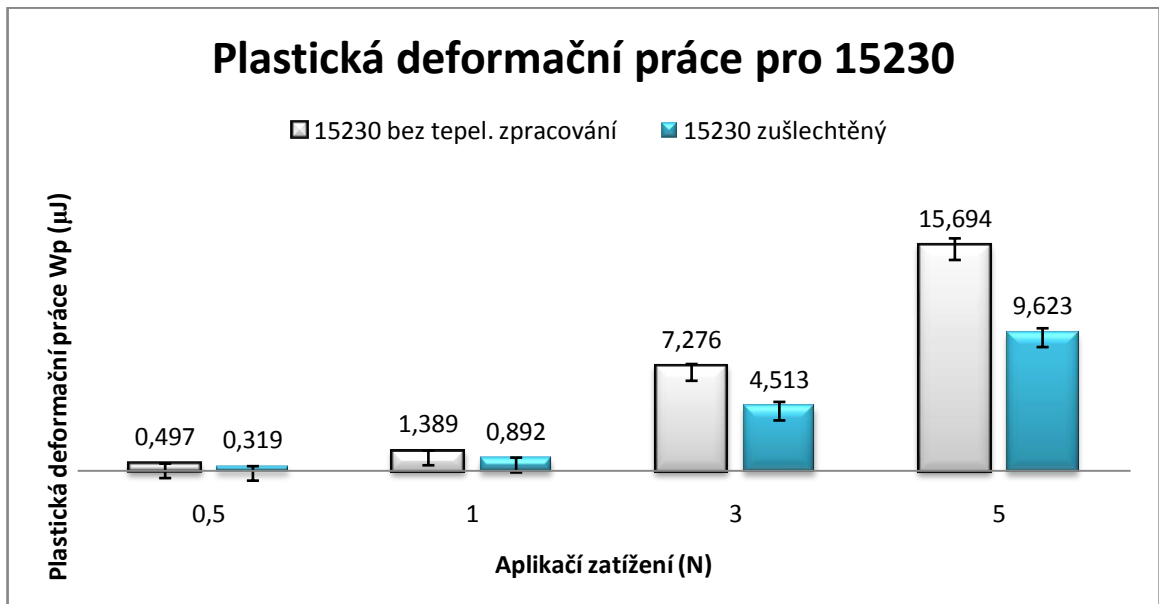
Obr. 49 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 15230

U zatížení 1 N byla Vickersova tvrdost o 104 % vyšší u zušlechtěného měřeného vzorku. Nejvyšší dosažená hodnota byla při 5 N (747,38 HV) zušlechtěném tělese, zatímco nejnižší naměřená hodnota byla při 5 N (212,60 HV) u materiálu bez tepelného zpracování.

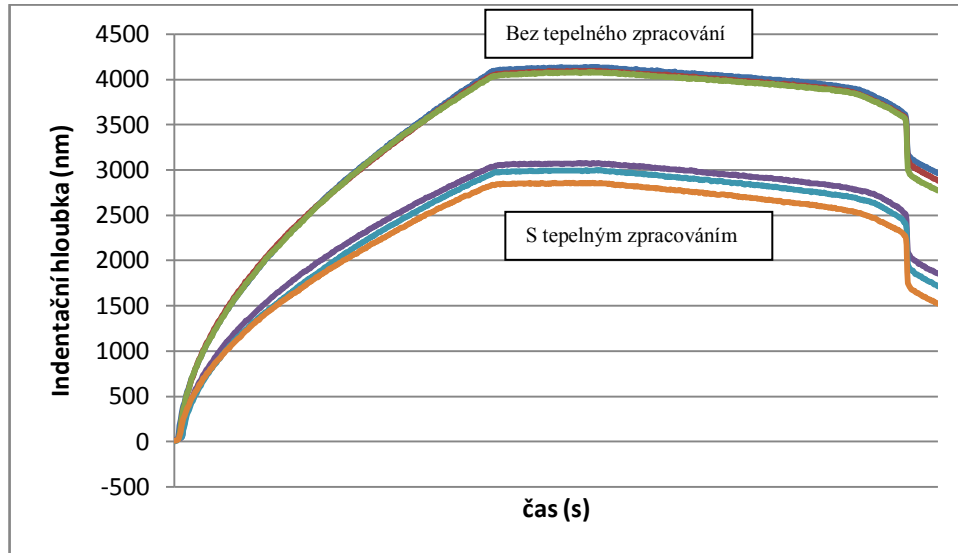


Obr. 50 Elastická deformační práce  $W_e$  ( $\mu\text{J}$ ) pro materiál 15230

Při zatížení 1 N byla hodnota vyšší o 75 % u zušlechtěného zkušební tělesa. Nejvyšší naměřená hodnota plastické deformační práce byla u zatížení 5 N (2,301  $\mu\text{m}$ ) zušlechtěném měřeném vzorku. Zatímco nejnižší při zatížení 0,5 N (0,045  $\mu\text{m}$ ) bez tepelného zpracování.

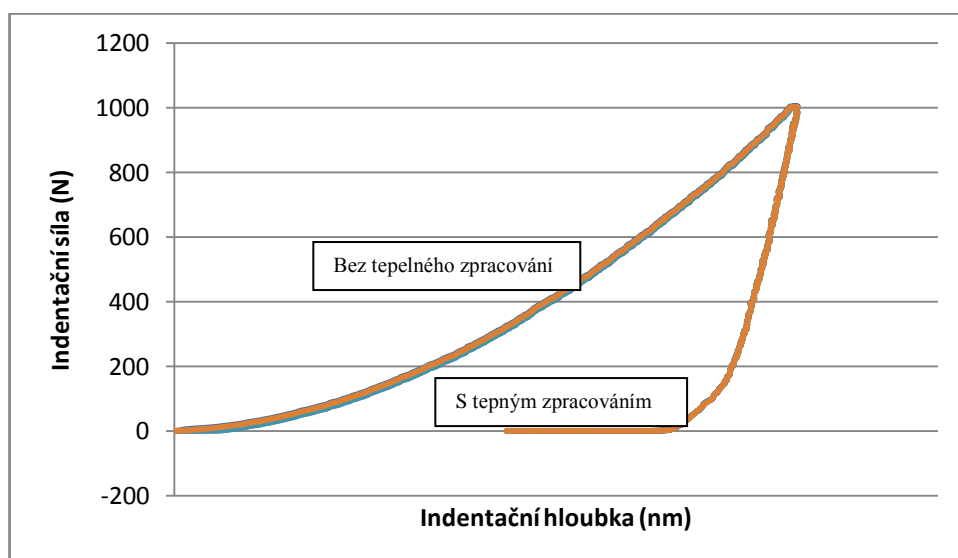
Obr. 51 Plastická deformační práce  $W_p$  ( $\mu\text{J}$ ) pro materiál 15230

Při zatížení 1 N byla hodnota větší o 55 % u zkušební vzorku bez tepelného zpracování. Nejvyšší naměřená hodnota byla při zatížení 5 N (15,694  $\mu\text{m}$ ) u měřeného tělesa bez tepelného zpracování. Nejnižší taktéž při zatížení 5 N (9,623  $\mu\text{m}$ ) avšak zušlechtěném vzorku.



Obr. 52 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N

V grafu můžeme vidět základní indentační křivky, které popisují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je hloubka indentace 4135,198 nm a u materiálu s tepelným zpracováním indentor pronikl do hloubky 3078,711 nm.



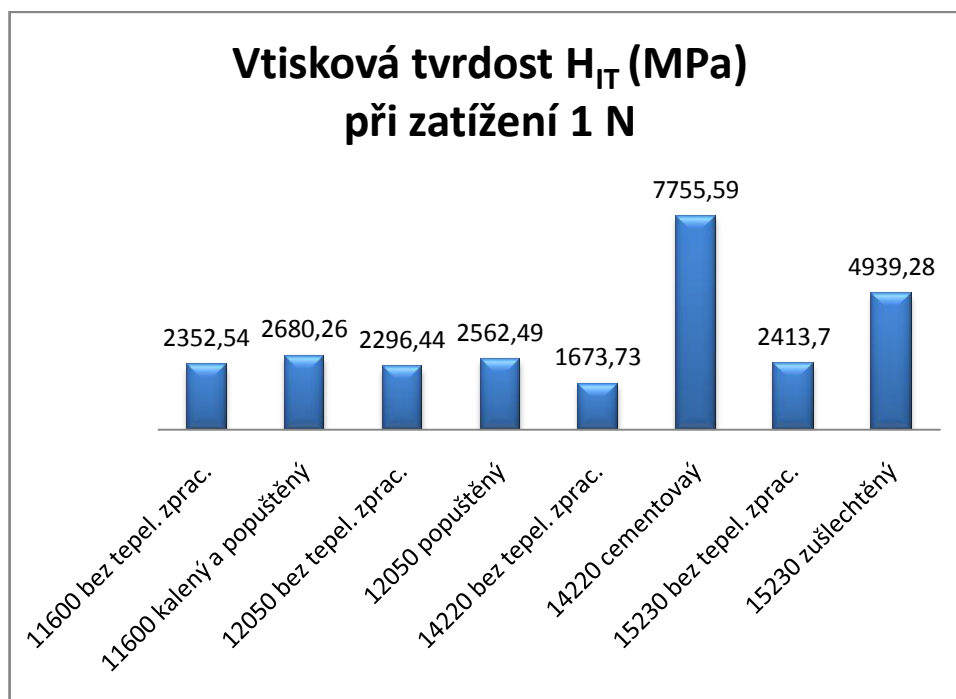
Obr. 53 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N

V grafu můžeme vidět základní indentační křivky, které popisují samotný indentační proces. U materiálu bez tepelného zpracování je síla indentace 1003,492 F a u materiálu s tepelným zpracováním je indentační síla 1000,784 F.

## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V praktické části bylo provedeno měření mikrotvrdomosti metodou DSI. Byly použity kovové zkušební vzory, které byly tepelně zpracovány a porovnány s tepelně nezpracovaným. Každý vzorek byl měřený desetkrát při 4 aplikačních zatížení, a to 0,5 N, 1 N, 3 N, 5N. Měření probíhalo v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství na UTB za pomoci mikrotvrdoměru Micro-Combi-Tester.

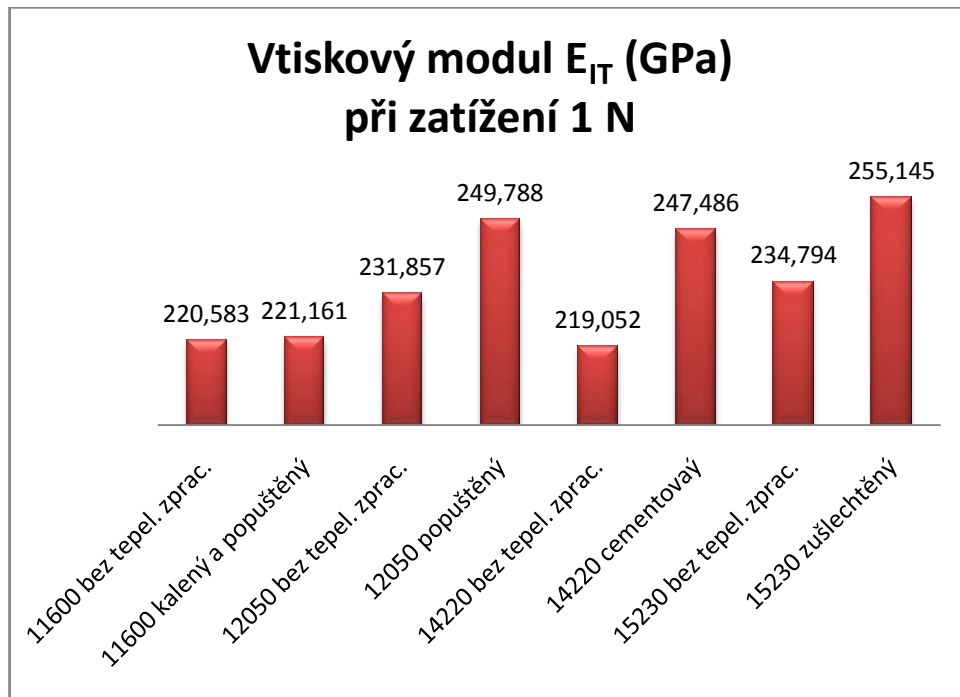
### 8.1 Vtisková tvrdost $H_{IT}$ (MPa) při zatížení 1N



Obr. 54 Vtisková tvrdost při zatížení 1 N

Z porovnání všech materiálů pro zatížení 1 N je zřejmé, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti u materiálu bez tepelného zpracování má materiál 15230 a nejnižší hodnotu vtiskové tvrdosti má materiál 14220. Zatím co u tepelně zpracovaných materiálů má nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti materiál 14220, který je cementovaný.

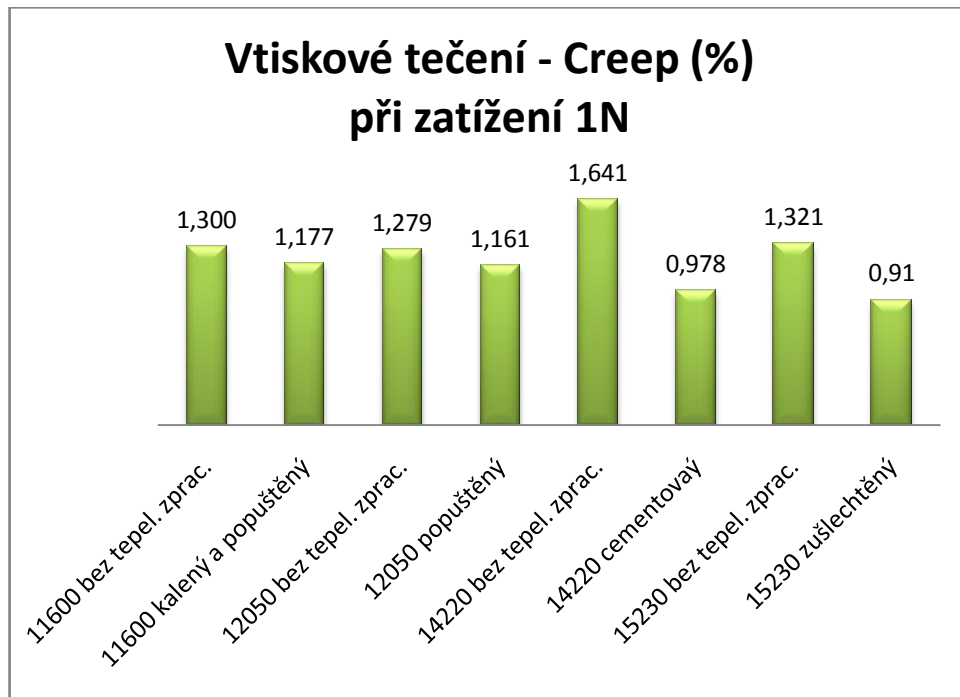
## 8.2 Vtiskový modul $E_{IT}$ (GPa) při zatížení 1N



Obr. 55 Vtiskový modul při zatížení 1 N

Při zhodnocení všech materiálů pro zatížení 1 N je patrné, že nejvyšší hodnoty vtiskového modulu u materiálu bez tepelného zpracování má materiál 15230 a nejnižší hodnotu vtiskového modulu má materiál 14220. Avšak u tepelně zpracovaných materiálů má nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti materiál 15230, který je zušlechťený.

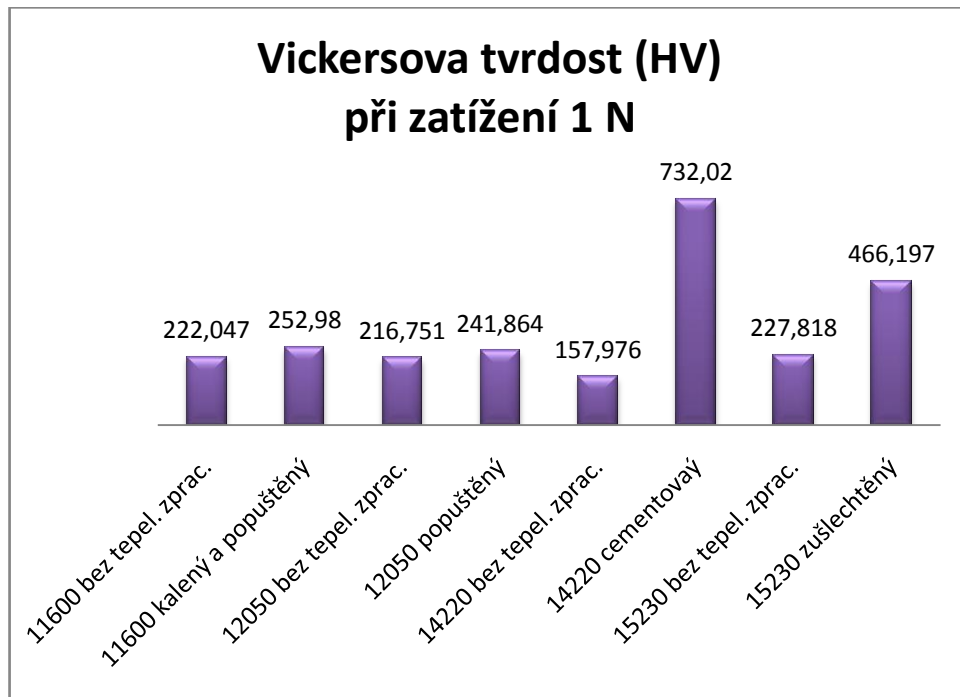
### 8.3 Vtisková tečení – Creep (%) při zatížení 1N



Obr. 56 Vtiskové tečení – Creep při zatížení 1 N

U zatížení 1 N je patrné, že nejvyšší hodnoty vtiskového tečení u materiálu bez tepelného zpracování má materiál 14220 a nejnižší hodnotu vtiskového tečení má materiál 12050. Zatím co u tepelně zpracovaných materiálů má nejvyšší hodnotu vtiskového tečení materiál 11600, který je kalený a popuštěný.

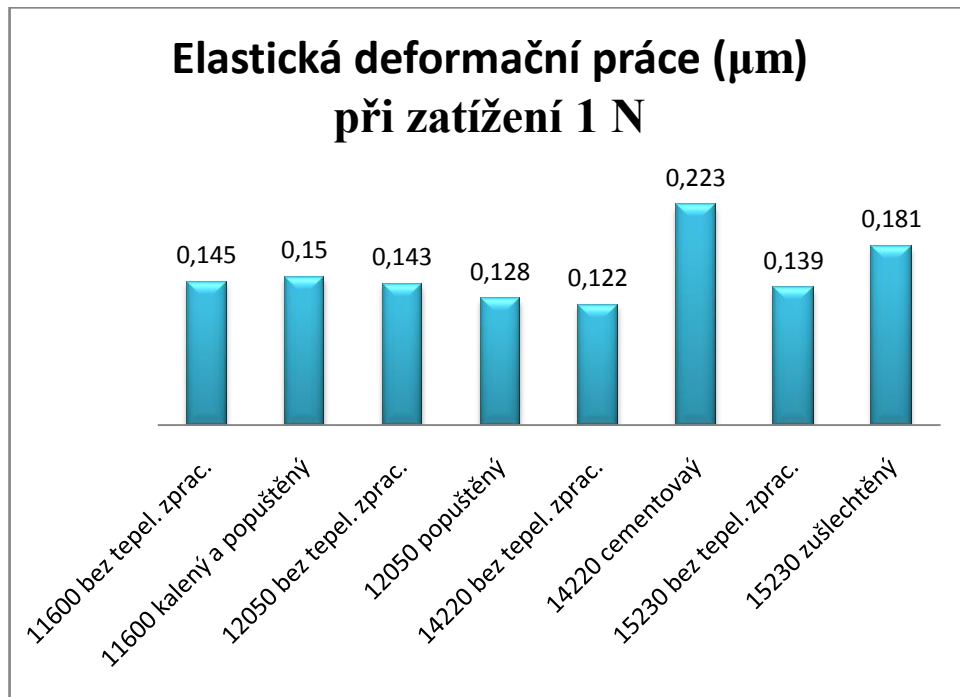
#### 8.4 Vickersova tvrdost (HV) při zatížení 1N



Obr. 57 Vickersova tvrdost při zatížení 1 N

Z porovnání všech materiálů pro zatížení 1 N je zřejmé, že nejvyšší hodnoty Vickersovi tvrdosti u materiálu bez tepelného zpracování má materiál 15230 a nejnižší hodnotu Vickersovi tvrdosti má materiál 14220. Zatím co u tepelně zpracovaných materiálů má nejvyšší hodnotu Vickersovi tvrdosti materiál 14220, který je cementovaný.

### 8.5 Elastická deformační práce ( $\mu\text{m}$ ) při zatížení 1 N

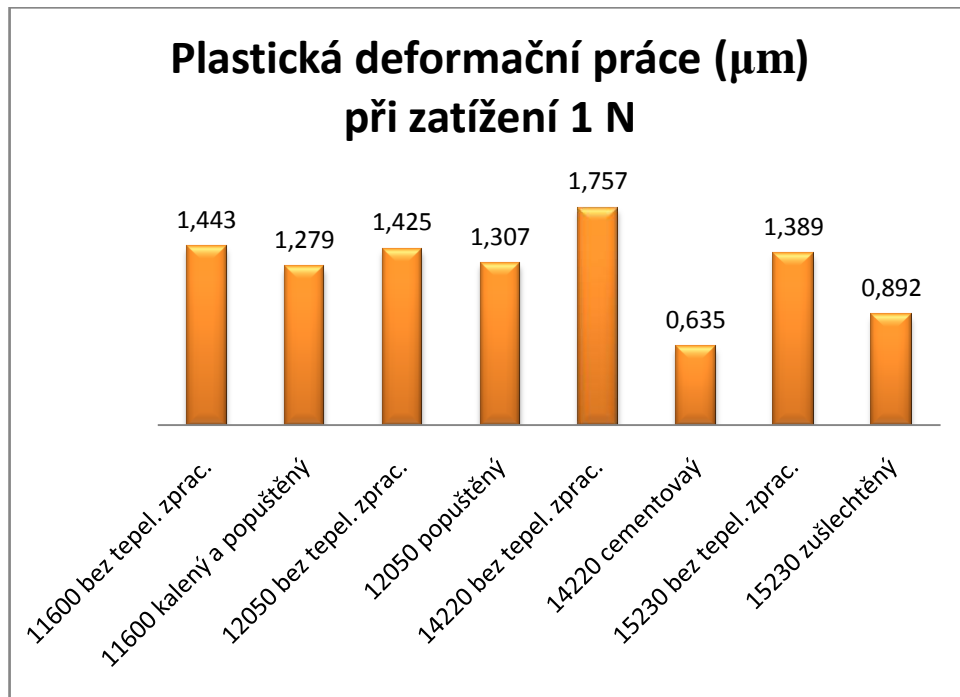


Obr. 58 Elastická deformační práce při zatížení 1 N

Při zhodnocení všech materiálů pro zatížení 1 N je patrné, že nejvyšší hodnoty elastické deformační práce u materiálu bez tepelného zpracování má materiál 11600 a nejnižší hodnotu elastické deformační práce má materiál 14220. Avšak u tepelně zpracovaných materiálů má nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti materiál 14220, který je cementovaný.



## 8.6 Plastická deformační práce ( $\mu\text{m}$ ) při zatížení 1 N



Obr. 59 Plastická deformační práce při zatížení 1 N

U zatížení 1 N je zřejmé, že nejvyšší hodnoty plastické deformační práce u materiálu bez tepelného zpracování má materiál 14220 a nejnižší hodnotu plastické deformační práce má materiál 15230. Avšak u tepelně zpracovaných materiálů má nejvyšší hodnotu plastické deformační práce materiál 12050, který je popuštěný.

## ZÁVĚR

Diplomová práce byla rozdělena na dvě části. Část teoretickou, která se zabývá rozdělením ocelí, tepelným zpracováním, tvrdostí, mikrotvrdostí a nanotvrdostí. Část praktická, řeší problematiku měření mikrotvrdosti kovů měřených vzorků. Zvolené materiály byly 11600 bez tepelného zpracování a 11600 kalený a popuštěný, 12050 bez tepelného zpracování a 12050 popuštěný, 14220 bez tepelného zpracování a 14220 cementovaný, 15230 bez tepelného zpracování a 15230 zušlechtěný. Aplikační zatížení při zkoušce mikrotvrdosti podle Vickersa byly 0,5 N, 1 N, 3 N, 5 N. Každý zkušební vzorek byl zatížen 10 x pro zvolené zatížení. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z naměřených výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti bylo dosaženo u zkušební vzorku 14220 cementovaného, naopak vzorek 14220 bez tepelného zpracování vykazoval nejnižší hodnoty.

Nejvyšší vtiskový modul jsme naměřili u materiálu 15230, který byl zušlechtěný, avšak nejnižší hodnoty dosáhl tepelně nezpracovaný materiál 14220.

Vtiskové tečení vykazoval nejvyšší hodnotu zkušební vzorek 14220 tepelně nezpracovaný, naopak nejnižší hodnotu materiál 15230 zušlechtěný.

Nejvyšší Vickersovu tvrdost jsme naměřili u zkušební vzorku 14220 cementovaného. Nejnižší hodnota byla u materiálu 14220 bez tepelného zpracování.

Z výsledků měření je zřejmé, že elastická deformační práce byla nejvyšší opět u materiálu 14220, který byl cementovaný. Nejnižší hodnota byla u 14220 bez tepelného zpracování.

Z naměřených výsledků je zřejmé, že nejvyšší hodnota plastické deformační práce byla dosažena u zkušební vzorku 14220 bez tepelného zpracování, naopak vzorek 14220 cementovaný vykazoval nejnižší hodnoty.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MACHEK, V., SODOMKA, J., Speciální kovové materiály, Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [2] MACHEK, V., SODOMKA, J., Kovy a kovové materiály, Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02568-3.
- [3] Feron: Velkoobchod s hutním materiálem [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/search.php>
- [4] HLUCHÝ M., BENEŠ J., Strojírenská technologie, Praha: SNTL, 1981.
- [5] ŠAŠINKA, R., Diplomová práce – Mikrotvrdość kovů, Zlín: UTB 2012, 82 s.
- [6] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA, V., Nauka o materiálech, Plzeň: Západočeská univerzita, 2010, ISBN 978-80-7043-874-9.
- [7] SILBERNAGEL, A., Struktura, vlastnosti, zkoušení a použité kovů, Ostrava: Kovosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [8] DUŠEK, J., Dizertační práce - Tvrdość, mikrotvrdość, nanotvrdość – čisté kovy měřené metodou DSI, Brno: Masarykova univerzita v Brně, 171 s.
- [9] MATULA, R., Diplomová práce – Mikrotvrdość kovov, Zlín: UTB 2011, 91 s.
- [10] SUCHÁČEK, P., Bakalářská práce – Měření mikrotvrdości tenkých vrstev, Zlín: UTB 2011, 76 s.
- [11] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., Strojírenská technologie 1, 1. díl. Scienta Praha 2007, ISBN 978-80-86960-26-5
- [12] PÍŠEK, F., Nauka o materiálech, SNTL Praha, 1989, ISBN 04-205-89.
- [13] MACEK, K., Tepelné zpracování kovových materiálů, Praha: ČVUT, 2008

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

ČSN	Česká státní norma.
EN	Evropská norma.
ISO	Mezinárodní norma.
F	Zatěžující síla.
HV	Mikrotvrдость podle Vickerse (Vickers).
$E_{IT}$	Vtiskový modul (GPa).
$H_{IT}$	Vtisková tvrdost (MPa).
We	Elastická deformační práce ( $\mu\text{m}$ ).
Wp	Plastická deformační práce ( $\mu\text{m}$ ).

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Schéma číselného označení.....	13
Obr. 2 Schematické znázornění cyklu tepelného zpracování .....	15
Obr. 3 Žihací teploty uhlíkových ocelí.....	16
Obr. 4 Kalicí teploty uhlíkových ocelí .....	18
Obr. 5 Lomené kalení (křivka 1) a spojitě martenzitické kalení (křivka 2) .....	19
Obr. 6 Termální kalení .....	20
Obr. 7 Izotermické bainitické zušlechťování.....	21
Obr. 8 Kalení se zmrazováním.....	21
Obr. 9 Diagram závislosti na tvrdosti na popouštěcí teplotě .....	22
Obr. 10 Část rovnovážného diagramu Fe – Fe <sub>3</sub> C s vyznačeným pásmem obvyklých cementačních teplot.....	23
Obr. 11 Průběh času a teplot při nitridování .....	24
Obr. 12 Schema průběhu tepelně mechanického zpracování 1 – VTMZ, 2 - NTMZ.....	25
Obr. 13 Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse .....	30
Obr. 14 Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoop.....	31
Obr. 15 Podstata zkoušky mikrotvrdosti dle Meincka a Attingera .....	34
Obr. 16 Podstata zkoušky mikrotvrdosti pomocí dvojkužele .....	35
Obr. 17 Plastická a pružná část práce vnikajícího procesu.....	38
Obr. 18 Porovnání odezvy materiálu na jednoosé a víceosé namáhání .....	40
Obr. 19 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO.....	44
Obr. 20 Mikrotvrdoměr Micro-Combi-Tester – pohled 1 .....	45
Obr. 21 Mikrotvrdoměr Micro-Combi-Tester – pohled 2 .....	45
Obr. 22 Vtisková tvrdost H <sub>IT</sub> (MPa) pro materiál 11600 .....	47
Obr. 23 Vtiskový modul E <sub>IT</sub> (GPa) pro materiál 11600 .....	48
Obr. 24 Vtiskové tečení (%) pro materiál 11600 .....	48
Obr. 25 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 11600.....	49
Obr. 26 Elastická deformační práce pro materiál We (μm) 11600 .....	50
Obr. 27 Plastická deformační práce pro materiál Wp (μm) 11600 .....	50
Obr. 28 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N .....	51
Obr. 29 Závislost indentační síly na indetační hloubce pro aplikační zatížení 1 N .....	51
Obr. 30 Vtisková tvrdost H <sub>IT</sub> (MPa) pro materiál 12050 .....	52
Obr. 31 Vtiskový modul E <sub>IT</sub> (GPa) pro materiál 12050 .....	53

Obr. 32 Vtiskové tečení (%) pro materiál 12050 .....	53
Obr. 33 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 12050.....	54
Obr. 34 Elastická deformační práce $W_e$ ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 12050 .....	55
Obr. 35 Plastická deformační práce $W_p$ ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 12050 .....	55
Obr. 36 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N .....	56
Obr. 37 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N .....	56
Obr. 38 Vtisková tvrdost $H_{IT}$ (MPa) pro materiál 14220 .....	57
Obr. 39 Vtiskový modul $E_{IT}$ (GPa) pro materiál 14220 .....	58
Obr. 40 Vtiskové tečení (%) pro materiál 14220 .....	58
Obr. 41 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 14220.....	59
Obr. 42 Elastická deformační práce $W_e$ ( $\mu\text{m}$ ) pro materiálu 14220 .....	60
Obr. 43 Plastická deformační práce $W_p$ ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 14220 .....	60
Obr. 44 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N .....	61
Obr. 45 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N .....	61
Obr. 46 Vtisková tvrdost $H_{IT}$ (MPa) pro materiál 15230 .....	62
Obr. 47 Vtiskový modul pružnosti $E_{IT}$ (GPa) pro materiál 15230.....	63
Obr. 48 Vtiskové tečení (%) pro materiál 15230 .....	63
Obr. 49 Vickersova tvrdost (HV) pro materiál 15230.....	64
Obr. 50 Elastická deformační práce $W_e$ ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 15230 .....	65
Obr. 51 Plastická deformační práce $W_p$ ( $\mu\text{m}$ ) pro materiál 15230 .....	65
Obr. 52 Závislost indentační hloubky na čase pro aplikační zatížení 1 N .....	66
Obr. 53 Závislost indentační síly na indentační hloubce pro aplikační zatížení 1 N .....	66
Obr. 54 Vtisková tvrdost při zatížení 1 N.....	68
Obr. 55 Vtiskový modul při zatížení 1 N .....	69
Obr. 56 Vtiskové tečení – Creep při zatížení 1 N .....	70
Obr. 57 Vickersova tvrdost při zatížení 1 N .....	71
Obr. 58 Elastická deformační práce při zatížení 1 N .....	72
Obr. 59 Plastická deformační práce při zatížení 1 N.....	73

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Mezní hodnota prvků.....	12
Tab. 2 Mezní hodnota prvků.....	12
Tab. 3 Tvrdost dle Vickerse – oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály .....	29
Tab. 4 Zkušební zatížení pro zkoušky tvrdosti dle Vickerse.....	31
Tab. 5 Zkušební zatížení dle Knoop.....	32
Tab. 6 Zkušební zatížení dle Hanemanna.....	34