

Měření mikrotvrdosti tepelně zpracovaných ocelí

Petr Nedbal

Bakalářská práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Nedbal**

Osobní číslo: **T12145**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření mikrotvrdosti 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 BP

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

30. ledna 2015

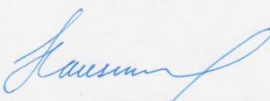
Termín odevzdání bakalářské práce:

22. května 2015

Ve Zlíně dne 9. února 2015


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: NEDBAL PETR

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ 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, považuji 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 15. 5. 2015

Nedbal

¹⁾ 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.

²⁾ 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).

³⁾ 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 díla:

(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 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 přihlídně k větší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Zaměření této bakalářské práce je na měření mikrotvrlosti tepelně zpracovaných ocelí. První část práce je věnována rozdělení ocelí, druhům tepelného zpracování, tvrdosti a instrumentované zkoušce DSI. Praktická část se zabývá měřením různých druhů kovových materiálů, které byly tepelně a chemicko-tepelně zpracovány. Mechanické vlastnosti byly měřeny pomocí metody DSI. Výsledkem měření jsou grafy, ze kterých lze vyčíst jednotlivé hodnoty vtiskové tvrdosti, tvrdosti dle Vickerse, vtiskového modulu a deformační práce.

Klíčová slova: Tvrdost, Ocel, Vickers, DSI, Tepelné zpracování, Chemicko-tepelné zpracování.

ABSTRACT

The aim of this bachelor's work is measuring microhardness of heat treated steel. First part of the work is based on distribution of steel, kinds of heat treatment, hardness and instrumented test of hardness DSI. Practical part is based on measuring of metal materials which were thermochemical treated. The results are graphs from which we can read single values of indentation hardness, Vickers's hardness, indentation module and deforming work.

Keywords: Microhardness, steel, thermochemical treatment,

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu panu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za ochotu, odborné rady a připomínky při měření a zpracování této bakalářské práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OCEL	12
1.1 ROZDĚLENÍ OCELÍ	12
1.1.1 Nelegované oceli	12
1.1.2 Legované oceli	12
1.2 OZNAČOVÁNÍ OCELÍ	13
1.2.1 Ocel třídy 10.....	13
1.2.2 Ocel třídy 11.....	14
1.2.3 Oceli třídy 12 – 16.....	14
1.2.4 Ocel třídy 17.....	14
1.2.5 Ocel třídy 18.....	14
1.2.6 Ocel třídy 19.....	14
1.2.7 Význam doplňkových čísel	14
2 TEPelnÉ ZPRACOVÁNÍ	15
2.1 ŽIHÁNÍ	16
2.1.1 Žihání bez překrystalizace.....	16
2.1.2 Žihání s překrystalizací	17
2.2 KALENÍ	18
2.2.1 Způsoby kalení	18
2.3 POPOUŠTĚNÍ	20
2.4 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	21
2.4.1 Cementování	21
2.4.2 Nitridování	21
2.4.3 Boridování.....	22
2.5 TEPelnĚ MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ.....	22
3 TVRDOST	23
3.1 MIKROTVRDOST	24
3.2 DRUHY ZKOUŠEK MIKROTVRDOSTI	25
3.2.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse.....	25
3.2.2 Zkouška tvrdosti dle Knoopu	26
3.2.3 Mikrotvrdość dle Berkoviče	27
3.2.4 Zkouška tvrdosti dle Brinella	27
3.2.5 Zkouška tvrdosti dle Rockwella.....	28
4 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI	29
4.1 STANOVENÍ TVRDOSTI.....	29
4.2 STANOVENÍ VTISKOVÉHO MODULU	29
4.3 STANOVENÍ VTISKOVÉHO TEČENÍ	30
4.4 STANOVENÍ PLASTICKÉ A PRUŽNÉ ČÁSTI PRÁCE VNIKACÍHO PROCESU.....	30
4.5 INDENTAČNÍ KŘIVKY	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	35

6	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	36
6.1	POUŽITÉ TYPY MATERIÁLŮ.....	36
6.2	ŘEZÁNÍ VZORKŮ.....	36
6.3	ZALISOVÁNÍ VZORKŮ.....	37
6.4	LEŠTĚNÍ VZORKŮ.....	38
6.5	MĚŘENÍ TVRDOSTI METODOU DSI.....	39
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	40
7.1	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ.....	40
7.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROMECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POVRCHU VZORKU.....	40
7.2.1	Zatížení 0,5N.....	41
7.2.2	Zatížení 2N.....	43
7.2.3	Zatížení 5N.....	46
7.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ MIKROMECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V PRŮŘEZU.....	49
7.3.1	Cementování a kalení.....	49
7.3.2	Cementování.....	51
7.3.3	Kalení a popouštění.....	53
7.3.4	Nitridování.....	55
7.3.5	Povrchové kalení.....	57
8	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	60
8.1	POROVNÁNÍ VTISKOVÉ TVRDOSTI PŘI RŮZNÝCH ZATÍŽENÍCH.....	60
8.2	POROVNÁNÍ VTISKOVÉ TVRDOSTI PRO JEDNOTLIVÉ DRUHY TEP. ZPRACOVÁNÍ.....	61
	ZÁVĚR.....	62
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	65
	SEZNAM TABULEK.....	67

ÚVOD

Tvrдость materiálu je jedna z jeho důležitých vlastností. Tvrдость má vliv na odolnost materiálu proti opotřebení a otěru a je velmi důležitá u řezných nástrojů. Tvrдость kovových materiálů lze ovlivnit tepelným zpracováním. Nevýhodou tvrdých materiálů je jejich křehkost.

Tvrдость je velmi důležitá hlavně u ocelí. Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších legujících prvků, která obsahuje méně než 2,14 % uhlíku. Oceli jsou rozděleny do skupin podle chemického složení, podle struktury a mechanických a fyzikálních vlastností. Dle použití se oceli dělí na nástrojové, konstrukční, oceli na pružiny, korozivzdorné, žáruvzdorné a další.

Tepelným zpracováním kovů se rozumí postup, při kterém se řízeně mění teploty a někdy také chemické složení kovu. Účelem tepelného zpracování je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. Spočívá v ohřevu kovu na danou teplotu, poté výdrž na této teplotě a následné ochlazení. Chemicko-tepelné zpracování spočívá v ohřevu a následném sycení povrchu látkou, která zvyšuje v povrchové vrstvě tvrdost, jako je například uhlík.

Na měření tvrdosti se používá více metod, jako jsou Brinellova zkouška, Vickersova zkouška, instrumentovaná zkouška DSI a další. Jednotlivé zkoušky se liší tvarem vnikacího tělesa (indentoru), zátěžnou silou a způsobem vyhodnocení dané zkoušky. Zkoušky tvrdosti patří mezi zkoušky nedestruktivní, i když při nich vzniká trvalá deformace (vryp).

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OCEL

Dle evropské normy ČSN EN 10020 (42 0002) je ocel definována jako slitina železa s obsahem uhlíku nižším než 2,14%. Obsahuje i další prvky přičemž hmotnostní podíl železa ve slitině je větší než hmotnostní podíl kteréhokoliv jiného prvku. [1]

1.1 Rozdělení ocelí

Oceli se dle chemického složení dělí na legované a nelegované. Obsah prvků nesmí překročit mezní hodnoty uvedené v tabulkách.

Tab. 1 Mezní hodnoty prvků

Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	Lantanidy	Mn	Mo	Nb
0,3	0,0008	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1	1,65	0,08	0,3
Ni	Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Ostatní
0,3	0,4	0,1	0,6	0,1	0,05	0,1	0,3	0,05	0,1

1.1.1 Nelegované oceli

Jsou to oceli, u kterých žádný z prvků nepřekročí svou mezní hodnotu.

Rozdělení nelegovaných ocelí:

- Nelegované jakostní - jsou pro ně stanoveny požadavky jako tvářitelnost, houževnatost nebo velikost zrna. Nejsou vhodné pro tepelné zpracování.
- Nelegované ušlechtilé – mají vyšší stupeň čistoty, jsou vhodné pro tepelná zpracování.

1.1.2 Legované oceli

Jsou to oceli, u kterých alespoň jeden prvek překročí mezní hodnotu.

Rozdělení legovaných ocelí:

- Legované jakostní oceli - jsou pro ně stanoveny požadavky jako tvářitelnost, houževnatost nebo velikost zrna. Nejsou vhodné pro tepelné zpracování. Patří sem:
 - legované oceli na kolejnice

- oceli legované pouze Cu
 - oceli pro elektrotechniku legované Si a Al
 - oceli pro náročné použití válcované za tepla
- Legované ušlechtilé oceli – jsou to zbylé oceli neuvedené v legovaných jakostních. Zahrnují legované konstrukční oceli, nástrojové oceli, rychlořezné oceli a oceli pro valivá ložiska.[1]

1.2 Označování ocelí

Dle ČSN jsou oceli označovány barevně a číselně. Číselné označení se skládá z pětimístné číselné značky a dvou doplňkových číslic. První číslice je 1 a vyjadřuje, že jde o ocel tvářenou a druhá ve spojení s první číslicí určuje jakostní třídu oceli, která udává druh oceli a její základní vlastnosti. [4]



Obr. 1 Schéma číselného značení

1.2.1 Ocel třídy 10

Jsou to nejlevnější nelegované konstrukční oceli. Nemají záruku čistoty a chemického složení. Jsou dobře obrobitelné a svařitelné. Vyrábí se z nich například hřebíky a kari sítě. Dvojčíslí na třetí a čtvrté pozici v číselné značce oceli vyjadřuje u konstrukčních ocelí minimální pevnost v tahu v MPa.

1.2.2 Ocel třídy 11

Jsou to nelegované konstrukční oceli s předepsaným obsahem uhlíku, fosforu, síry, zaručenou pevností, tažností a mezí kluzu. Jejich pevnost se pohybuje od 280 do 900 MPa a závisí na obsahu uhlíku. Do této skupiny patří tzv. automatové oceli, které jsou snadno obrobitelné. Třetí a čtvrtá číslice v číselné značce oceli vyjadřuje u ocelí nejmenší pevnost v tahu v MPa s výjimkou automatových ocelí, kde třetí číslice označuje ocel vhodnou k obrábění a čtvrtá číslice charakterizuje střední obsah uhlíku v desetínách procenta.

1.2.3 Oceli třídy 12 – 16

Jsou to legované oceli. U ocelí třídy 12 je třetí číslice v číselné značce oceli 0. U ocelí tříd 13 až 16 vyjadřuje třetí číslice součet středních obsahů legovacích prvků v procentech. Čtvrtá číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku v desetínách procenta.

1.2.4 Ocel třídy 17

Třetí číslice v číselné značce oceli třídy 17 udává druh legování oceli jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou legovacích prvků. Čtvrtá číslice vyjadřuje obsah hlavních legovacích prvků Cr, Mn a Ni. Dělí se do dvou skupin a to na korozivzdorné, které se používají na chirurgické nástroje a žáruvzdorné například na lopatky turbín.

1.2.5 Ocel třídy 18

Jde o tzv. slinuté karbidy, které se značí písmeny P, M, K. Používají se jako nástrojové materiály.

1.2.6 Ocel třídy 19

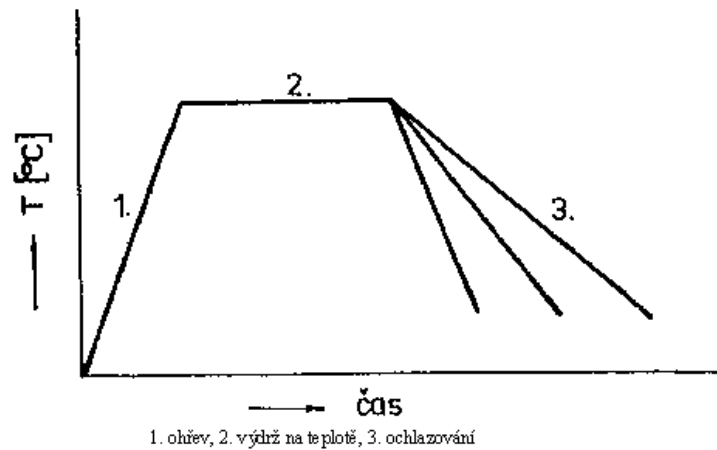
Jedná se o nástrojové oceli. Dělí se na uhlíkové, slitinové a rychlořezné. Třetí číslice v základní značce vyjadřuje druh legování oceli legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků. Čtvrtá číslice u legovaných ocelí třídy 19 má význam pořadový.[6]

1.2.7 Význam doplňkových číslic

První doplňková číslice určuje druh tepelného zpracování a druhá doplňková číslice stupeň přetváření.

2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Tepelné zpracování spočívá v zahřátí daného materiálu na požadovanou teplotu, výdrž na této teplotě a poté se různě rychle ochlazuje, čímž dochází ke změně struktury a získají se požadované vlastnosti.



Obr. 2 Schematické znázornění průběhu tepelného zpracování

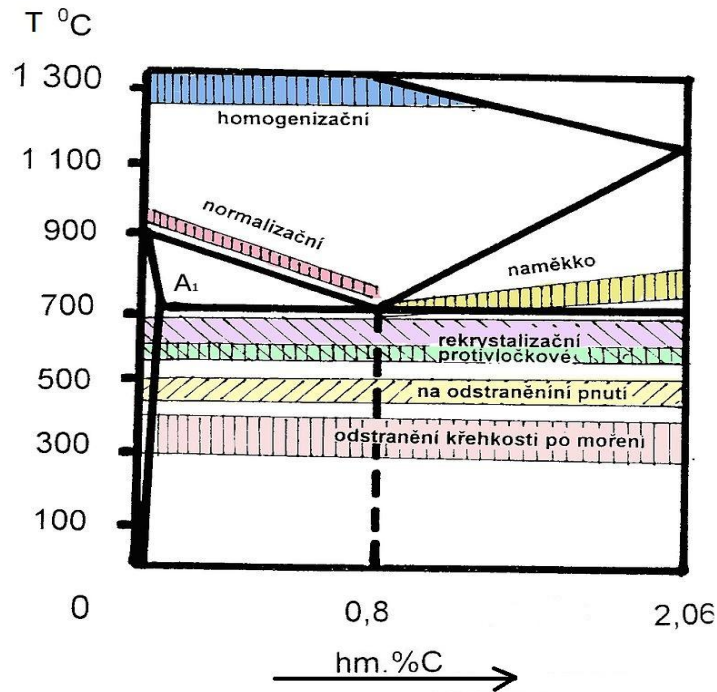
Podle výšky teploty, výdrži na této teplotě a druhu ochlazování rozlišujeme tyto druhy tepelného zpracování:

- Žihání
- Kalení
- Popouštění
- Chemicko-tepelné zpracování

Druh tepelného zpracování se volí podle druhu použitého materiálu. [5]

2.1 Žihání

Spočívá v ohřevu na danou žihací teplotu, setrvání na této teplotě a poté ochlazení.



Obr. 3 Žihací teploty u uhlíkových ocelí

2.1.1 Žihání bez překrytalizace

Během žihání bez rekrytalizace dochází pouze ke změnám ve struktuře jako je změna morfologie částic, růst zrna, rekrytalizace a zotavení. Horní hranicí teplotní oblasti je kritická teplota A_1 . Mezi žihání bez překrytalizace patří:

a) **Žihání ke snížení vnitřních pnutí** – používá se po svařování, rychlém ochlazení předmětů, po tváření za tepla ukončením za teplot blízkých rekrytalizačním, po místním ohřevu při tváření za tepla, po některých způsobech obrábění apod. Žihací teploty se pohybují v rozmezí 600 – 650 °C, výdrž na této teplotě je v řádu hodin. Ochlazení probíhá v peci na teplotu 200 °C, aby nevznikala nová pnutí. Potom následuje ochlazení na vzduchu.

b) **Žihání rekrytalizační** – používá se k odstranění zpevnění po tváření za studena a obnovení tvárnosti materiálu kdy vlivem rekrytalizace se mění vazby mezi atomy, ale krystalická mřížka se nemění. Používá se jako mezioperační žihání při tváření ocelí za stu-

dena. Žihací teploty jsou v rozmezí 550 – 700 °C. Doba trvání na této teplotě se pohybuje v rozmezí 1-5 hodin.

c) **Žihání na měkko** – Provádí se ke zlepšení obrobitelnosti. Vlivem ohřevu v blízkosti teploty A_1 dojde ke změně morfologie perlitu, kdy se lamelární perlit mění v lépe obrobitelný globulární perlit. Podmínky žihání se řídí chemickým složením oceli – uhlíkové a nízkolegované konstrukční oceli se žihají okolo teploty 680 – 720 °C po dobu 4 hodin, poté následuje velmi pomalé ochlazování v peci. U nadeutektoidních ocelí se ohřev provádí nad teplotu přeměny, poté se ochlazuje velmi pomalu na teplotu 600 °C a poté se dochladí na vzduchu.

d) **Žihání protivločkové** – používá se pro odstranění škodlivého vlivu vodíku u některých slitinových ocelí. Rozpustnost vodíku v oceli klesá s klesající teplotou, tak se protivločkové žihání provádí v teplotní oblasti existence fáze α při 650 °C. Doba žihání je dlouhá a závisí na velikosti průřezu polotovaru. Až do 200 °C musí být doba ochlazování co nejpomalejší.

2.1.2 Žihání s překrystalizací

Žihání s překrystalizací se provádí ohřevem nad teploty fázových přeměn, kdy dochází k průběhu úplné nebo částečné austenitizace. Žihání s rekrystalizací odstraňuje strukturní nepravidlosti, které vznikly důsledkem předcházejících technologických operací. Správnou volbou ochlazovacích podmínek lze získat požadovanou strukturu. Důležité je sledovat ochlazování pod teplotou perlitické přeměny, aby nedošlo ke vzniku tepelných vnitřních pnutí. Je proto třeba ochlazovat pomalu až do teplot 400 – 200°C .

a) **normalizační žihání** – Ohřev se provádí 30 – 50 °C nad teplotou A_3 , resp. A_{cm} . Ochlazuje se nejčastěji na vzduchu, u velkých dílů v olejové lázni. Výdrž na této teplotě se řídí tloušťkou stěny. Normalizačním žiháním se odstraňují nerovnoměrnosti struktury u výkovků, svařovaných polotovarů a u odlitků z uhlíkových ocelí.

b) **homogenizační žihání** – provádí se u ingotů ze slitinových i uhlíkových ocelí před tvářením za tepla nebo jiném tepelném zpracování. Je určeno k vyrovnání chemického složení vzniklého při tuhnutí. Žihací teploty se pohybují obvykle v rozmezí 1100 až 1250 °C. Výdrž na teplotě bývá podle velikosti polotovaru a druhu oceli 5 až 15 hodin.

c) **izotermické žihání** – spočívá v rychlém ochlazení austenitizované oceli na teplotu izotermického rozpadu austenitu a ochlazování na vzduchu po ukončení přeměny. Účel izotermického žihání je snížení pevnosti a zlepšení obrobitelnosti u legovaných ocelí. [6]

2.2 Kalení

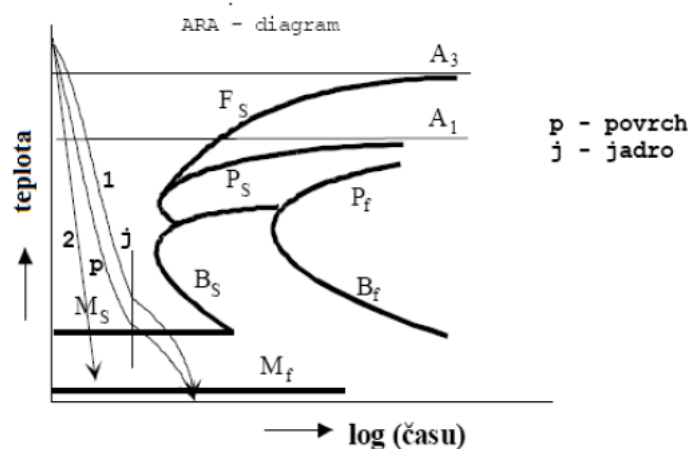
Spočívá v pomalém ohřátí oceli na kalící teplotu a v rychlém ochlazení. Cílem je dosáhnout zvýšené tvrdosti oceli. U uhlíkových ocelí jsou kalící teploty o 30 – 50 °C vyšší než teploty dané v rovnovážném diagramu čarou GSK, u slitinových ocelí jsou kalící teploty až 1320 °C. [4]

2.2.1 Způsoby kalení

U bainitického a martenzitického kalení se k dosažení požadované struktury používá nepřetržitě ochlazování, ale i další způsoby s přerušovaným ochlazováním, které snižuje úroveň vnitřního pnutí a omezuje nebezpečí deformace kaleného předmětu. Při plynulém ochlazování se kalí do studené lázně (lázeň s pokojovou teplotou), při přerušovaném ochlazování se používají tepelné lázně.

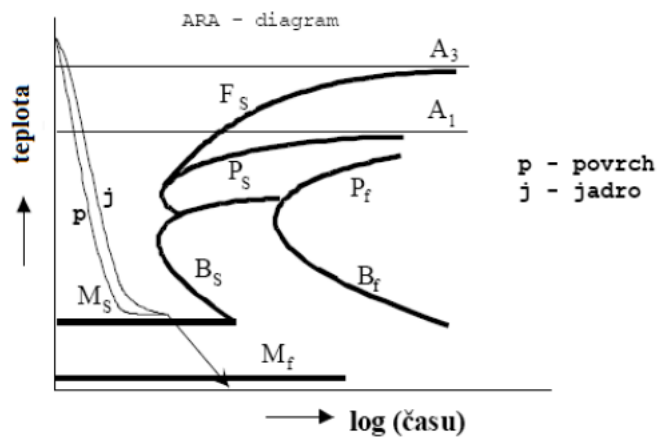
a) **martenzitické kalení do studené lázně** – nejčastěji používaný způsob kalení. Takto zakalené předměty se dále popouštějí. Uhlíkové oceli se kalí do vody, nízkolegované a středně legované oceli se kalí do oleje. Velký rozdíl teplot mezi kaleným předmětem a lázní spolu s objemovými změnami vede ke vzniku velkých vnitřních pnutí. Tomu jde zabránit přerušovaným ochlazováním u lomeného kalení nebo termálního kalení.

b) **lomené kalení** – součást je intenzivně ochlazována ve vodě na teplotu M_s , aby byla potlačena perlitická přeměna. Poté ochlazování pokračuje v olejové lázni, kde proběhne martenzitická přeměna. Toto kalení představuje kombinace chladících prostředí olej – vzduch nebo voda – vzduch. U přerušovaného kalení se musí správně určit okamžik pro přenos součásti do dalšího kalícího prostředí. Přerušované kalení je nutné u rozměrnějších a tvarově složitějších součástí, které vyžadují vysokou rychlost ochlazování v oblasti perlitické přeměny.



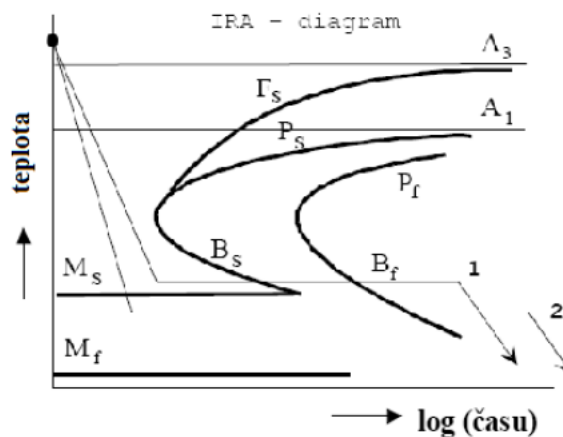
Obr. 4 Lomené (1) a martenzitické (2) kalení

c) **termální kalení** – součást je ochlazována v lázni, která leží nad teplotou M_s kalené oceli. Následuje výdrž na teplotě. Během výdrže se vyrovná teplota v celém průřezu a při dalším ochlazení na vzduchu proběhne martenzitická přeměna. U termálního kalení je vnitřní pnutí menší než u přímého kalení do studené lázně. I po termálním kalení se předměty popouštějí. Termální kalení je vhodné u výrobků z ocelí nástrojových, nebo u menších a tvarově složitých výrobků z uhlíkových ocelí.



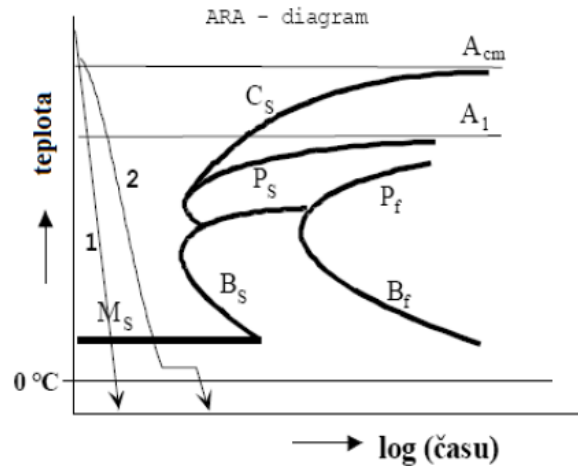
Obr. 5 Lomené kalení

d) **izotermické kalení** – je to druh kalení, při kterém teplota lázně leží pod teplotou M_s příslušné oceli. Výsledná struktura je pak tvořena směsí bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Takovou strukturu lze získat u ocelí s vhodným tvarem diagramu IRA při plynulém ochlazování.



Obr. 6 Izotermické kalení

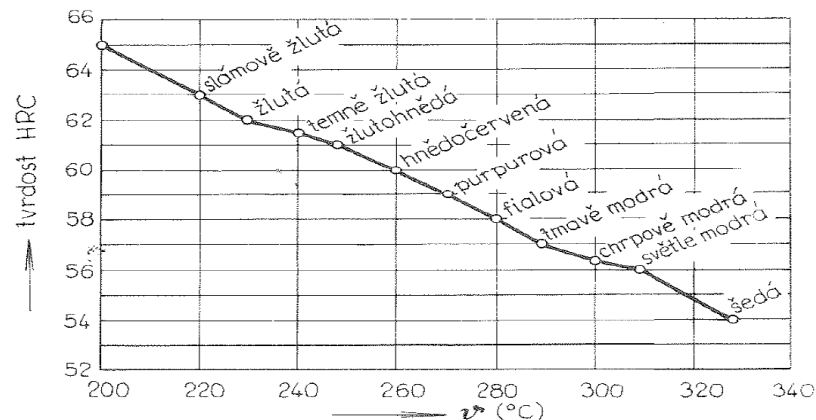
e) **kalení se zmrazováním** – je to druh kalení, kdy je martenziticky zakalený předmět přenesen do prostředí s teplotou pod bodem mrazu, což má za následek zmenšení podílu zbytkového austenitu ve struktuře. Aby nedošlo ke stabilizaci zbytkového austenitu, musí zmrazování následovat co nejdříve po zakalení. Toto kalení se používá u výrobků, u nichž se klade důraz na rozměrovou stabilitu. [6]



Obr. 7 Kalení se zmrazováním

2.3 Popouštění

Popouštění je ohřev oceli následující obvykle po martenzitickém kalení. Probíhá za nižších teplot (200-300)°C nebo za vyšších teplot (400-600)°C. Snižuje se křehkost a vnitřní pnutí zakalených předmětů a zvyšuje se jejich houževnatost, ale snižuje se tvrdost. Zakalený předmět se ohřeje na popouštěcí teplotu a ochladí se. Po zakalení se popouštějí nástroje, které jsou při práci namáhány rázy (dláta, sekáče aj.) a které mají velmi jemné břity a snadno by se při práci vylamovaly.



Obr. 8 Diagram závislosti tvrdosti na popouštěcí teplotě

2.4 Chemicko-tepelné zpracování

Chemicko-tepelné zpracování ocelí je kombinace změny chemického složení povrchové vrstvy ocelové součásti a tepelného zpracování. Každé chemicko-tepelné zpracování se skládá ze čtyř základních pochodů. Adsorpce je uchycení molekul chemických látek na kovovém povrchu. Disociace je rozpad molekul látky, která je nosným médiem, které vniká do povrchu mřížky. Absorpce je pohlcení atomů mřížkou kovu. Difuze je přenos atomů látky z povrchu dovnitř kovové mřížky. Mezi popsané pochody není možno vždy položit ostrou hranici. Celý přenos chemicko-tepelného zpracování ovlivňuje rozhodujícím způsobem rychlost růstu difuzní vrstvy.

2.4.1 Cementování

Je to sycení povrchu součásti uhlíkem v sypkém, plynném nebo kapalném stavu. Probíhá za teplot 800-950 °C. Oceli mají před cementováním nanejvýš 0,3% uhlíku a po cementování 0,7 až 0,9 % uhlíku. Výsledkem je materiál s velmi tvrdým povrchem a houževnatým jádrem. Nauhličená vrstva je 0,5-1,5 mm. Pro cementování se používají ušlechtilé konstrukční oceli, jejichž čtvrtá číslice ve značce je 1 nebo 2 (např. 14220,16220). Způsoby cementování:

1. Cementování v prášku – provádí se v cementačních krabicích, kde jsou součásti zasypány uhlíkatou směsí. Nauhličení vrstvy 1mm trvá asi 10 hodin.
2. Cementování v plynném prostředí – provádí se v pecích MONOCARB, do nichž se přivádí směs plynů. Nauhličení vrstvy 1mm trvá 5 hodin.
3. Cementování v lázni – používají se solné lázně s kyanidem sodným. Cementační teploty se pohybují od 800 do 950°C. Nauhličení vrstvy 1mm trvá 4 hodiny.

2.4.2 Nitridování

Je to sycení povrchu součásti dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí, při kterém vznikají v povrchové vrstvě tvrdé nitridy slitinových prvků (Al,Cr,V). Nitridováním získáme tvrdý povrch odolný proti opotřebení. Vlivem nízkých teplot vznikají minimální pnutí, proto se můžou nitridovat i složité dílce. Nanitridovaná vrstva je 0,1 až 0,5 mm. Po nitridování se součást dále tepelně nezpracovává. Způsoby nitridování:

1. Nitridování v plynu – používá se plynný čpavek. Volný dusík difunduje do povrchu součásti, kde tvoří v povrchové vrstvě s legujícími prvky nitridy za teplot 500 až 540°C. Vrstva 0,3mm trvá 20 hodin.

2. Nitridování v lázni – provádí se v roztavených kyanidech za teplot 540 až 570°C. V lázni se nitridují hlavně nástroje. Vznikají velmi tenké vrstvy, doba nitridování je 30 minut.
3. Iontové nitridování – součásti se vloží do vakuové komory, připojí se na záporný pól zdroje a tvoří katodu. Stěny komory jsou připojeny na kladný pól a tvoří anodu. Do komory se zavede plyn obsahující dusík a po zapnutí vysokého napětí dojde k ionizaci dusíku, jehož atomy jsou přitahovány k součásti a dopadají na povrch vysokou rychlostí. Vrstva je silná a proces je poměrně krátký.

2.4.3 Boridování

Sycení povrchu součásti borem při teplotách 900 až 1050 °C. Používá se pro zvýšení trvanlivosti nástrojů.

2.5 Tepelně mechanické zpracování

Tepelně mechanické zpracování je kombinací tváření a tepelného zpracování. Společným účinkem zpevnění a probíhajících fázových přeměn se dosahuje velmi vysoké pevnosti, kterou nelze jiným způsobem tepelného zpracování získat. Probíhá zde martenzitická přeměna.

3 TVRDOST

Tvrдость je definována jako odolnost materiálu proti vnikání cizího pevného tělesa. Je to vlastnost materiálu udávající jeho schopnost vzdorovat trvalé plastické deformaci. Tedy vtisková tvrдость je definována jako odpor materiálu, který klade proti vytvoření vtisku. Tvrдость je poté posuzována z velikosti vtisku, který vtlačené cizí těleso v povrchu zkoušeného vzorku zanechá. Vnikající těleso přitom nesmí podléhat plastickým deformacím a musí proto vykazovat velmi vysokou tvrдость. Vzhledem k tomu, že při měření tvrlosti dochází k víceosému namáhání měřeného vzorku, jsou výsledné hodnoty tvrlosti ovlivněny mnoha faktory, jako jsou:

- elastické vlastnosti měřeného materiálu (modul pružnosti v tahu a ve smyku),
- plastické vlastnosti zkoušeného materiálu, (mez kluzu a deformační zpevnění),
- velikost zatěžující síly

Tvrдость jednoho kovu může mít různou tvrдость v závislosti na:

- velikosti zrna,
- teplotě,
- množství cizích příměsí (zvyšují tvrдость),
- úrovni vnitřního pnutí (způsobené např. tvářením za studena atd. zvyšují tvrдость).

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

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

Dle normy ISO 14577 jsou statické zkoušky tvrlosti rozděleny dle velikosti síly působící na indentor do tří skupin:

- 1) Zkoušky makrotvrlosti – $2 \text{ N} < F < 30 \text{ kN}$,
- 2) Zkoušky mikrotvrlosti – $2 \text{ N} > F, h > 200 \text{ nm}$,
- 3) Zkoušky nanotvrlosti – $h < 200 \text{ nm}$.

Kde F je maximální síla, které bylo dosaženo v průběhu indentačního testu a h je maximální hloubka vytvořeného vtisku. Další rozdělení zkoušek tvrdosti můžeme provést dle použitého principu měření tvrdosti na:

- 1) **Vrypové** – diamantovým hrotem se při velmi malém zatížení vytvoří na povrchu zkoušeného materiálu vryp a podle šířky vrypu se určí tvrdost měřeného materiálu.
- 2) **Odrazové** – při této zkoušce je tvrdost měřena podle velikosti odrazu závaží kulovitě vybroušeným diamantovým hrotem dopadající z určené výšky na zkoušený předmět.
- 3) **Vtiskové** – Tvrdost je určena z velikosti povrchu vtisku způsobeného vnikajícím tělískem. [8]

3.1 Mikrotvrdost

Měření mikrotvrdosti je realizováno vlačováním diamantového tělesa nebo jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1 g (0,09807 N) do 100 g (9,807 N). S klesajícími silami se zmenšuje velikost vtisku a snižuje se přesnost měření. Protože vtisky při zkoušení mikrotvrdosti jsou malé, je použití této metody vhodné pro:

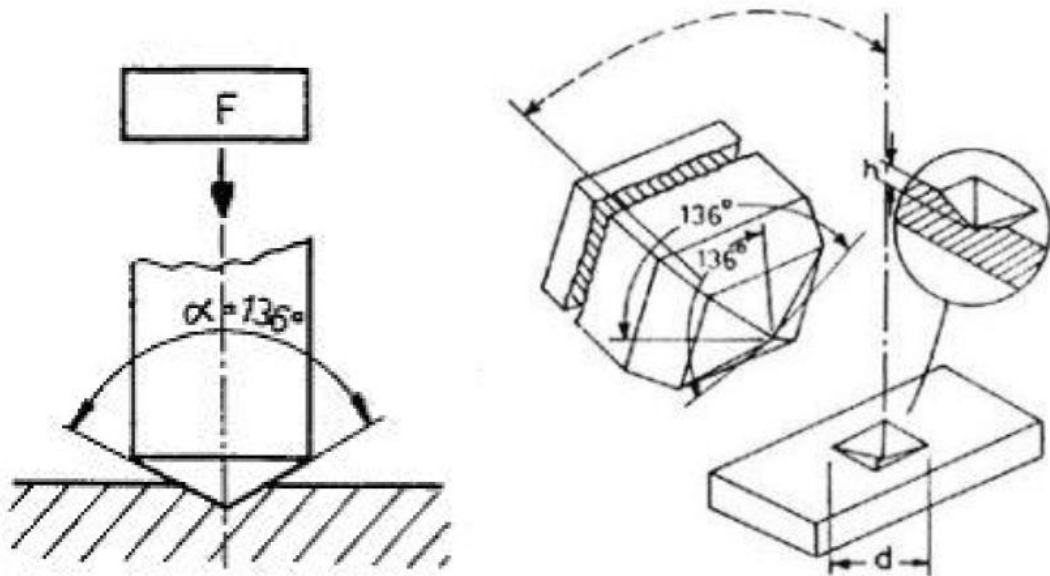
- měření mikrotvrdosti strukturních složek
- měření tvrdosti vybraných oblastí zkušebního vzorku
- malé nebo tenké součásti
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků
- studium difuzních pochodů
- hodnocení oduhličujících procesů
- hodnocení svarových spojů
- měření křehkých materiálů

3.2 Druhy zkoušek mikrotvrlosti

3.2.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti a mikrotvrlosti dle Vickerse je předepsána evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1 pro tři oblasti zatížení. Hodnoty zatížení, které udává evropská norma, jsou v kilogramech. Důvodem je historické hledisko, protože zatížení pro tvrdost a jednotka tvrdosti, byly stanoveny před přijetím mezinárodní soustavy jednotek.

Při zkoušce mikrotvrlosti dle Vickerse se do měřeného vzorku vtlačuje pravidelný čtyřboký jehlan vyrobený z diamantu. Osy protilehlých stěn jehlanu svírají úhel 136° . Vzhledem k tomu, že podstava jehlanu tvoří čtverec, má půdorys vzniklého vtisku v materiálu čtvercový tvar. Velikost výsledné tvrdosti je rovna jako podíl síly F a velikosti plochy vtisku A_s . K vyhodnocení tvrdosti se měří úhlopříčka vtisku d .



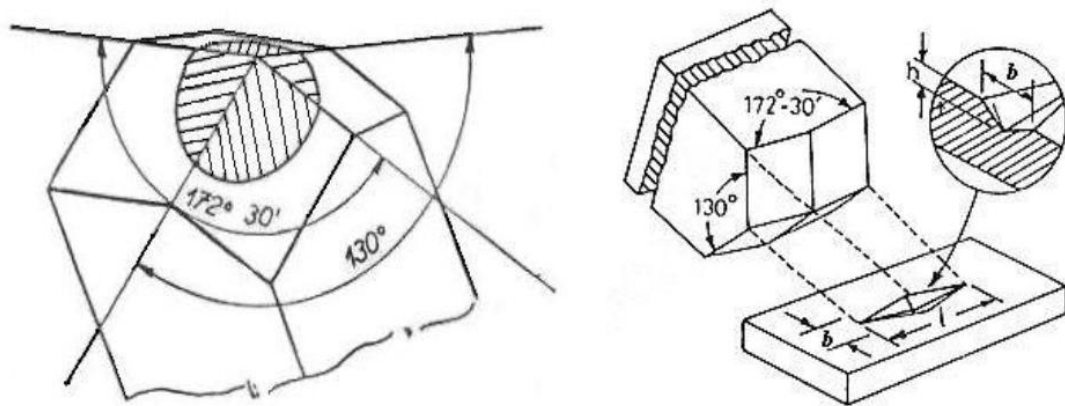
Obr. 9 Podstata zkoušky dle Vickerse

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

3.2.2 Zkouška tvrdosti dle Knoop

Při této zkoušce působí malé zatěžující síly z toho důvodu, že je to zkouška navržená pro zkoušení tenkých plechů a křehkých materiálů.

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



Obr. 10 Podstata zkoušky dle Knoop

Tvrdot dle Knoop je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenž je uvažován jako jehlan s kosočtvercovou základnou a s vrcholovými úhly rovnající se úhlům vnikajícího tělesa.

$$HK = \frac{P}{C_p \cdot L^2} \quad (2)$$

Zkušební těleso musí být uloženo na podložce tak, aby se při průběhu zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso se zatlačuje do zkušebního tělesa zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od začátku zatěžování až do konce nesmí překročit 10 s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa je v rozmezí od $15\mu\text{m/s}$ do $70\mu\text{m}$. [4]

3.2.3 Mikrotvrdość dle Berkoviče

Průběh zkoušky se nijak neliší od zkoušky dle Vickerse. Hlavním důvodem uvedení nového indentoru byly problémy s výrobou čtyřbokého jehlanu což v případě výroby třístěnného jehlanu odpadá. Také díky svému tvaru je jehlan během svého provozního namáhání méně citlivý na nárazy. V dnešní době se Berkovičův indentor zcela běžně používá v nano-indentacních zkouškách. Prvotní Berkovičův indentor byl navržen tak, aby bylo dosaženo stejného poměru plochy stěn jehlanu k výšce jehlanu jako v případě Vickersova jehlanu. Později byl vyroben tzv. modifikovaný Berkovičův indentor. Hodnota mikrotvrdości pro Berkovičův indentor s úhlem $65,03^\circ$ je vyjádřena poměrem velikosti zatížení a plochy:

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

W je míra zatížení jehlanu v kg a l je výška trojúhelníku změřená na vtisku.

3.2.4 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Při této zkoušce zatlačujeme ocelovou kalenou kuličku do lesklé rovné plochy zkušebního vzorku. Po odlehčení měříme mikroskopem průměr vtisku d ve dvou na sebe kolmých rovinách a vypočítáme průměrnou hodnotu. Průměr kuličky je normalizovaný a bývá (10; 5; 2,5; 1,25; 0,625) mm. Zátěžná síla se volí podle průměru kuličky ($F=30D^2$ pro ocel, $10D^2$ pro nezelezné kovy). Zatížení je nutno volit tak aby průměr vtisku byl $d=(0,2-0,6)D$.

Doba, po kterou se udržuje maximální zatížení se volí dle materiálu a pohybuje se v rozmezí 10 až 180 sekund (čím je materiál měkčí tím delší zatížení a naopak).

Tvrdość dle Brinella je definována jako poměr zátěžné síly k ploše vtisku, která má tvar kulového vrchlíku.

$$HB = \frac{F}{S} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (4)$$

Označení tvrdosti se skládá ze značky HB a k ní připojených údajů o podmínkách zkoušky v pořadí průměr kuličky, zatížení, doba působení. Příklad zápisu zkoušky: 30 HB 5/250/30.

Tloušťka materiálu musí být větší než osminásobek hloubky vtisku, jinak se do výsledku zkoušky projeví tvrdost podložky.

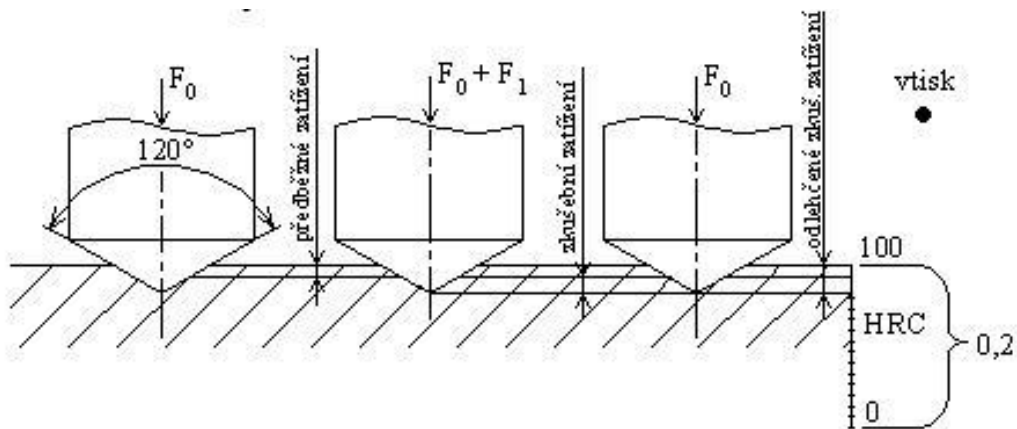
3.2.5 Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Na rozdíl od předchozích metod měříme hloubku vtisku mezi dvěma stupni zatížení. Jde o předběžné zatížení a celkové zatížení. Předběžné zatížení vylučuje nepřesnosti povrchové vrstvy. Tato zkouška se rozděluje do tří skupin:

HRA - zkušebním tělískem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° , celkové zatížení je 600N (100 + 500)N. Zkouška je vhodná pro křehké materiály a pro měření tvrdosti tenkých vrstev.

HRB – zkušebním tělískem je ocelová kalená kulička průměru 1/16 palce, což je 1,164 mm. Celkové zatížení je 1000N (100 + 900)N. Zkouška je vhodná pro materiály s nižší a střední tvrdostí.

HRC – zkušebním tělískem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° , celkové zatížení je 1500N (100 + 1400)N. Zkouška je vhodná pro měření tvrdších materiálů. Zápis zkoušky: 60 HRC – tvrdost je uvedena ve stupních Rockwella s označením druhu zkoušky.



Obr. 11 Podstata zkoušky dle Rockwella

4 INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI

Princip metody je takový, že měřicí přístroj zaznamenává současně okamžitou změnu hloubky průniku indentoru do měřeného materiálu v závislosti na plynulém vzrůstu/poklesu zatížení během celého zatěžovacího a odlehčovacího cyklu. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka zatížení – tzv. hloubka vtisku. Vzhledem k možnosti napojení měřicího přístroje na počítač, jsou průběhy zkoušek zaznamenány současně s vyhodnocením materiálových parametrů.

4.1 Stanovení tvrdosti

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

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_P} \quad (5)$$

Kde F_{MAX} je maximální zkušební zatížení,

A_P je průměr kontaktní plochy vnikacího tělesa a zkoušeného tělesa určený z křivky zatížení.

4.2 Stanovení vtiskového modulu

Vtiskový modul E_{IT} se vypočítá ze směrnice tečny sloužící k výpočtu vtiskové tvrdosti H_{IT} .

$$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}} \quad (6)$$

kde v_s Poissonův poměr zkušební tělesa,

v_i Poissonův poměr vnikajícího tělesa,

E_r redukovaný modul vtiskového kontaktu,

E_i kontaktní poddajnost,

A_P průměr kontaktní plochy

4.3 Stanovení vtiskového tečení

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

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (7)$$

Kde h_1 je hloubka vtisku v milimetrech v čase t_1 , kdy je dosaženo zkušebního zatížení, které je udržováno na konstantní úrovni.

h_2 je hloubka vtisku v milimetrech v čase t_2 výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení.

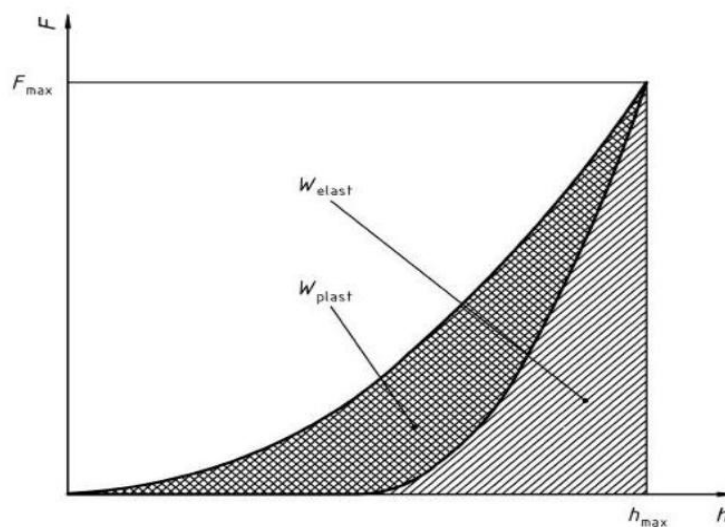
4.4 Stanovení plastické a pružné části práce vnikacího procesu

Celková mechanická práce W_{total} vnikacího procesu je pouze částečně spotřebována jako deformační práce plastická, W_{plast} . Během odlehčování zkušebního zatížení se zbytková část považuje za práci pružné zpětné deformace, W_{elast} . Dle definice mechanické práce, $W = F \times dh$, kde obě části na obrázku 9 se jeví jako odlišné plochy.

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 \quad (8)$$

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

$$\text{Plastická část } W_{plast}/W_{total} \text{ je pak } 100\% - \eta_{IT} \quad (10)$$



Obr. 12 Plastická a pružná část práce vnikacího procesu

4.5 Indentační křivky

Cílem indentačních mikrotechnik a nanotechnik je určení mikrotvrlosti a nanotvrlosti spolu s elastickým modulem zkoušeného vzorku pomocí zaznamenávání průběhu hodnot působícího zatížení, které narůstá z nulové hodnoty do maxima a poté z maximální hodnoty zpět do nuly. Pokud je indentovaný vzorek plasticky deformován, zůstane v jeho povrchu trvalý vtisk. Tento vtisk a jeho projekční plocha jsou příliš malé na přesné měření optickými metodami. Geometrie indentoru a jeho hloubka průniku do materiálu poskytují nepřímou informaci o velikosti kontaktní plochy při plném zatížení, pomocí které se vypočte kontaktní tlak a tvrdost. Během odlehčování dochází k zotavování vtisku, to znamená, že materiál se snaží dostat do původního tvaru uvolňováním elastických deformací. U kovů k zotavení nikdy nedojde v plném rozsahu kvůli již vzniklé plastické deformaci. Analýza počáteční části elastické relaxace v průběhu odlehčování nám umožňuje určit elastický modul zkoušeného materiálu. Tvary indentačních křivek jsou si bez ohledu na použitý indentor velmi podobné. Metoda DSI se v praxi používá na širokém množství materiálů, měkkými polymery počínaje a tvrdými uhlíkovými diamanty konče. Jinými slovy odezva měřeného materiálu na indentaci je hlavním činitelem, který ovlivňuje tvar indentační křivky. Tvar indentační křivky je také zdrojem důležitých informací, které se projevují náhodným nespojitým průběhem, například fázová transformace, trhliny a delaminace vrstvy. Platí však, že trvalá deformace nebo zbytkový vtisk nemusí být pouze výsledkem čistě plastické deformace, ale může zahrnovat trhliny nebo fázové transformace vzorku. Materiály lze rozdělit do čtyř skupin podle reakce na vnější silové působení viz. Obr.: 13

- elastické

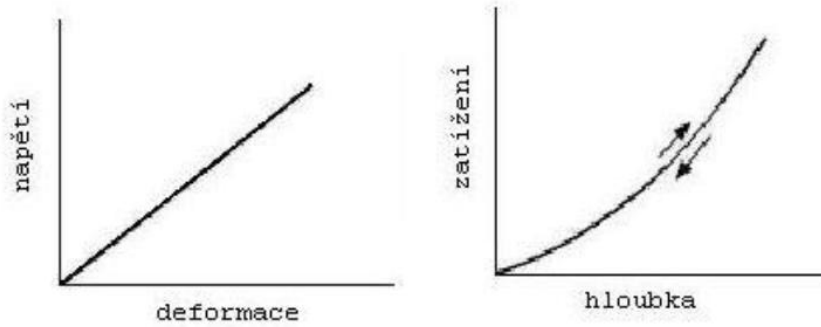
- elasticko – plastické

- plastické

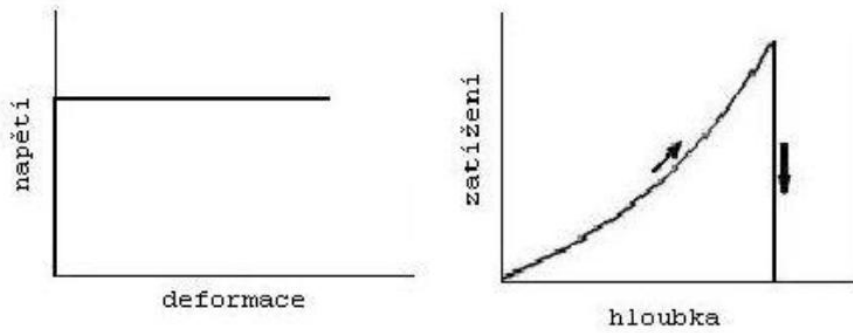
- viskoplastické

[8]

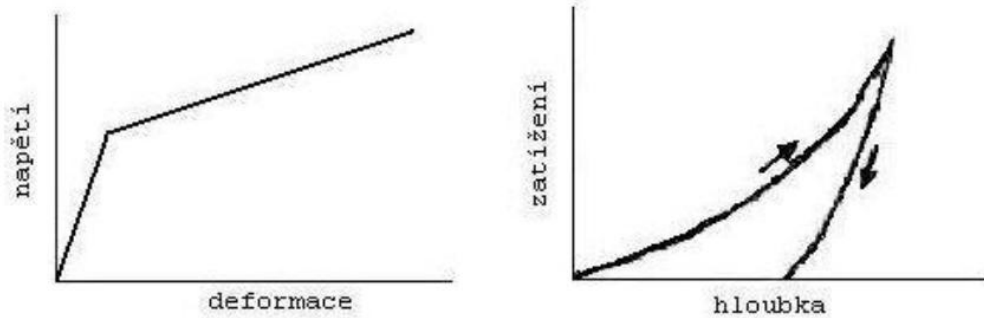
ideálně elastický



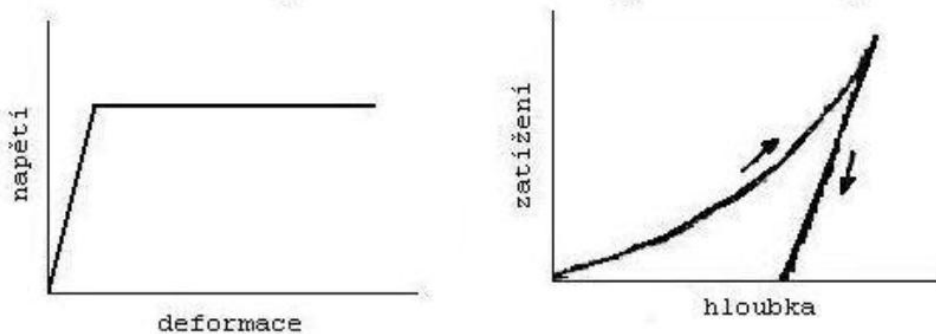
ideálně tuhý-dokonale plastický



ideálně elasto-plastický



elastický - ideálně plastický



Obr. 13 Porovnání odezvy materiálu na jednoosé a víceosé namáhání

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce byl výzkum vlivu tepelného a chemicko-tepelného zpracování různých kovů na mikrotvrdost. V první části bylo cílem provést literární rešerši na dané téma, která byla zaměřena na druhy ocelí, tepelné zpracování a zkoušky mikromechanických vlastností materiálu. Cílem pro praktickou část byla příprava vzorků, které budou nařezány, tepelně zpracovány a vyleštěny. Dále bylo cílem provést měření mikromechanických vlastností vzorků pomocí metody DSI. Budou vybrány některé parametry, které budou statisticky vyhodnoceny a zobrazeny do grafů.

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Jednotlivé vzorky byly nařezány a poté tepelně a chemicko-tepelně zpracovány. Zástupcem tepelného zpracování bylo kalení a následné popouštění a povrchové kalení. Zástupcem chemicko-tepelného zpracování bylo cementování a nitridování. Poté byly vzorky zalisovány a vyleštěny.

6.1 Použité typy materiálů

Pro praktickou část bylo použito pět typů kovových materiálů. Jedná se o materiály:

- 16220 bez tepelného zpracování a 16220 cementovaný a kalený,
- 14220 bez tepelného zpracování a 14220 cementovaný,
- 11600 bez tepelného zpracování a 11600 kalený a popouštěný,
- 14220 bez tepelného zpracování a 14220 nitridovaný,
- 12050 bez tepelného zpracování a 12050 povrchově kalený.

6.2 Řezání vzorků

Řezání vzorků bylo provedeno na přesné automatické pile BUEHLER IsoMet 4000.

Parametry řezání:

- typ řezného kotouče - Diamantový řezný kotouč IsoMet 30 HC,
- rozměry řezného kotouče - 178 mm x 0,76 mm,
- otáčky řezného kotouče - 1800 ot/min,
- posuv - 16 mm/min.



Obr. 14 Přesná automatická pila BUEHLER IsoMet 4000

6.3 Zalisování vzorků

Všechny vzorky před měřením bylo potřeba zalisovat a vyleštit. Zkušební vzorky byly zalisovány do materiálu EpoMet G MoldingCompound 20-3380-064, od firmy Buehler z důvodu upnutí do metalografické leštičky.



Obr. 15 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000

6.4 Leštění vzorků

Leštění proběhlo na leštícím stroji Eco-Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler. Vzorky byly leštěny v několika krocích, nejprve pomocí brousících kotoučů s různými zrnitostmi a následné doleštění vzorku bylo pomocí textilního plátna a diamantové suspenze.

Parametry leštění:

- Přítlačná síla - 25 N.
- Otáčky vzorků - 30 ot/min.
- Otáčky plátna - 300 ot/min.



Obr. 16 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO

6.5 Měření tvrdosti metodou DSI

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

Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení - 0,5 N, 2N a 5 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 15 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 1 N/min (pro 0,5N), 4 N/min (pro 2N) a 10 N/min (pro 5N),
- Poissonovo číslo - 0,3.

Jako vnikací tělísko (indenter) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° (Vickersův indentor). Měření byla provedena metodou DSI (DepthSensingIndentation) a vyhodnocení mikromechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.



Obr. 17 Mikrotvrdoměr – MicroCombi Tester

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

7.1 Statistické vyhodnocení

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Kde, n je počet měření

s je směrodatná odchylka

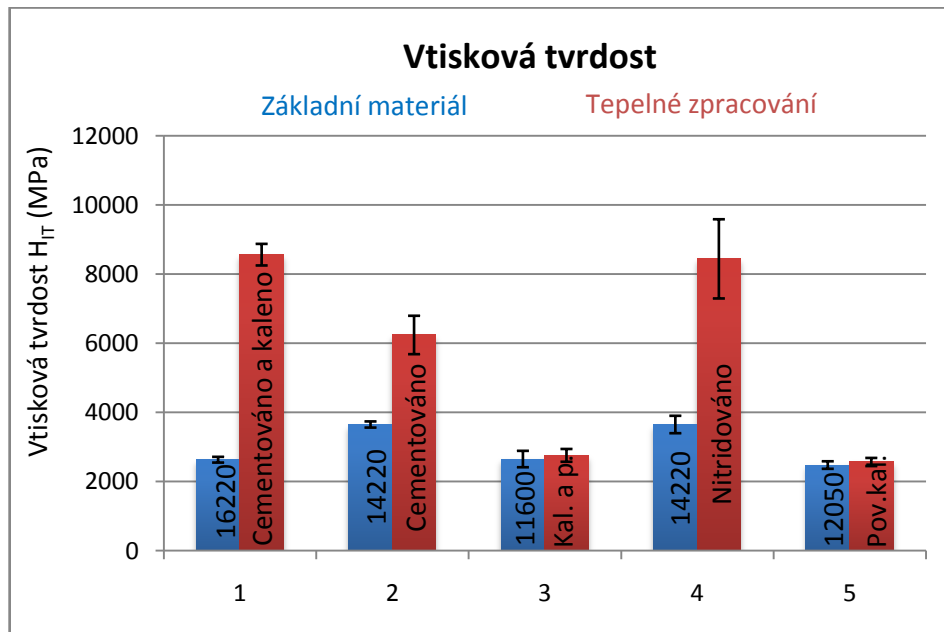
\bar{x} je aritmetický průměr

7.2 Výsledky měření mikromechanických vlastností povrchu vzorku

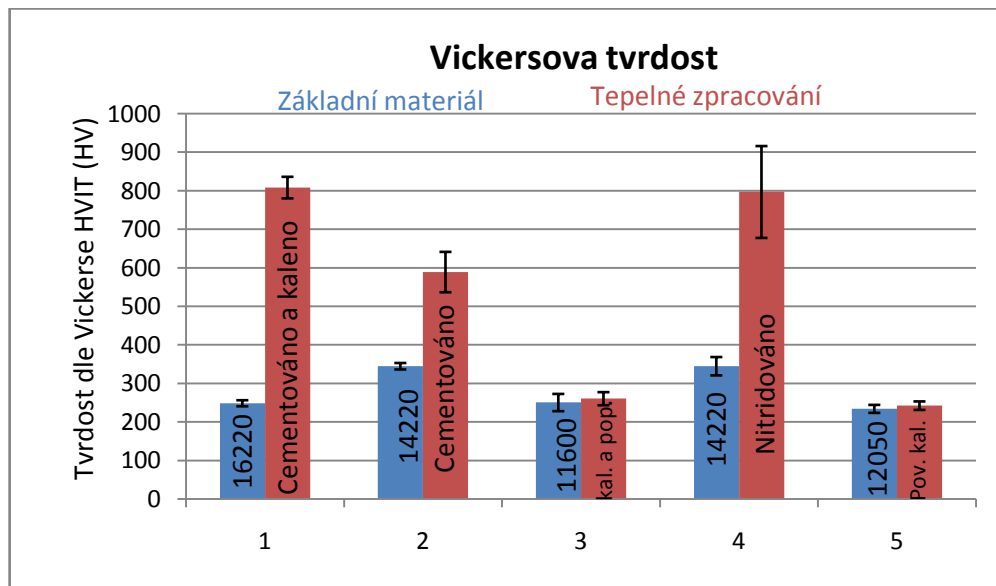
Proběhlo měření metodou DSI, kde se měřily mikromechanické vlastnosti povrchu vzorků. Z řad výsledků, které nám metoda DSI poskytla, byly vyhodnoceny výsledky vtiskové tvrdosti H_{IT} , vtiskového modulu E_{IT} , Vickersovy tvrdosti HV a elastické a plastické deformační práce W_{elast} a W_{plast} .

7.2.1 Zatížení 0,5N

Měření probíhalo na každém vzorku vždy 10x. Výsledky měření byly statisticky vyhodnoceny a graficky znázorněny.

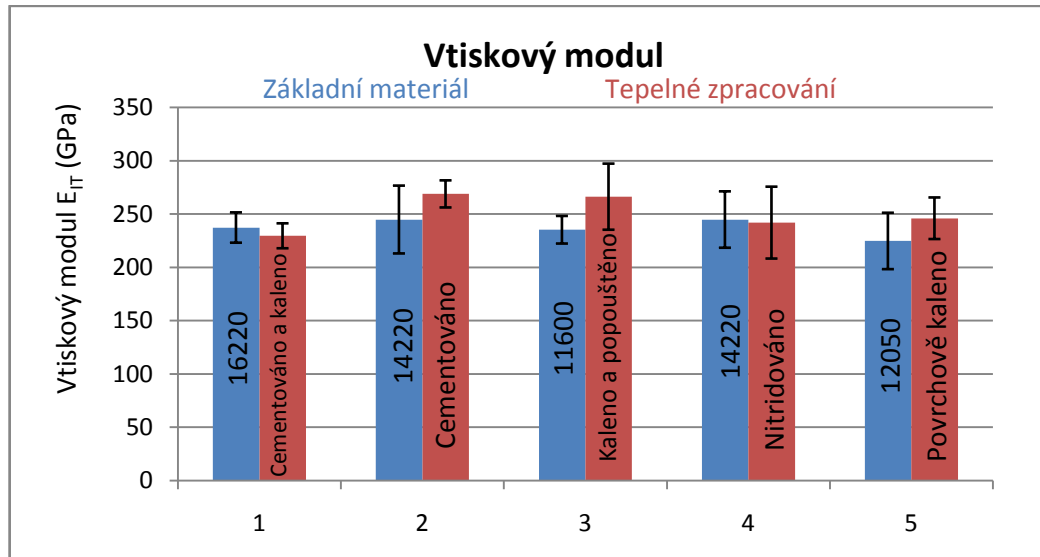


Obr. 18 Vtisková tvrdost H_{IT} (MPa) pro zatížení 0,5N



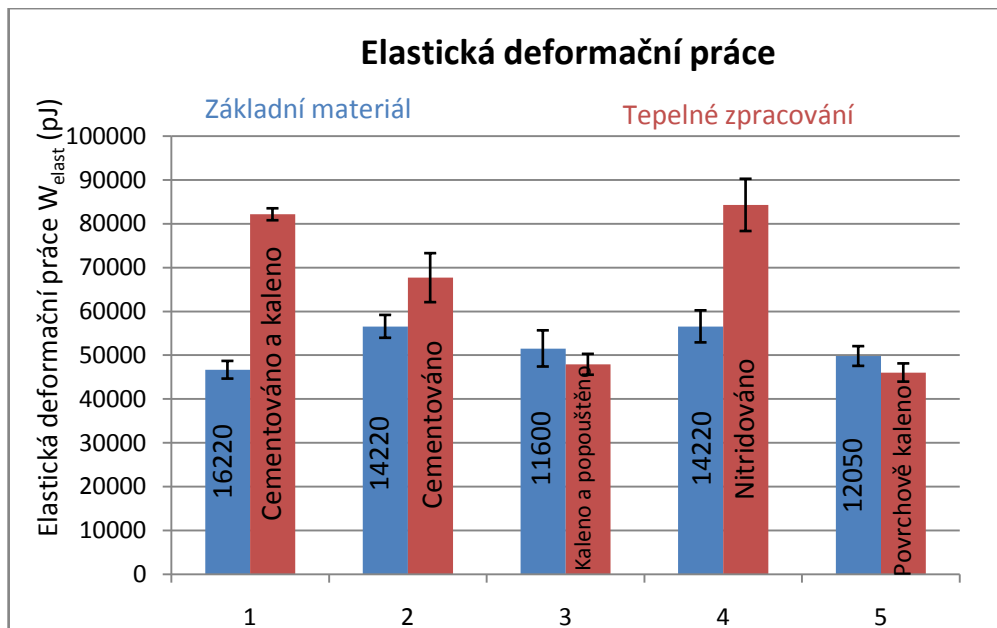
Obr. 19 Vickersova tvrdost (HV) pro základní materiály a tepelně zpracované

Z grafu vtiskové tvrdosti H_{IT} a Vickersovy tvrdosti HV lze vyčíst, že nejvyšší tvrdosti dosáhl materiál 16220, který byl cementován a následně kalen a materiál 14220, který byl nitridován. Vysokého nárůstu tvrdosti došlo také u materiálu 14220, který byl cementován. Nejnižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny u materiálu 11600, který byl kalen a popouštěn a u materiálu 12050, který byl povrchově kalen.

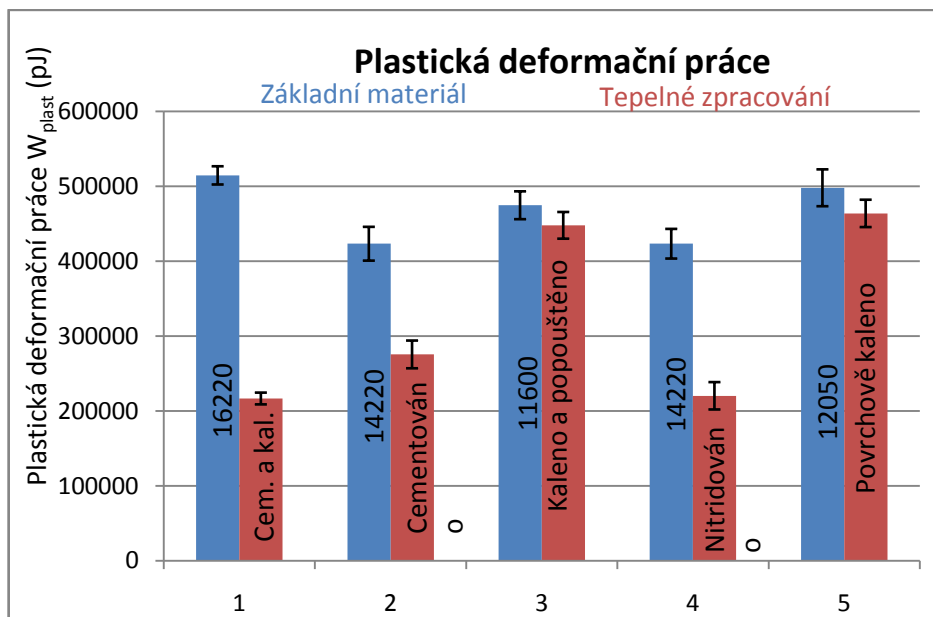


Obr. 20 Vtiskový modul E_T (GPa) pro základní materiály a tepelně zpracované

Hodnota vtiskového modulu E_T se nijak výrazně neměnila. Nejvyšší hodnoty dosáhl materiál 14220, který byl cementován a materiál 11600, který byl kalen a popouštěn. Hodnoty vtiskového modulu se pohybují v rozmezí 225 až 260 GPa.

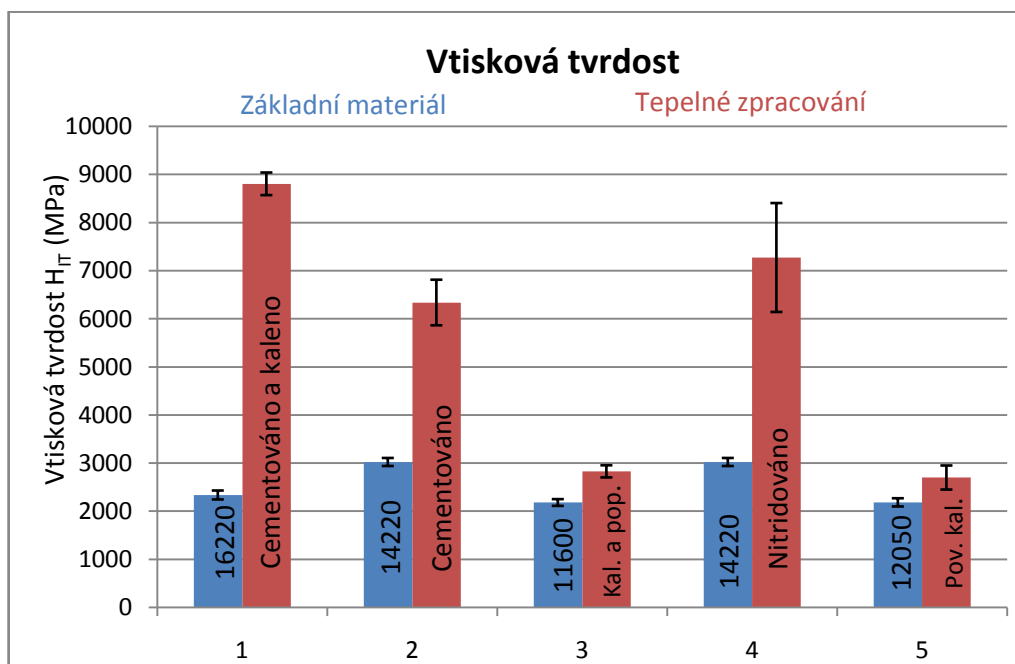


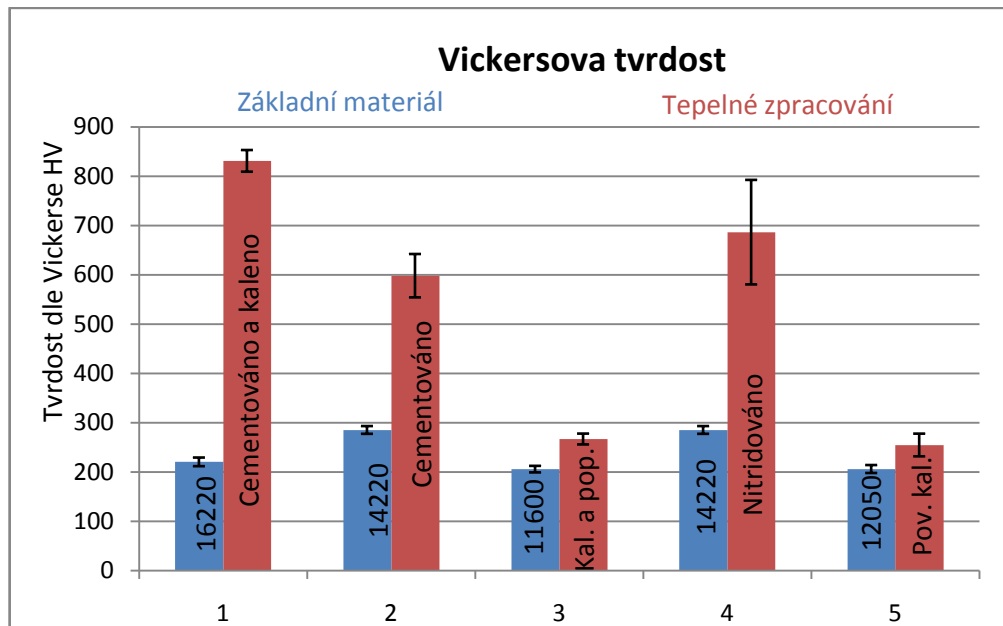
Obr. 21 Elastická deformační práce W_{elast} (pJ) pro zatížení 0,5N

Obr. 22 Plastická deformační práce W_{plast} (pJ) pro zatížení 0,5N

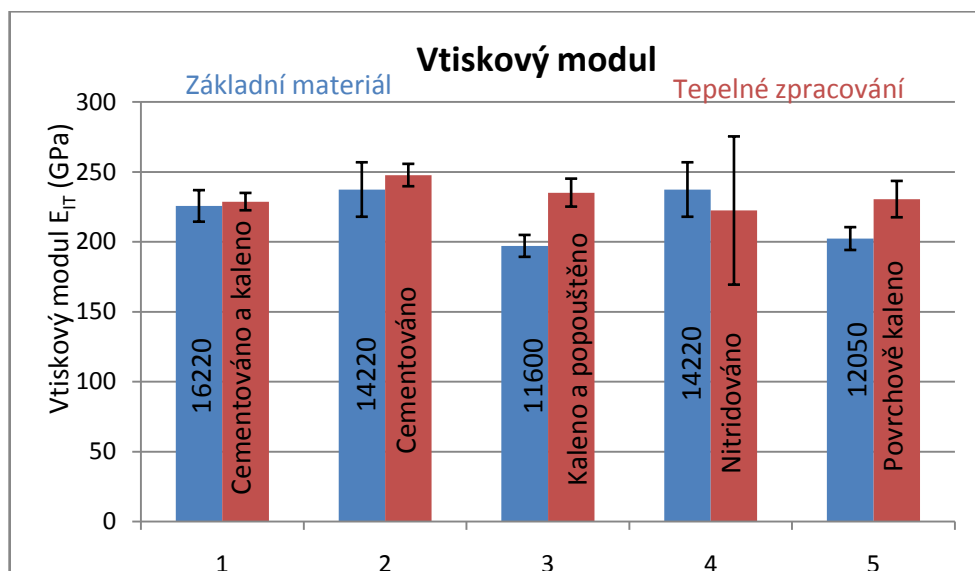
Hodnota elastické deformační práce byla nejvyšší u materiálu 16220, který byl cementován a následně kalen a u materiálu 14220, který byl nitridován, zároveň tyto dva způsoby chemicko-tepelného zpracování vykazovaly nejnižší hodnoty plastické deformační práce, která byla nejvyšší u základního materiálu 16220 a 12050.

7.2.2 Zatížení 2N

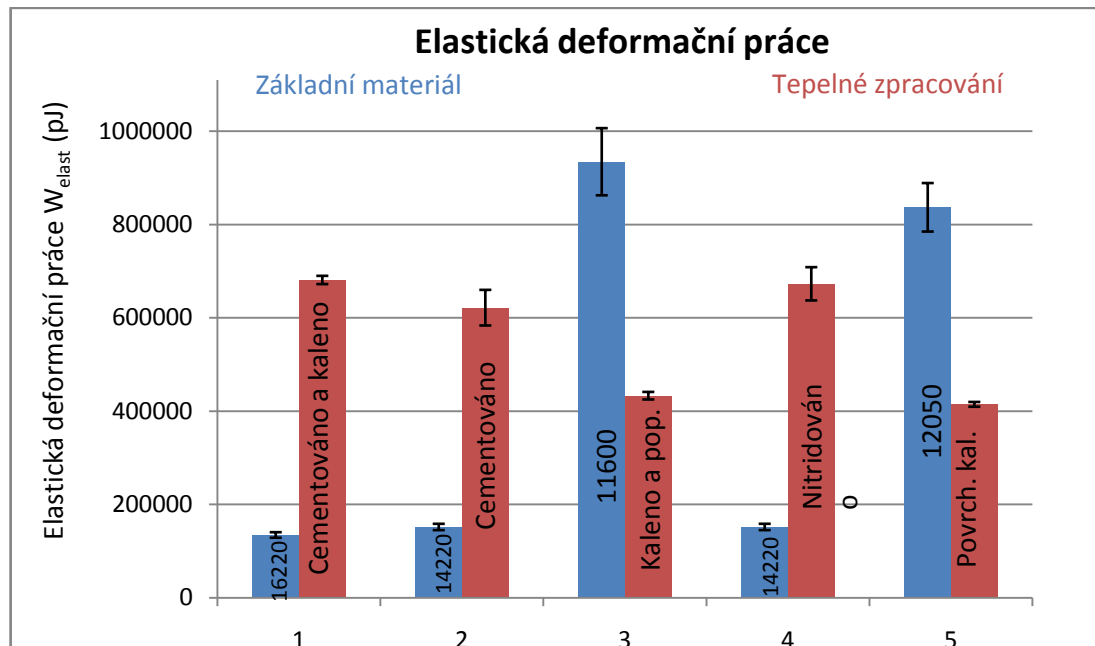
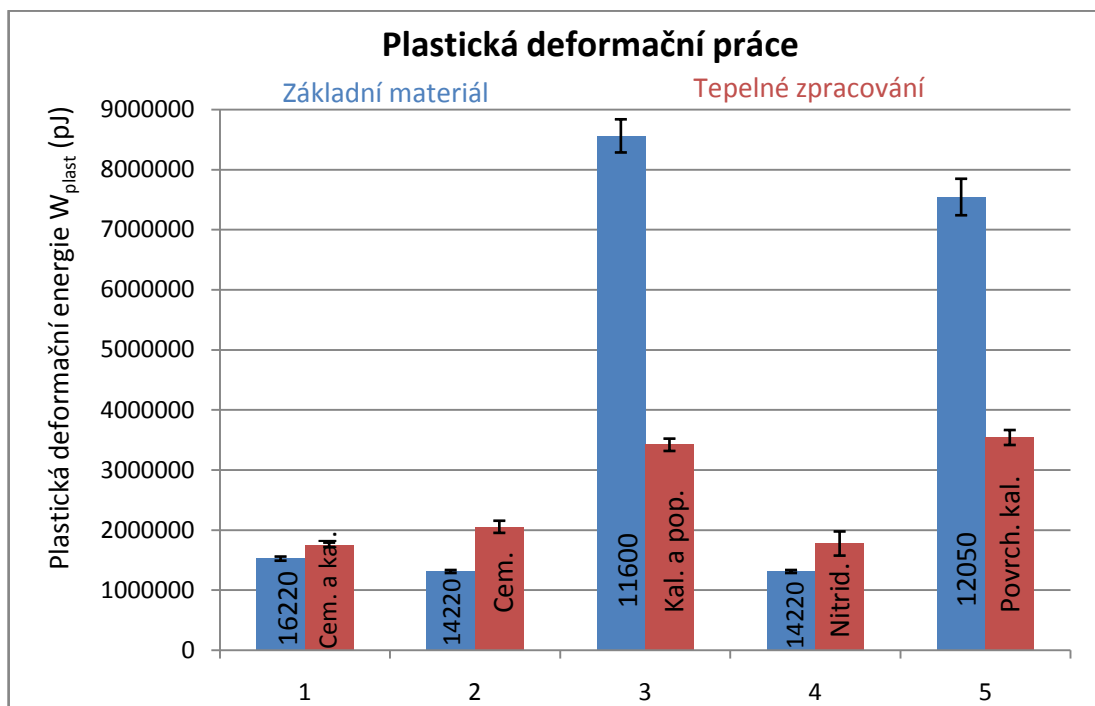
Obr. 23 Vtisková tvrdost H_{IT} pro zatížení 2N

Obr. 24 Vickersova tvrdost H_{VT} (HV) pro zatížení 2N

Pro vtiskovou tvrdost a Vickersovu tvrdost při zatížení 2N můžeme říct, že výsledky jsou velmi podobné a že nedošlo k významným změnám v tvrdosti. Nejvyšší tvrdosti dosahoval materiál 16220, který byl cementovaný a kalený a materiál 14220, který byl nitridovaný. Nejnižší tvrdosti dosáhl materiál 11600 a 12050.

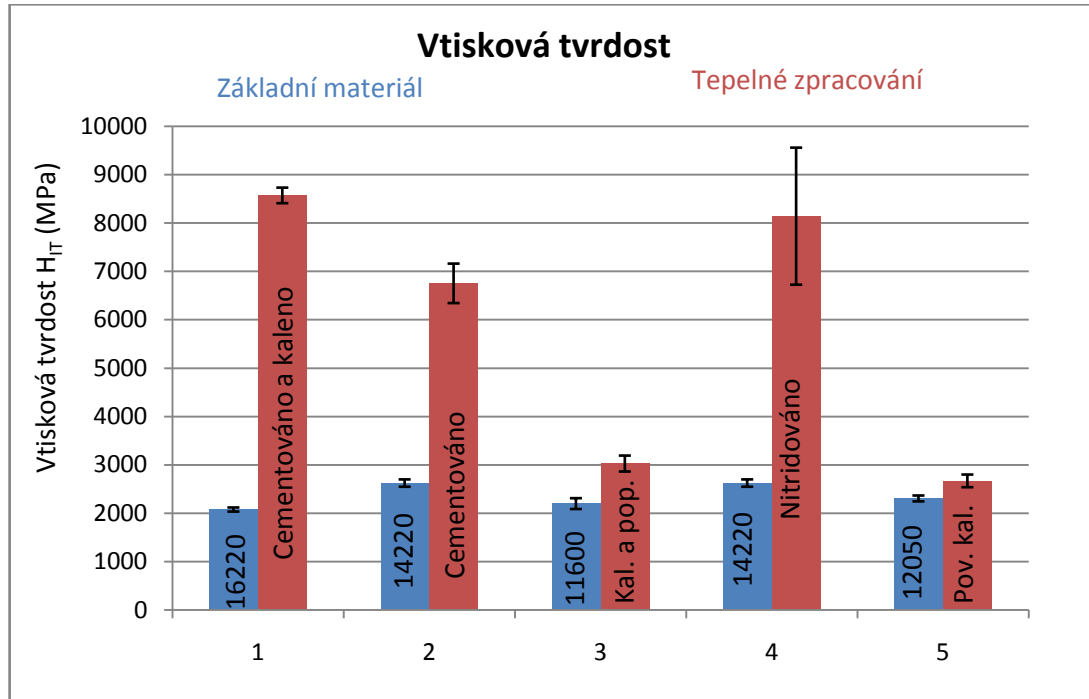
Obr. 25 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro zatížení 2N

Hodnoty vtiskového modulu E_{IT} jsou oproti zatížení 0,5N nižší. Nejvyšší hodnotu vtiskového modulu má materiál 14220, který byl cementovaný, nejnižší hodnota vtiskového modulu je u základního materiálu 11600, který má nejnižší obsah uhlíku z uvedených materiálů. Ze základních materiálů má nejvyšší hodnotu vtiskového modulu materiál 14220.

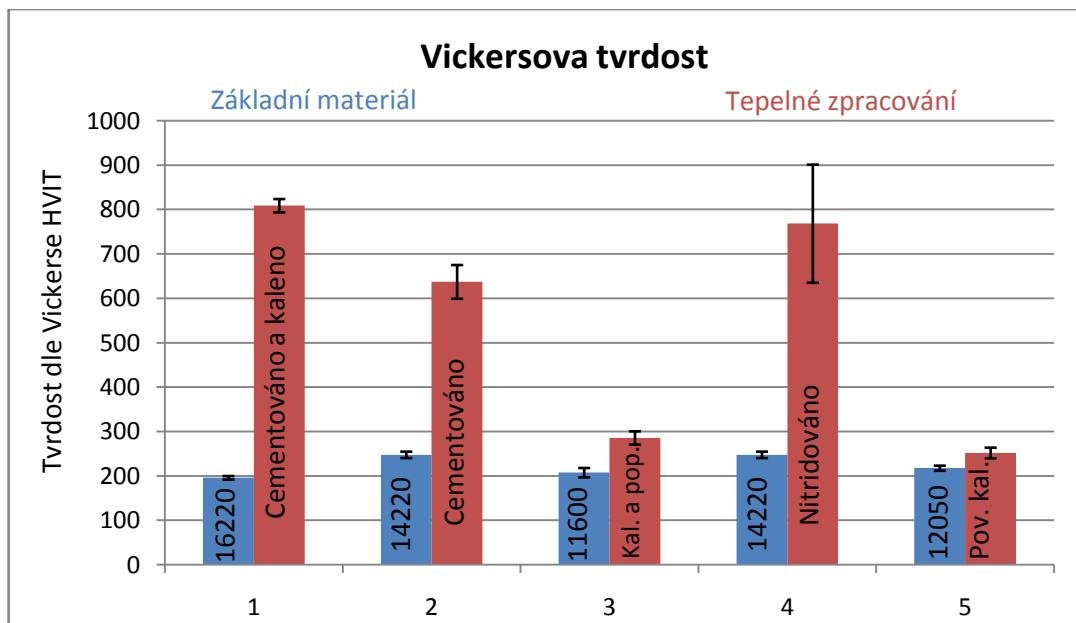
Obr. 26 Elastická deformační energie W_{elast} pro zatížení 2NObr. 27 Plastická deformační energie W_{plast} pro zatížení 2N

Hodnoty elastické a plastické deformační práce se oproti zatížení 0,5N výrazně zvýšily. Nejvyšších hodnot dosahuje základní materiál 11600 a 12050, je to z důvodu nižší tvrdosti, která je způsobena nižším obsahem uhlíku. Nejnižší hodnoty elastické deformační práce byly naměřeny u materiálu 16220 bez tepelného zpracování a nejnižší hodnoty plastické deformační práce byly naměřeny u materiálu 14220 bez tepelného zpracování.

7.2.3 Zatížení 5N



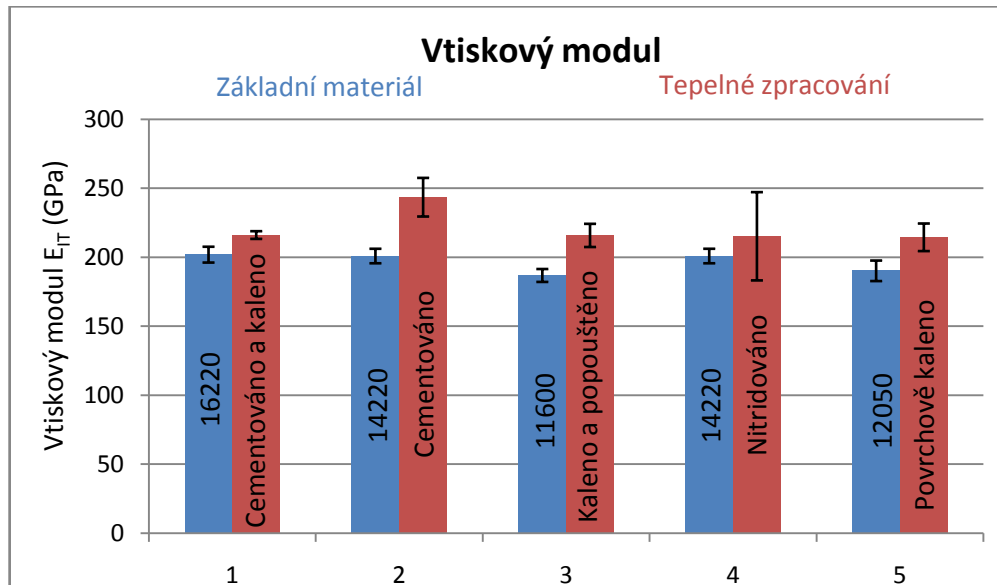
Obr. 28 Vtisková tvrdost při zatížení 5N



Obr. 29 Vickersova tvrdost HVIT (HV) při zatížení 5N

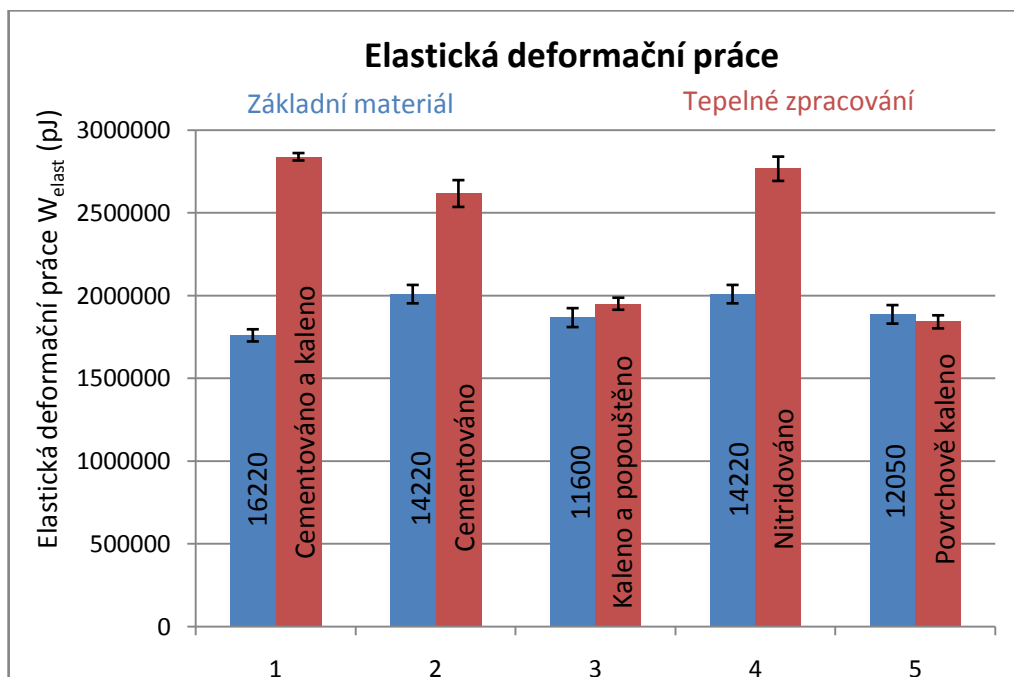
Hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} a Vickersovy tvrdosti HV jsou velmi podobné hodnotám při zatížení 2N. Nejvyšších hodnot opět dosáhl materiál, který byl cementovaný a následně kalený a materiál, který byl nitridovaný. Nejnižší tvrdost byla naměřena u materiálu 16220

bez tepelného zpracování. Nejvyšší nárůst tvrdosti byl u materiálu cementovaného a kaleného a činil 400% a u nitrídaného materiálu, kde nárůst tvrdosti činil 310%.

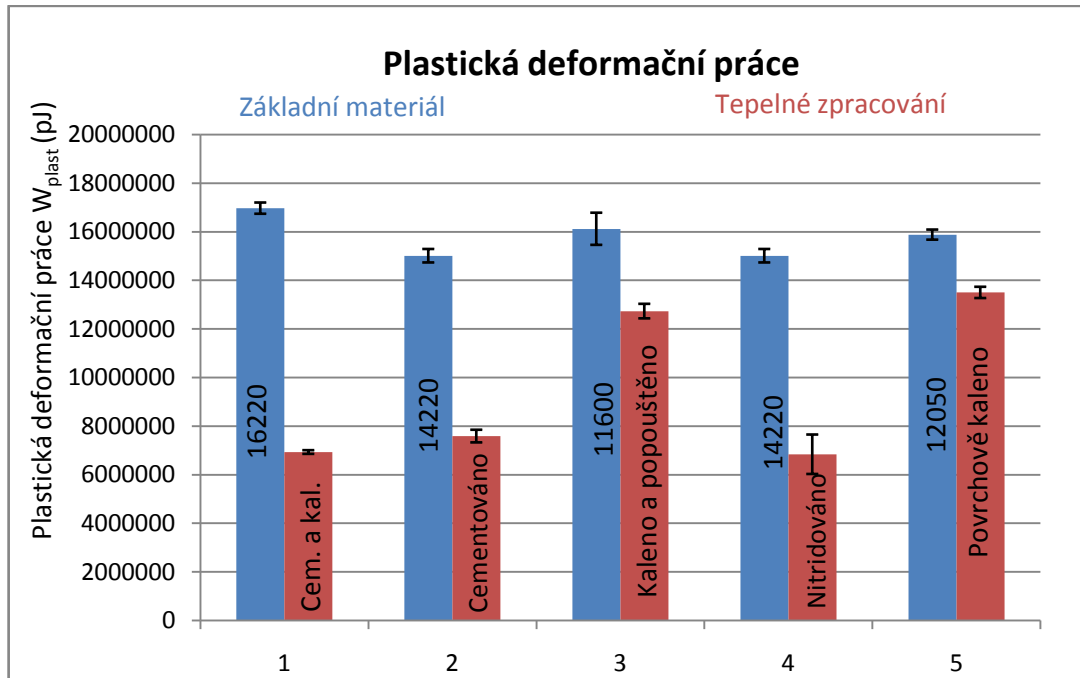


Obr. 30 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) při zatížení 5N

Hodnoty vtiskového modulu jsou nepatrně nižší než při zatížení 2N. Nejvyšší hodnoty vtiskového modulu dosahuje materiál 14220, který byl cementovaný. Nejnižší hodnoty dosahují materiály 11600 a 12050 bez tepelného zpracování. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí 190 až 245 GPa.



Obr. 31 Elastická deformační práce W_{elast} (pJ) při zatížení 5N



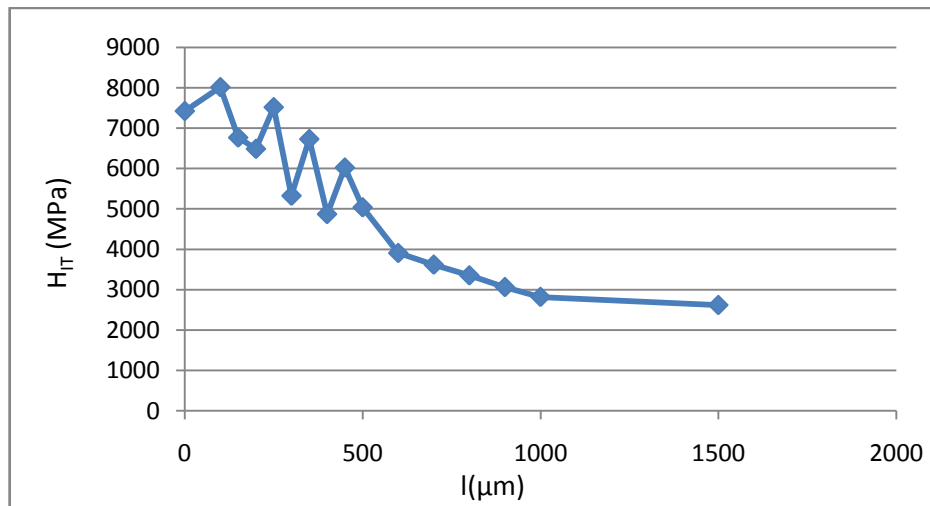
Obr. 32 Plastická deformační práce W_{plast} (pJ) při zatížení 5N

Hodnoty elastické a plastické deformační práce jsou výrazně vyšší než při zatížení 2N. Nejvyšší elastická deformační práce je u cementovaného a následně kaleného materiálu 16220 a u tohoto materiálu je také nejvyšší hodnota plastické deformační práce. Velmi vysoké hodnoty elastické deformační práce dosahuje také materiál 14220, který byl nitridován. Nejnižší hodnotu elastické deformační práce mají materiály 16220 a 12050 bez tepelného zpracování.

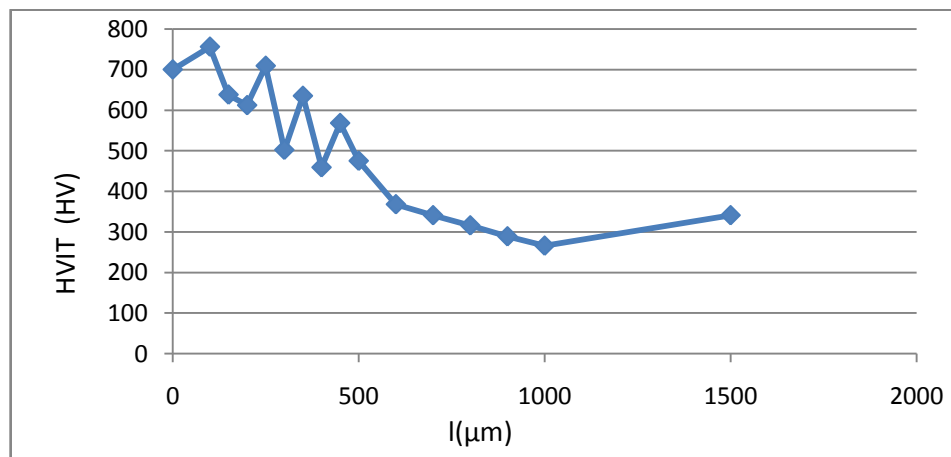
7.3 Výsledky měření mikromechanických vlastností v průřezu

Vzorky byly nařezány a vyleštěny. Měření probíhalo po 50 μ m od povrchu ke středu vždy při zatížení 0,5N. Data byla statisticky vyhodnocena a graficky znázorněna.

7.3.1 Cementování a kalení

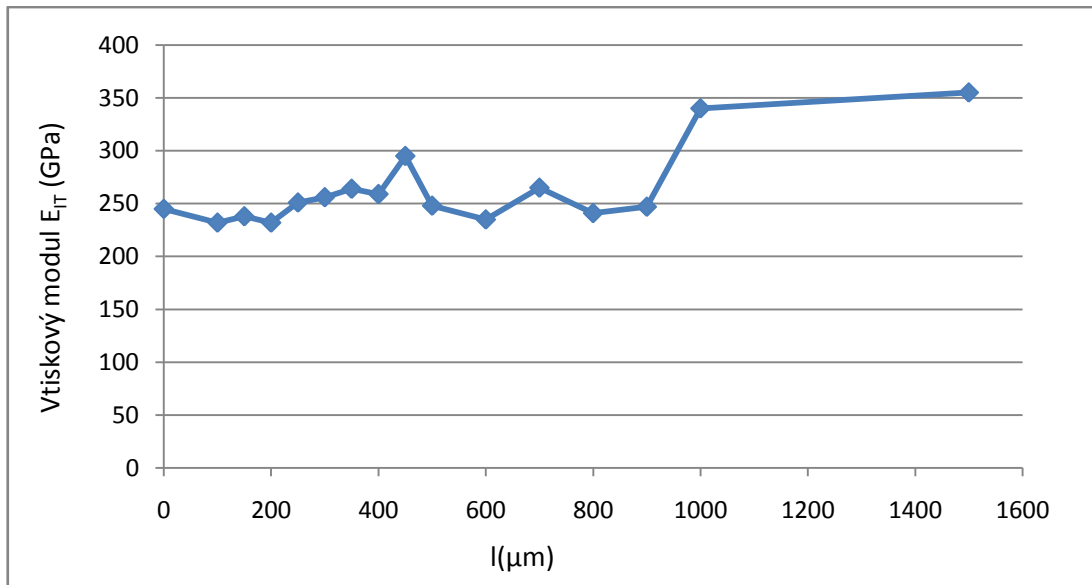


Obr. 33 Vtisková tvrdost v závislosti na vzdálenosti



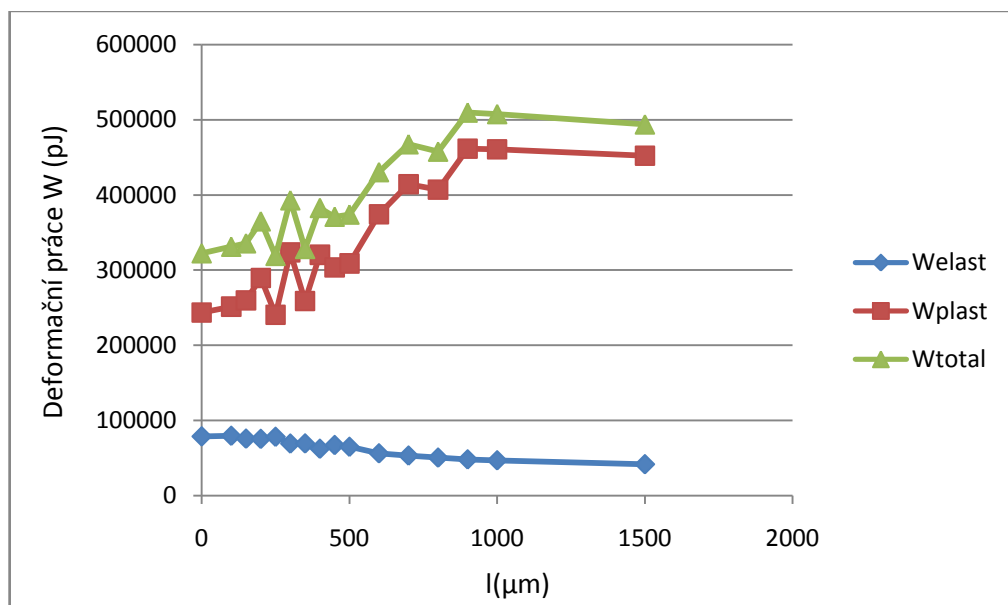
Obr. 34 Vickersova tvrdost v závislosti na vzdálenosti

Grafy vtiskové tvrdosti a Vickersovy tvrdosti jsou si velmi podobné. Vtisková tvrdost dosáhla nejvyšší hodnoty 8000 MPa a Vickersova tvrdost dosáhla nejvyšší hodnoty přibližně 760 HV. Z grafu jde vidět, že tepelné zpracování zasáhlo do hloubky 1 mm. Vtisková tvrdost na povrchu materiálu byla $H_{IT} = 7300$ MPa a směrem ke středu její hodnota postupně klesala, až klesla přibližně na hodnotu $H_{IT} = 2600$ MPa. Vlivem cementování a následného kalení bylo dosaženo nárůstu tvrdosti o 260%.



Obr. 35 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) v závislosti na vzdálenosti

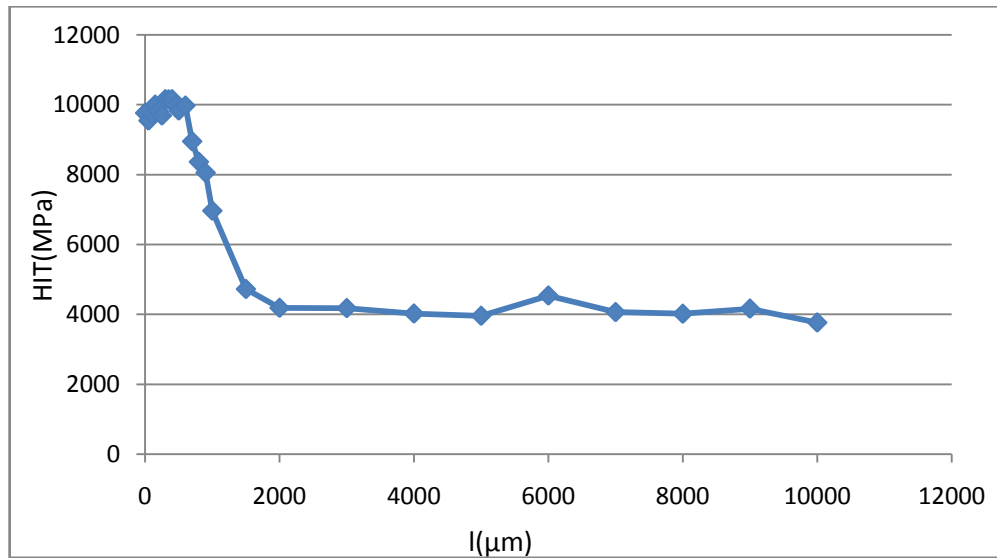
Hodnoty vtiskového modulu se příliš neměnily až do vzdálenosti 1 mm od povrchu kdy se hodnota vtiskového modulu začala zvyšovat. Na povrchu byla hodnota vtiskového modulu 250 GPa, ve středu vzorku byla přibližně 360 GPa.



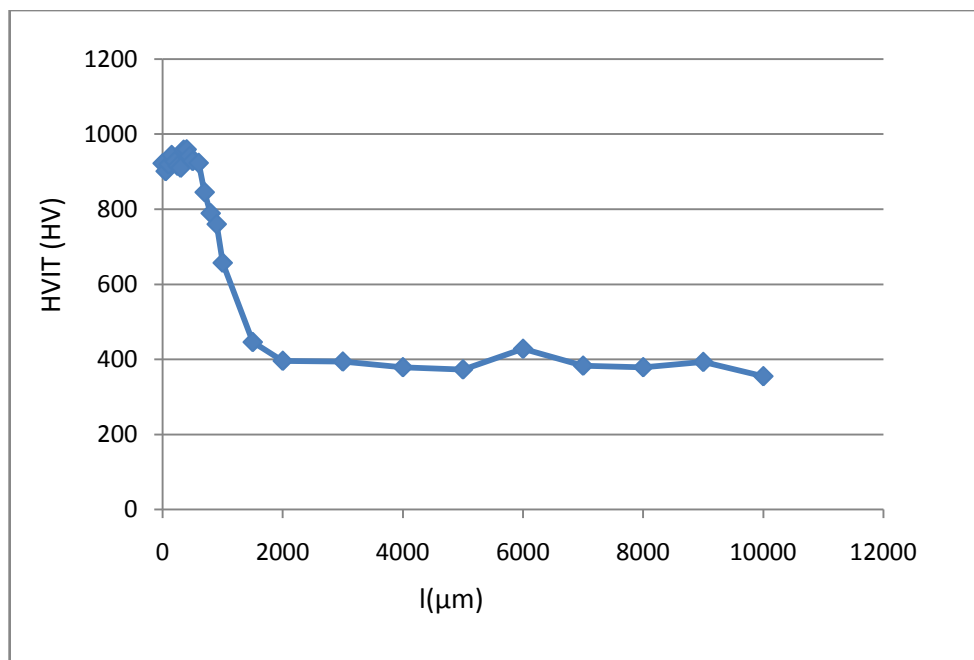
Obr. 36 Deformační práce W (pJ) pro cementování a následné kalení

Hodnota elastické deformační práce pozvolně klesala a byla výrazně nižší než hodnota plastické deformační práce, která rostla se vzdáleností od povrchu. Celková deformační práce se skládala z velké části z plastické deformační práce. Celková deformační práce na povrchu byla přibližně 315000 pJ a ve středu její hodnota byla přibližně 500000 pJ.

7.3.2 Cementování



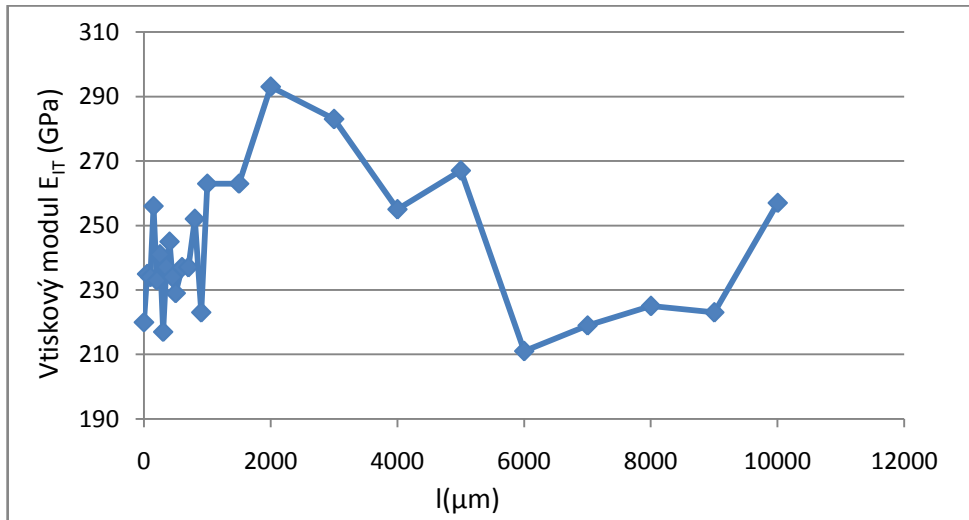
Obr. 37 Vtisková tvrdost pro cementování



Obr. 38 Vickersova tvrdost pro cementování

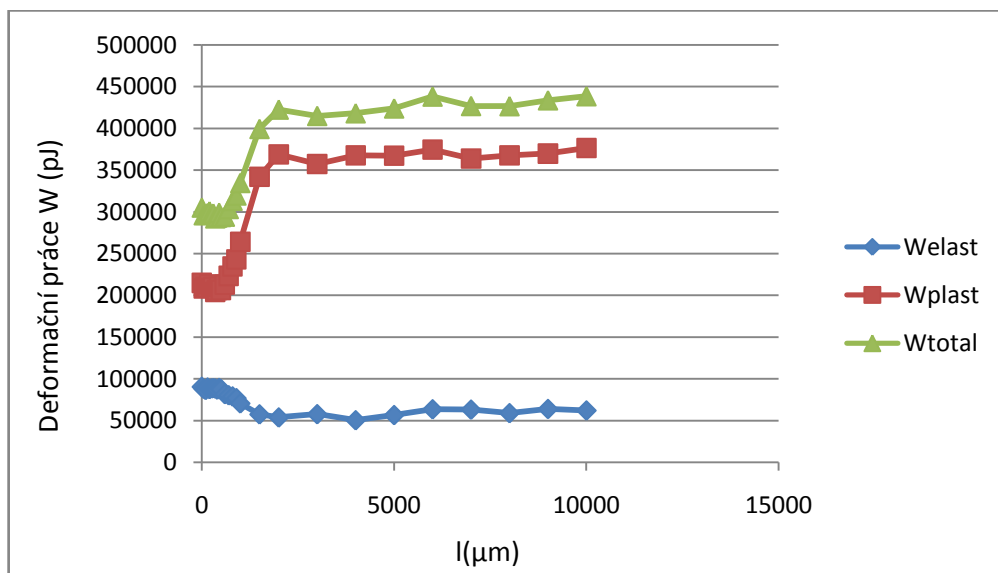
Vtisková tvrdost a Vickersova tvrdost pro cementování dosahovala vyšších hodnot než u cementování a následného kalení. Materiál byl tepelně zpracován do hloubky 2mm. Hodnota vtiskové tvrdosti klesala od povrchu ke středu, kde byla naměřena její minimální hodnota. Na povrchu byla naměřena vtisková tvrdost přibližně 10000 MPa a ve středu průřezu

byla naměřena hodnota přibližně 4000 MPa. Nárůst vtiskové tvrdosti u cementování činil 250%.



Obr. 39 Vtiskový modul E_{IR} pro cementování

Hodnoty vtiskového modulu se pohybovaly v rozmezí 210 až 295 GPa. Na povrchu byla hodnota vtiskového modulu přibližně 220 GPa a ve středu přibližně 260 GPa.

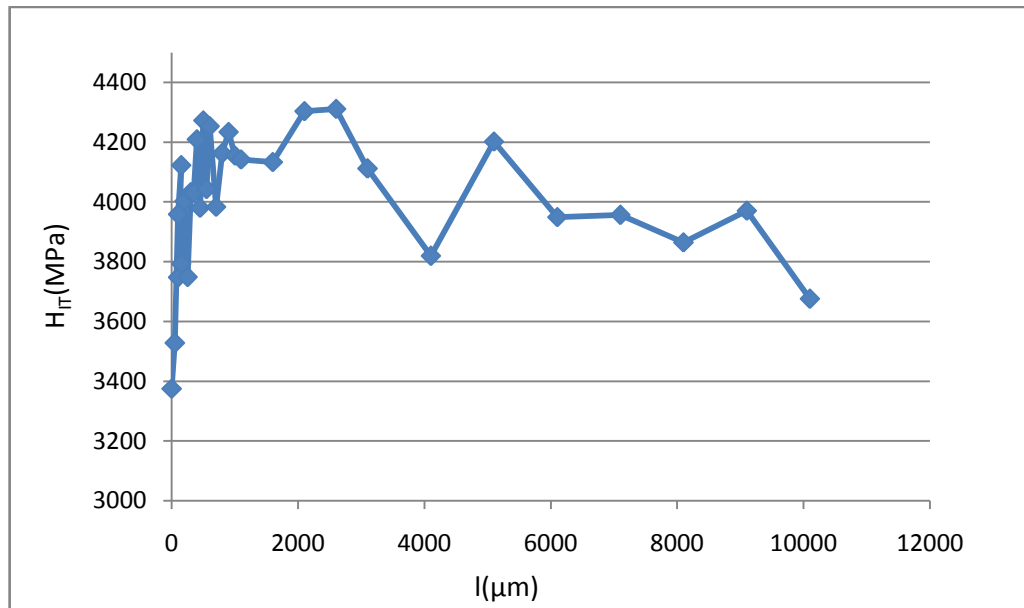


Obr. 40 Deformační práce pro cementování

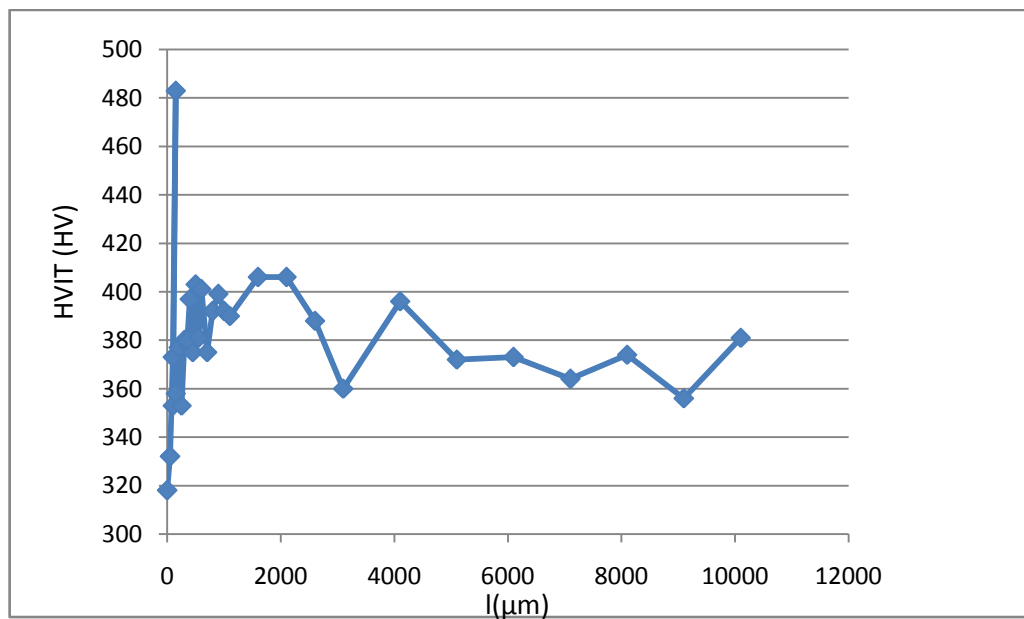
Hodnota deformační práce je velmi podobná jako u předchozího tepelného zpracování. Celková deformační práce byla z velké části opět tvořena plastickou deformační prací, která byla výrazně vyšší než elastická deformační práce. Na povrchu byla celková defor-

mační práce přibližně 300000 pJ a ve středu byla její hodnota přibližně 430000 pJ. Nárůst deformační práce souvisí s nižší tvrdostí ve středu zkušebního vzorku.

7.3.3 Kalení a popouštění

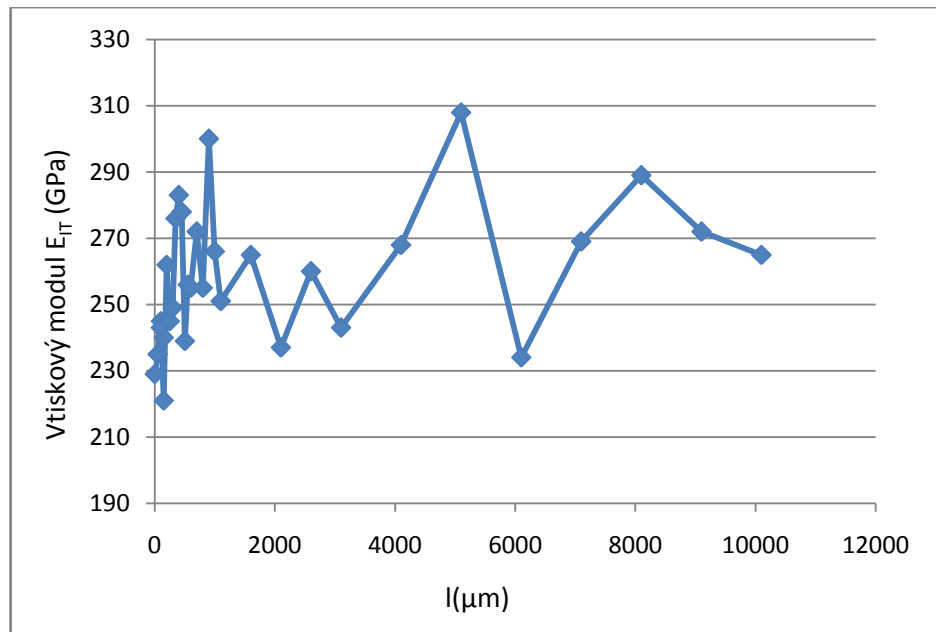


Obr. 41 Vtisková tvrdost H_{IT} pro kalení a popouštění



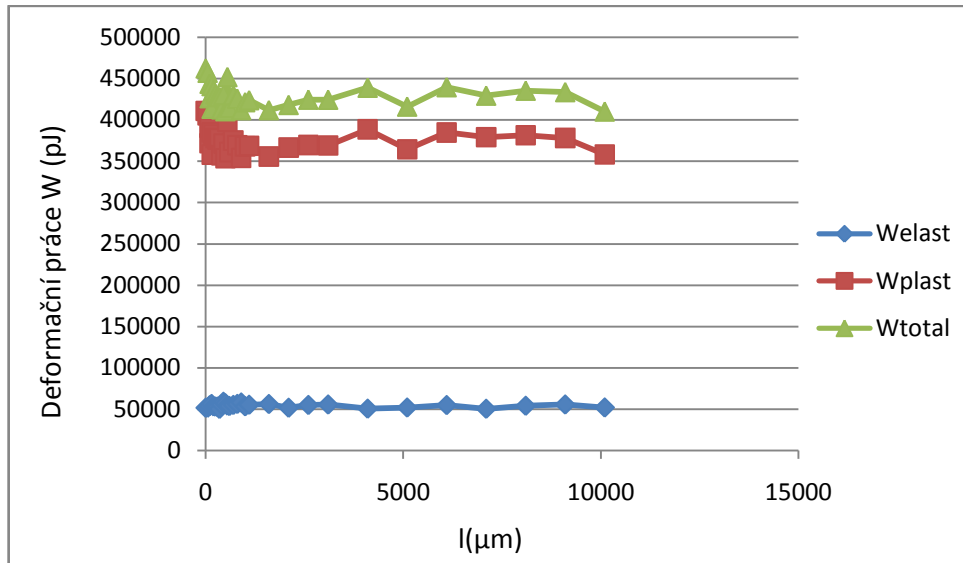
Obr. 42 Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro kalení a popouštění

Hodnoty vtiskové tvrdosti a Vickersovy tvrdosti byly výrazně nižší než u cementování. Vrstva byla přibližně 2 mm. Hodnoty vtiskové tvrdosti povrchu a středu jsou velmi podobné, protože došlo pouze k malému nárůstu tvrdosti na povrchu zkušebního vzorku. Malý nárůst tvrdosti byl způsoben materiálem 11600, který obsahuje velmi málo uhlíku a pro tepelné zpracování se nepoužívá.



Obr. 43 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro kalení a popouštění

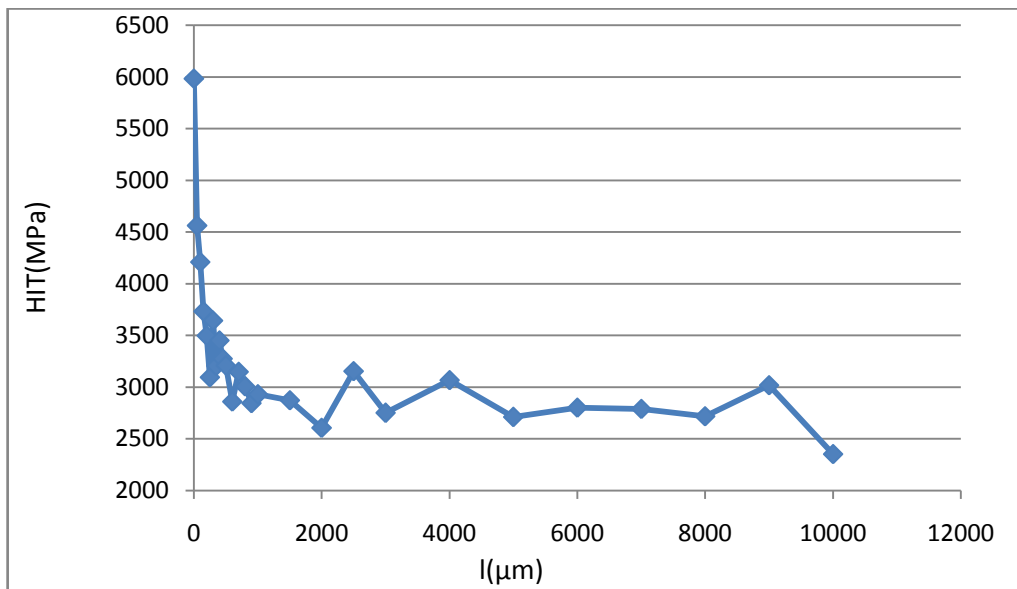
Hodnoty vtiskového modulu se pohybovaly v rozmezí 220 až 310 GPa. Na povrchu byla naměřena hodnota přibližně 228 GPa a ve středu byla neměřena hodnota přibližně 265 GPa.



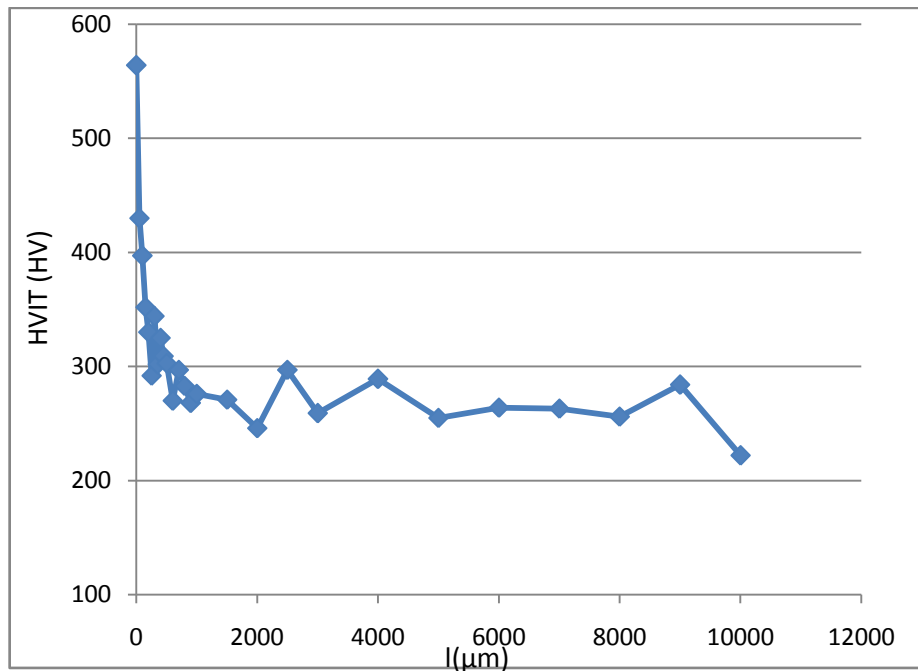
Obr. 44 Deformační práce W (pJ) pro kalení a popouštění

Hodnoty deformační práce se příliš neměnily na vzdálenosti od povrchu, protože nárůst tvrdosti byl velmi malý. Celková deformační práce byla tvořena z velké části plastickou deformační prací, která byla výrazně vyšší než elastická deformační práce.

7.3.4 Nitridování

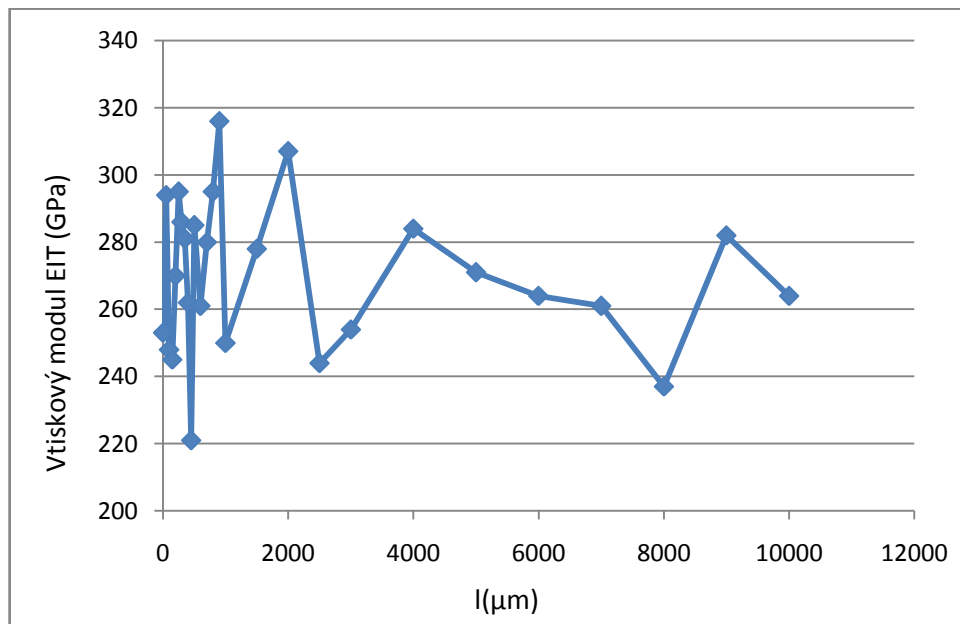


Obr. 45 Vtisková tvrdost H_{IT} (MPa) pro nitridování

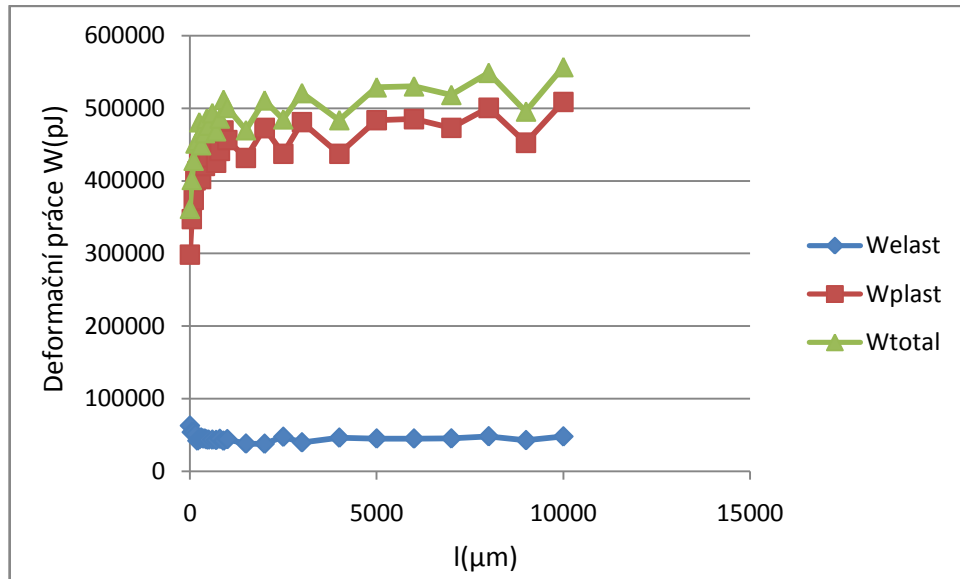


Obr. 46 Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro nitridování

Z grafů pro vtiskovou tvrdost a Vickersovu tvrdost jde vidět, že hodnoty jsou nižší než u cementování nebo cementování a následného kalení, ale jsou vyšší než u kalení a následného popouštění. Hodnota vtiskové tvrdosti na povrchu byla 6000 MPa a hodnota ve středu vzorku byla přibližně 2500 MPa. Nanitridovaná vrstva je přibližně 0,3 mm od povrchu. Oproti ostatním chemicko-tepelným zpracováním je nanitridovaná vrstva velmi tenká. Vlivem nitridování se vtisková tvrdost na povrchu materiálu zvýšila o 200%.

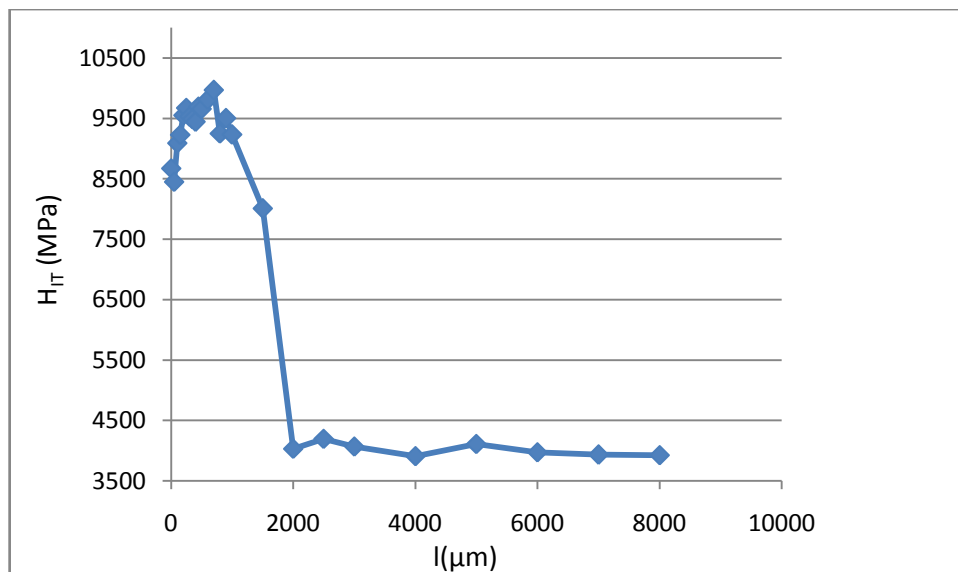
Obr. 47 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro nitridování

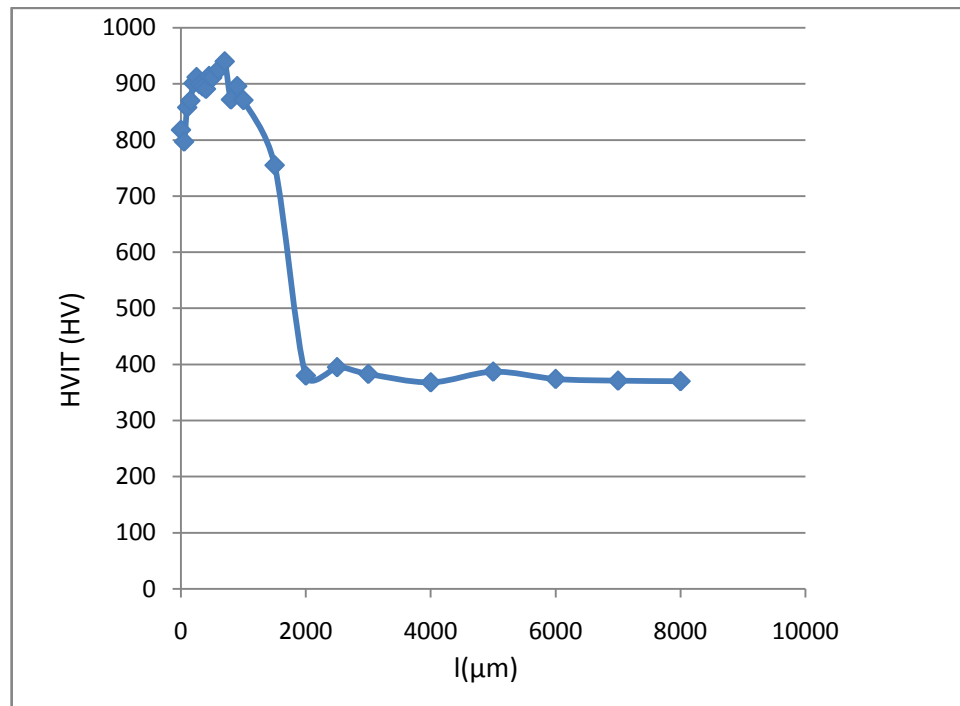
Hodnoty vtiskového modulu se pohybovaly v rozmezí 220 až 315 GPa. Na povrchu byla naměřena hodnota vtiskového modulu přibližně 250 GPa a ve středu 265 GPa.

Obr. 48 Deformační práce W (pJ) pro nitridování

Hodnota deformační práce byla vyšší než u předchozího tepelného zpracování. Stejně jako v předchozích případech celková deformační práce byla tvořena z velké části plastickou deformační prací, která byla výrazně vyšší než elastická deformační práce. Na povrchu byla celková deformační práce přibližně 350000 pJ a směrem ke středu rostla postupně na hodnotu 550000 pJ.

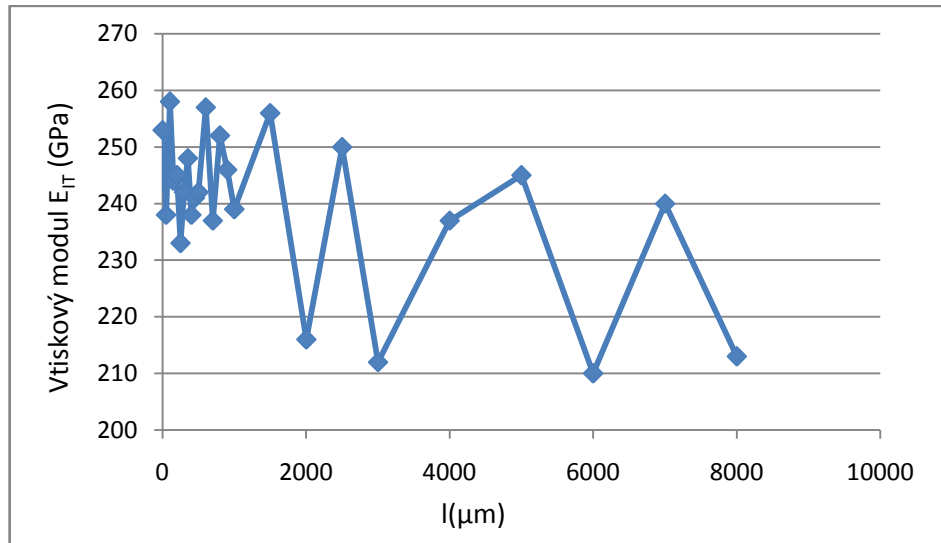
7.3.5 Povrchové kalení

Obr. 49 Vtisková tvrdost H_{TT} (MPa) pro povrchové kalení



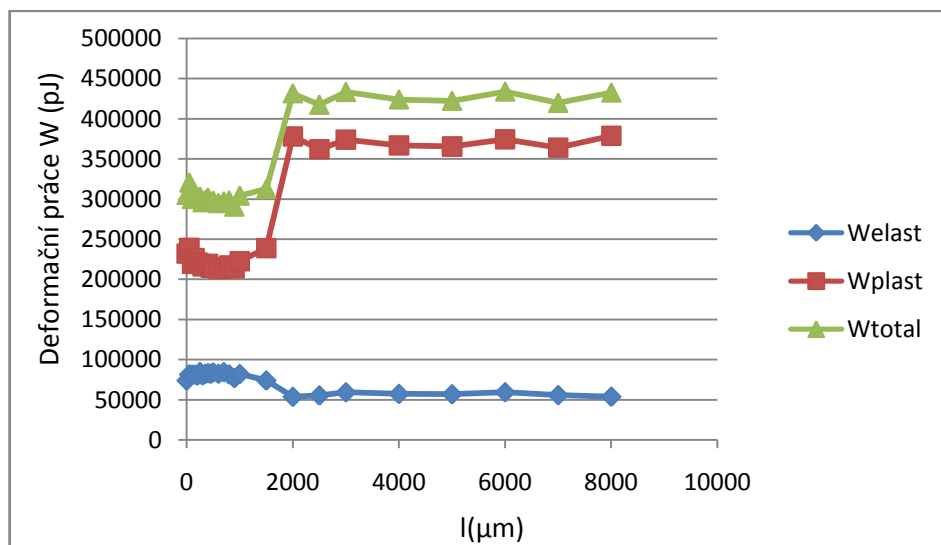
Obr. 50 Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro povrchové kalení

Hodnoty vtiskové tvrdosti a Vickersovy tvrdosti u povrchového kalení dosahují velmi podobných hodnot jako u cementování. Hloubka povrchového kalení je přibližně 2 mm. Vtisková tvrdost na povrchu je přibližně 9500 MPa a směrem ke středu klesá, kde byla naměřena hodnota 3750 MPa. Nárůst vtiskové tvrdosti u povrchového kalení činil 230%.



Obr. 51 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro povrchové kalení

Hodnoty vtiskového modulu se pohybovaly v rozmezí 210 až 258 GPa a byly nižší než u předchozích měření. Na povrchu byla naměřena hodnota vtiskového modulu přibližně 245 GPa a ve středu byla naměřena hodnota 215 GPa.



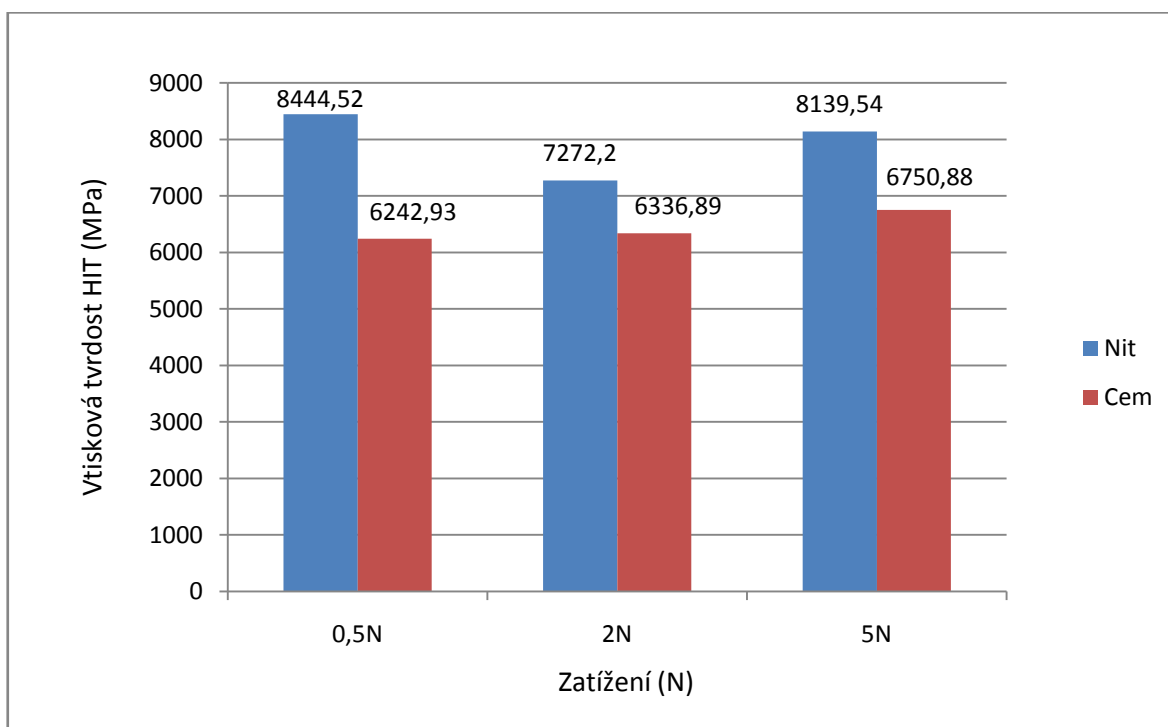
Obr. 52 Deformační práce W (pJ) pro povrchové kalení

Celková deformační práce je stejně jako u ostatních měření z velké části tvořena plastickou deformační prací. Na povrchu byla celková deformační práce přibližně 300000 pJ a směrem ke středu rostla, kde byla naměřena hodnota 425000 pJ. Vyšší deformační práce ve středu vzorku je způsobena nižší tvrdostí.

8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V praktické části bylo provedeno měření mikrotvrdomosti jednotlivých vzorků metodou DSI. Při měření povrchu byl každý zkušební vzorek měřen desetkrát při zatížení 0,5N, 2N, 5N. Měření bylo provedeno v laboratořích Ústavu výrobního inženýrství na UTB.

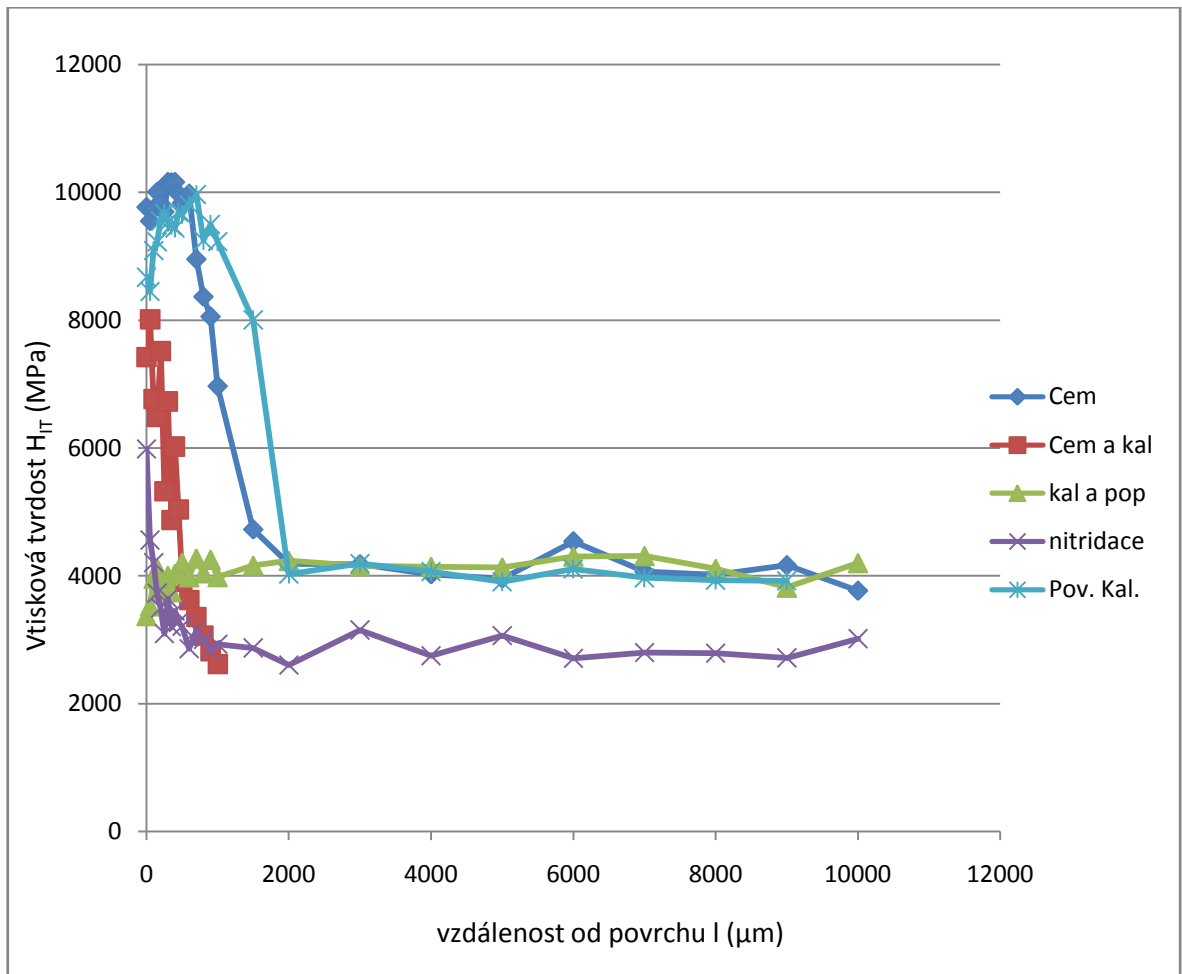
8.1 Porovnání vtiskové tvrdosti při různých zatíženích



Obr. 53 Vtisková tvrdost nitridace a cementace při různých zatíženích

Z grafu lze vyčíst, že vtisková tvrdost u nitridování je vyšší než u cementování a to při všech velikostech zatížení.

8.2 Porovnání vtiskové tvrdosti pro jednotlivé druhy tep. zpracování

Obr. 54 Vtisková tvrdost H_{IT} pro jednotlivé druhy tepelného zpracování

Z grafu lze vyčíst, že nejvyšší tvrdosti v průřezu vzorku bylo dosaženo při cementování a povrchovém kalení, naopak nejnižší tvrdosti bylo dosaženo při kalení a následném popouštění.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla rozdělena na část teoretickou, která byla zaměřena na rozdělení jednotlivých druhů ocelí a tepelného zpracování, tvrdost a instrumentovanou zkoušku DSI a na část praktickou, ve které byly jednotlivé vzorky nařezány na automatické pile BUEHLER IsoMet 4000, poté byly zalisovány do materiálu EpoMet G MoldingCompound 20-3380-064, od firmy Buehler z důvodu upnutí do metalografické leštičky a vyleštěny na leštícím stroji Eco-Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler. Poté bylo provedeno měření Instrumentované zkoušky tvrdostina přístroji MicroCombi Tester od firmy CSM Instruments dle normy ČSN EN ISO 14577. Vzorky se týkaly materiálu 16220 bez tepelného zpracování a cementovaný a následně kalený, materiál 14220 bez tepelného zpracování a jeden vzorek cementovaný a jeden vzorek nitridovaný, materiál 11600 bez tepelného zpracování a kalený a následně popouštěný a materiálu 12050 bez tepelného zpracování a s povrchovým kalením. Jednotlivé vzorky byly zatíženy silami 0,5N, 2N a 5N. Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a graficky znázorněny.

Z naměřených výsledků je patrné, že nejvyšší tvrdosti na povrchu vzorku dosáhneme cementováním a následným kalením nebo nitridováním, naopak nejnižší tvrdosti na povrchu vzorku dosáhneme povrchovým kalením a kalením s následným popouštěním. Nejvyšší tvrdosti v průřezu vzorku bylo dosaženo při cementování a povrchovém kalení, naopak nejnižší tvrdosti bylo dosaženo při kalení a následném popouštění.

Hodnota deformační práce se lišila zatížením a druhem materiálu. Hodnota deformační práce rostla se zatížením. Nejvyšší hodnota elastické deformační práce byla přibližně 2,8 milionu pJ a byla neměřena při zatížení 5N u materiálu 16220, který byl cementovaný a kalený. Nejvyšší hodnotaplastické deformační práce byla přibližně 17 milionů pJ a byla naměřena při zatížení 5N u základního materiálu 16220.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MACHEK, V., SODOMKA, J., Speciální kovové materiály, Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [2] HLUCHÝ M., BENEŠ J., Strojírenská technologie, Praha: SNTL, 1981.
- [3] SKÁLOVÁ, J., KOUTSKÝ, J., MOTYČKA, V., Nauka o materiálech, Plzeň: Západočeská univerzita, 2010, ISBN 978-80-7043-874-9.
- [4] SILBERNAGEL, A., Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů, Ostrava: Ko-vosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [5] ŠAŠINKA, R., Diplomová práce – Mikrotvrdost 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: Ko-vosil, 2011. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [8] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., Strojírenská technologie 1, 1. díl. Scienta Praha 2007, ISBN 978-80-86960-26-5
- [9] PÍŠEK, F., Nauka o materiálech, SNTL Praha, 1989, ISBN 04-205-89.
- [10] MACEK, K., Tepelné zpracování kovových materiálů, Praha: ČVUT, 2008
- [11] MACHEK, V., SODOMKA, J., Kovy a kovové materiály, Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02568-3.
- [12] PLUHAŘ, J. a kolektiv, : *Nauka o materiálech*. SNTL Praha, 1989
- [13] VELES, Pavol. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, Bratislava: Alfa, 1985.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EN Evropská norma

ČSN Česká norma

ISO Mezinárodní norma

HV Mikrotvrдость dle Vickerse

HB Mikrotvrдость dle Brinella

HR Mikrotvrдость dle Rockwella

F Zátěžná síla (N)

H_{IT} Vtisková tvrdost (MPa)

E_{IT} Vtiskový modul (GPa)

W_{elast} Elastická deformační práce (pJ)

W_{plast} Plastická deformační práce (pJ)

W_{total} Celková deformační práce

ν_s Poissonův poměr zkušebního tělesa

ν_i Poissonův poměr vnikajícího tělesa

E_r Redukovaný modul vtiskového kontaktu

E_i Kontaktní poddajnost

A_p Průměr kontaktní plochy

C_{IT} Vtiskové tečení

n počet měření

s směrodatná odchylka

\bar{x} aritmetický průměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma číselného značení	13
Obr. 2 Schematické znázornění průběhu tepelného zpracování	15
Obr. 3 Žihací teploty u uhlíkových ocelí	16
Obr. 4 Lomené (1) a martenzitické (2) kalení	18
Obr. 5 Lomené kalení	19
Obr. 6 Izotermické kalení	19
Obr. 7 Kalení se zmrazováním	20
Obr. 8 Diagram závislosti tvrdosti na popouštěcí teplotě	20
Obr. 9 Podstata zkoušky dle Vickerse	25
Obr. 10 Podstata zkoušky dle Knoopa	26
Obr. 11 Podstata zkoušky dle Rockwella	28
Obr. 12 Plastická a pružná část práce vnikacího procesu	30
Obr. 13 Porovnání odezvy materiálu na jednoosé a víceosé namáhání	32
Obr. 14 Přesná automatická pila BUEHLER IsoMet 4000	37
Obr. 15 Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000	37
Obr. 16 Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO	38
Obr. 17 Mikrotvrdoměr – MicroCombi Tester	39
Obr. 18 Vtisková tvrdost H_{IT} (MPa) pro zatížení 0,5N	41
Obr. 19 Vickersova tvrdost (HV) pro základní materiály a tepelně zpracované	41
Obr. 20 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro základní materiály a tepelně zpracované	42
Obr. 21 Elastická deformační práce W_{elast} (pJ) pro zatížení 0,5N	42
Obr. 22 Plastická deformační práce W_{plast} (pJ) pro zatížení 0,5N	43
Obr. 23 Vtisková tvrdost H_{IT} pro zatížení 2N	43
Obr. 24 Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro zatížení 2N	44
Obr. 25 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro zatížení 2N	44
Obr. 26 Elastická deformační energie W_{elast} pro zatížení 2N	45
Obr. 27 Plastická deformační energie W_{plast} pro zatížení 2N	45
Obr. 28 Vtisková tvrdost při zatížení 5N	46
Obr. 29 Vickersova tvrdost HVIT (HV) při zatížení 5N	46
Obr. 30 Vtiskový modul E_{IT} (GPa) při zatížení 5N	47
Obr. 31 Elastická deformační práce W_{elast} (pJ) při zatížení 5N	47
Obr. 32 Plastická deformační práce W_{plast} (pJ) při zatížení 5N	48

Obr. 33	<i>Vtisková tvrdost v závislosti na vzdálenosti</i>	49
Obr. 34	<i>Vickersova tvrdost v závislosti na vzdálenosti</i>	49
Obr. 35	<i>Vtiskový modul E_{IT} (GPa) v závislosti na vzdálenosti</i>	50
Obr. 36	<i>Deformační práce W (pJ) pro cementování a následné kalení</i>	50
Obr. 37	<i>Vtisková tvrdost pro cementování</i>	51
Obr. 38	<i>Vickersova tvrdost pro cementování</i>	51
Obr. 39	<i>Vtiskový modul E_{IT} pro cementování</i>	52
Obr. 40	<i>Deformační práce pro cementování</i>	52
Obr. 41	<i>Vtisková tvrdost H_{IT} pro kalení a popouštění</i>	53
Obr. 42	<i>Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro kalení a popouštění</i>	53
Obr. 43	<i>Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro kalení a popouštění</i>	54
Obr. 44	<i>Deformační práce W (pJ) pro kalení a popouštění</i>	55
Obr. 45	<i>Vtisková tvrdost H_{IT} (MPa) pro nitridování</i>	55
Obr. 46	<i>Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro nitridování</i>	56
Obr. 47	<i>Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro nitridování</i>	56
Obr. 48	<i>Deformační práce W (pJ) pro nitridování</i>	57
Obr. 49	<i>Vtisková tvrdost H_{IT} (MPa) pro povrchové kalení</i>	57
Obr. 50	<i>Vickersova tvrdost HVIT (HV) pro povrchové kalení</i>	58
Obr. 51	<i>Vtiskový modul E_{IT} (GPa) pro povrchové kalení</i>	59
Obr. 52	<i>Deformační práce W (pJ) pro povrchové kalení</i>	59
Obr. 53	<i>Vtisková tvrdost nitridace a cementace při různých zatíženích</i>	60
Obr. 54	<i>Vtisková tvrdost H_{IT} pro jednotlivé druhy tepelného zpracování</i>	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mezní hodnoty prvků.....	12
---------------------------------	----

P1 CD