

MĚŘENÍ NANOTVRDOSTI MODIFIKOVANÝCH OCELÍ

Kovařík Jiří

Bakalářská práce
2014

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří Kovařík**
Osobní číslo: **T11256**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření nanotvrdosti modifikovaných ocelí**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma.**
- 2. Příprava zkušebních těles pro experiment.**
- 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: **doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **23. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: KOVARIK JIRI

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit 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 22.5.2014

Kovarik Jiri

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 dílo:

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce bylo měření nanotvrdosti (mikromechanických) u vybraných druhů ocelí, které byly modifikovány tepelným a chemicko-tepelným zpracováním. Teoretická část byla zaměřena na výrobu ocelí, její tepelné, chemicko - tepelné zpracování a je zakončena používanými způsoby měření tvrdosti.

V praktické části byly porovnávány mikromechanické vlastnosti vybraných druhů ocelí, které byly tepelně (kalení) a chemicko-tepelně (cementace) zpracovány a porovnány se základním, nezpracovaným materiálem. Výsledky měření ukázaly zlepšení některých mikromechanických vlastností ocelí.

Klíčová slova: nanotvrdost, mikrotuhost, mikrokríp, tepelné zpracování, kalení, cementace

ABSTRACT

The aim of my thesis was measuring nanohardness (micromechanical) for selected types of steel that have been modified by heat and chemical-heat treatment. The theoretical part is focused on production of steel, its thermal, chemical - heat treatment and is finished with used methods of measuring hardness.

In the practical part were compared micromechanical properties of selected types of steel which was heat (hardening) and thermochemical (cementation) processed and compared with the basic, raw material. The measurement results showed improvement in some micromechanical properties of steel.

Keywords: nanohardness, microrigidity, mikrokríp, heat treatment, hardening, cementation

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph. D., za odborné vedení, připomínky, ochotu a cenné rady, které mi poskytl při psaní této práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 CHARAKTERISTIKA OCELI.....	11
1.1 VÝROBA OCELI.....	11
1.2 ROZDĚLENÍ A OZNAČENÍ OCELÍ	12
1.3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI OCELI.....	14
2 TEPELNÉ A CHEMICKO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	16
2.1 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	16
2.1.1 Žihání	16
2.1.2 Kalení a popouštění.....	17
2.2 CHEMICKO - TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	19
2.2.1 Cementování.....	19
2.2.2 Nitridování	20
2.2.3 Nitridocementování.....	21
2.2.4 Šeradování.....	21
3 TVRDOST OCELI.....	22
3.1 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	22
3.2 MĚŘENÍ NANOTVRDOSTI	23
4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	24
4.1 TVRDOMĚR POLDI.....	24
4.2 BAUMANOVO KLÁDÍVKO.....	25
4.3 SHOREHO SKLEROSKOP	26
4.4 DUROSKOP	27
5 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI	28
5.1 BRINELL.....	28
5.2 VICKERS.....	29
5.3 KNOOP	31
5.4 ROCKWELL.....	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	33
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	34
6.1 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	34
7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	36
ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	49
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
SEZNAM OBRÁZKŮ	52
SEZNAM PŘÍLOH.....	53

ÚVOD

Kovy doprovází vývoj lidstva již několik tisíciletí. Od začátků až k dnešní podobě prošla výroba oceli složitou cestou. Cesta od řemeslné malovýroby až po dnešní průmyslovou velkovýrobu. Se zvyšující se výrobou vzrostly i požadavky na kvalitu oceli. Zdokonalování se týkalo, jak samotného procesu výroby, tak dodatečnými úpravami. Dodatečné úpravy (modifikace) jsou tepelné nebo chemicko - tepelné zpracování oceli. Těmito úpravami se výrazně zlepšují mechanické vlastnosti ocelí, které jsou mnohdy vyžadovány od odběratele. Tyto vlastnosti je zapotřebí znát, z důvodů následného použití těchto ocelí, a proto se tyto oceli kontrolují mechanickými zkouškami, mezi které patří i zkouška tvrdosti.

Měření tvrdosti se provádí dvěma způsoby. Statické vnikací zkoušky tvrdosti spočívají ve vtlačování vnikacího tělesa do povrchu vzorku. Tyto zkoušky jsou časově náročnější, ale poskytnou nám nejlepší výsledky o průběhu namáhání. Dynamické měření zkoušky tvrdosti je na principu pružného odrazu tělesa o standardní hmotnosti. Tyto zkoušky jsou časově méně náročné a spolehlivé.

I. TEORETICKÁ ČÁST

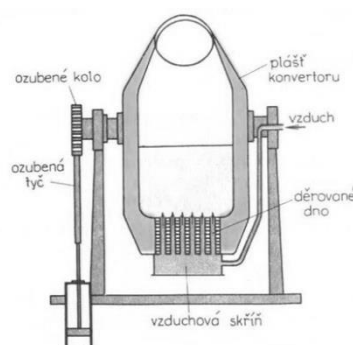
1 CHARAKTERISTIKA OCELI

Ocel je slitina železa s uhlíkem a dalšími legujícími prvky, které obsahují méně než 2,11 % uhlíku. V praxi jsou jako oceli označovány slitiny, které obsahují převážně železo, a které je možno přetvářet v další sloučeniny. Podle obsahu jednotlivých legujících (slitinových) prvků se dělí na legované a nelegované. Podle celkového obsahu legujících prvků se pak oceli dělí na nízkolegované (do 2,5 %), středně legované (2,5-5 %), výše legované (5-10 %) a vysoce legované (nad 10 %).

1.1 Výroba oceli

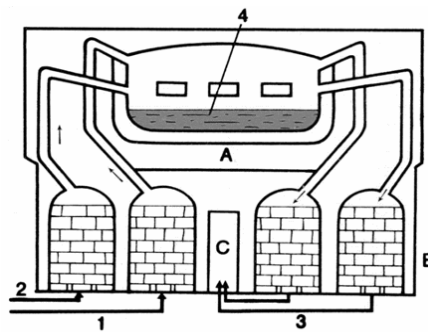
Surové železo vyrobené ve vysokých pecích má poměrně vysoký obsah uhlíku a dalších nežádoucích látek - křemíku, síry, fosforu, kyslíku, dusíku a vodíku. Zejména uhlík způsobuje, že surové železo je křehké a nedá se zpracovávat kováním a tažením. Proto se prakticky všechno surové železo dále upravuje tak, aby získalo požadované mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Tato úprava pomocí změny chemického složení, tváření a tepelného zpracování ústí v pestrou paletu vyráběných ocelí. Výroba ocelí roztavením surového železa a dalšími procesy se provádí v metalurgických zařízeních několika typů: [1]

Konvertor: Vháněním kyslíku do roztaveného surového železa, a ten snižuje nežádoucí prvky obsažené v surovém železe.



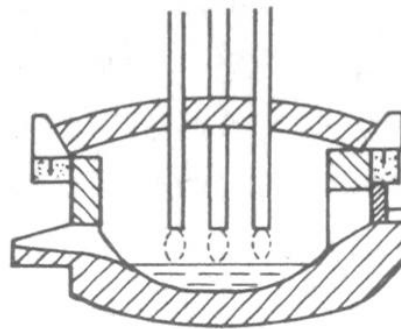
Obr. 1 Konvertor na výrobu oceli [1]

Siemens – Martinské pece: Pomocí přehřátých plynů se surové železo a ocelový odpad zkujňují. Na následujícím obrázku vidíme výrobu oceli v Siemens - Martinské peci. Kde písmenem (A) je označena Siemens – Martinská pec, (B) jsou komory na vyhřívání vzduchu, (C) je odvod spálených plynů, (1) je vzduch, (2) generátorový plyn, (3) jsou spálené plyny, (4) je tavěná směs.



Obr. 2 Siemens-Martinská pec [2]

Elektrické obloukové pece: Princip je hoření elektrického oblouku mezi elektrodami a vsázkou materiálu, a tím dochází k natavování vsázky.



Obr. 3 Elektrická oblouková pec [3]

1.2 Rozdělení a označení ocelí

Členění ocelí je možné z několika hledisek, například podle:

- výrobního pochodu rozlišujeme ocel martinskou, elektroocel, kyslíkovou ocel,

- účelu použití máme ocel konstrukční a nástrojovou,
- zpracování máme ocel k tváření a na odlitky,
- chemického složení máme ocel uhlíkovou (nelegovanou) nebo slitinovou (legovanou).

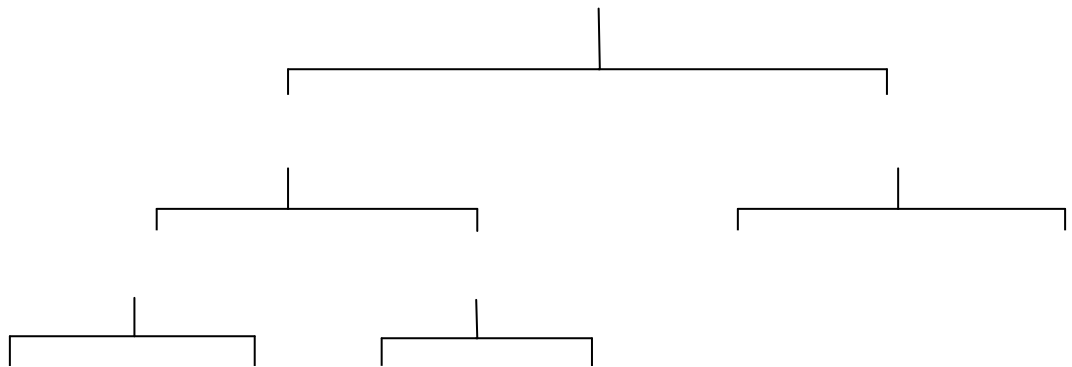
Oceli se dělí podle chemického složení na oceli uhlíkové a slitinové (legované). Legování je přidávání různých prvků, za účelem získání požadovaných vlastností dané oceli.

Uhlíková ocel je slitina železa s uhlíkem, jehož je méně než 2,14%. Má obvyklý obsah doprovodných prvků bez úmyslného přidávání dalších prvků. Vlastnosti této oceli jsou dány především obsahem uhlíku. Doprovodné prvky jsou především mangan (do 0,9%), křemík, nikl (do 0,5%), chrom (do 0,3%), wolfram, kobalt (do 0,2%), molybden, vanad, titan, hliník (do 0,1%). Slitinové oceli mají pro zlepšení svých vlastností úmyslně přidané prvky např. chrom, wolfram, vanad, nikl, molybden apod. a to nad hranici uvedenou výše. Tyto prvky pak upravují dále některé vlastnosti těchto ocelí.

Podle účelu se oceli rozdělují na dva základní druhy a to:

Konstrukční oceli – používají se na stavební i strojní součásti, které musí být pevné, dostatečně houževnaté a odolné proti různým druhům namáhání, otřesům, rázům apod. Mohou být buď nelegované (oceli třídy 10, 11, 12) nebo legované (oceli třídy 13, 14, 15, 16, 17).

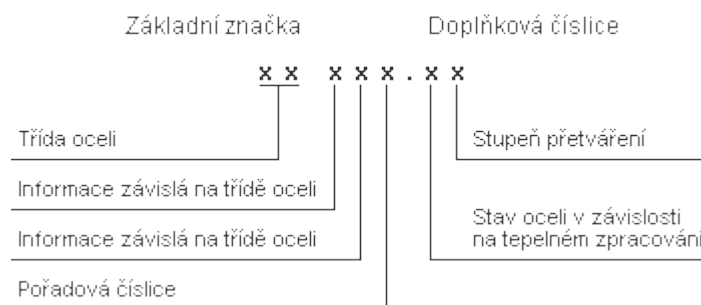
Nástrojové oceli – oceli třídy 19 jsou také buď nelegované nebo legované a používají se především pro výrobu nástrojů. Musí splňovat požadavky kladené na nástroje a to jak ruční, tak i strojní.[3]



Obr. 4 Rozdělení oceli

Na následujícím schématu máme vysvětleno číselné označení ocelí.

Schéma číselného značení:



Obr. 5 Schéma číselného označení [4]

1.3 Mechanické vlastnosti oceli

Mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí jsou v první řadě ovlivněny obsahem samotného uhlíku. Je zřejmé, že s rostoucím obsahem uhlíku roste podíl tvrdého a

křehkého cementitu Fe_3C v mikrostruktuře, což znamená, že zároveň roste tvrdost a klesá tažnost Ocelí. Mez pevnosti v tahu dosahuje určitého maxima při obsahu uhlíku cca 0,8 -1,1 %. Vyšší obsahy uhlíku totiž vedou k tvorbě kontinuálního síťoví cementitu, které má na pevnostní vlastnosti spíše negativní vliv. Uhlík ovlivňuje i technologické vlastnosti ocelí. Díky tvrdému cementitu v mikrostruktuře uhlík zhoršuje zejména tvářitelnost ocelí za studena. Rovněž zhoršuje jejich svařitelnost.[2]

Mezi mechanické vlastnosti patří: pevnost, pružnost, tvrdost, houževnatost, plastičnost.

- Pevnost – je maximální napětí, které je třeba pro porušení materiálu. Označuje se R_m a jednotkou je Pa (pascal), což je kg/m^2 . Pevnost se spočítá jako $R_m = \frac{F}{S}$, kde F je maximální síla potřebná pro porušení materiálu a S je plocha průřezu.
- Pružnost – je taková vlastnost materiálu, kdy materiál se působením vnějších sil deformuje a po zániku působení vnějších sil se vrací do původního stavu.
- Tvrdost – je definována jako odolnost materiálu proti vnikání cizích částic.
- Houževnatost – je definována jako množství práce potřebné k rozdělení zkušebního vzorku na dvě části.
- Plastičnost (plasticita) - schopnost trvale se nevratně deformovat účinkem vnější síly. Podle způsobu namáhání rozlišujeme pak různé druhy pevností. Namáhání můžeme mít v tahu, tlaku, ohybu, smyku (stříhu) nebo v krutu. Zvláštním druhem namáhání je vzpěr, což je v podstatě kombinace tlaku a ohybu a vyskytuje se u štíhlých a dlouhých součástí.[3]

2 TEPELNÉ A CHEMICKO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Ve druhé kapitole bakalářské práce se budu zabývat tepelnými a chemicko - tepelnými modifikacemi ocelí.

2.1 Tepelné zpracování

Tepelným zpracováním rozumíme všechny postupy, při nichž předmět nebo materiál v tuhém stavu záměrně ohříváme a ochlazujeme určitým způsobem tak, aby získal požadované vlastnosti. Tepelným zpracováním ovlivňujeme mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, tažnost, vrubovou houževnatost, odolnost proti opotřebení...). V mnoha případech je s tím spojena změna struktury, proto se vyžaduje znalost rovnovážných diagramů a fázových změn. Protože dosažení rovnovážného stavu při fázových změnách v tuhém stavu je zcela určováno difuzí, bude pro výsledek tepelného zpracování rozhodující, jaký vliv bude mít průběh difúze. Průběh difúze je ovlivněn jednak teplotou a jednak výdrží (dobou) na určité teplotě, při níž ještě difúze může probíhat. Právě způsob ovlivnění difúze dělí tepelné zpracování do dvou základních skupin:

- žíháním – Způsob, u kterého je nebržděná difuze
- kalení – Způsob, u kterého je omezena difuze [4]

2.1.1 Žíhání

Je založeno na pomalém a rovnoměrném ohřevu. Po ohřevu a výdrži na teplotě se materiál pomalu ochlazuje v peci, aby se dosáhlo rovnovážného stavu ve struktuře materiálu. Účelem je zjemnit strukturu z austenitické struktury na strukturu feriticko - perlitickou a odstranit vnitřní pnutí.

Účel žíhání: odstranit vliv jiných operací na strukturu, snížit tvrdost, vytvořit struktury vhodné k obrábění nebo tváření za studena – jemné, snížit vnitřní pnutí

Podle výše teploty ohřevu rozdělujeme žíhání na:

- Žíhání bez překrystalizace - výše teploty je taková, při níž nedochází k fázovým přeměnám jednotlivých struktur. Do tohoto žíhání patří: Rekrytalizační žíhání - teplota ohřevu je asi 550 - 700 °C. Používá se pro odstranění zpevnění při tváření za studena u ocelí s nízkým obsahem uhlíku. Žíhání ke snížení vnitřního pnutí - ohřev na teplotu 520 - 650 °C po dobu asi 1 - 2

hodiny následným ochlazováním v peci až na teplotu 250 °C. Používá se u výrobků složitých tvarů, svarků, odlitků, u kterých vzniká při výrobě velké pnutí, které by mohlo způsobit vnitřní vady v materiálu.

- Žihání na měkko - zlepšuje se obrobiteľnosť nadeutektoidních uhlíkových a slitinových ocelí. Ohřev na teplotu 660 - 690 °C po dobu 2 - 4 hodin s následným co nejpomalejším ochlazováním.
- Žihání s překrystalizací - teplota ohřevu je taková, při které dochází k přeměně ve struktuře materiálu to znamená ohřev nad rekrytalizační teplotu (723°C o 30 - 120 °C). Nejčastěji se používá normalizační žihání, kterým se odstraňuje nestejněměrná struktura vzniká při předchozím zpracování (tváření, lití).
- Podle diagramu Fe₃C platí, že žiháním na měkko se dosáhne snížení tvrdosti, zlepšení tvárnosti a obrobiteľnosti materiálu.
- Žiháním ke snížení pnutí se odstraní pnutí vzniklé ve svarcích a odlitcích. Normalizační žihání – odstraňuje všechny nestejněměrnosti struktury vzniklé mechanickým zpracováním, kováním, válcováním, lisováním. [4]

2.1.2 Kalení a popouštění

Účelem je zvýšení tvrdosti oceli. Je to ohřev součásti na teplotu okolo 800°-900°C, výdrž na této teplotě a ochlazování je velmi rychlé (nadkritickou rychlostí), získáme nerovnovážnou strukturu. Z toho plyne, že kalící teplota musí ležet nad překrystalizačními teplotami oceli. Musíme dodržet teplotu ohřevu, protože kdybychom ohřivali nad 1 000°C rozpustí se jenom cementit, který je již tvrdý. [4]

Podmínky kalení:

- kalitelnost: Je to schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšení tvrdosti. Přitom nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli po kalení je závislá především na obsahu uhlíku. Při nízkém obsahu uhlíku se nedosáhne vysoké tvrdosti. Proto považujeme teprve uhlíkové oceli obsahující více než 0.35% uhlíku za dobře kalitelné a méně než 0.2% C za nekalitelné. U slitinových ocelí je hranice obsahu uhlíku posunuta k nižším hodnotám. Tvrdost martenzitu již mnoho nestoupá, zvyšuje-li se obsah uhlíku nad eutektoidní obsah. Nejvyšší tvrdost martenzitu bývá HV=950 nebo HRC=66. Ostatní prvky mají na tvrdost po kalení jen nepatrný vliv.

- prokalitelnost: Je to schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšení tvrdosti. Přitom nejvyšší dosažitelná tvrdost oceli po kalení je závislá především na obsahu uhlíku. Při nízkém obsahu uhlíku se nedosáhne vysoké tvrdosti. Proto považujeme teprve uhlíkové oceli obsahující více než 0.35% uhlíku za dobře kalitelné a méně než 0.2% C za nekalitelné. U slitinových ocelí je hranice obsahu uhlíku posunuta k nižším hodnotám. Tvrdost martenzitu již mnoho nestoupá, zvyšuje-li se obsah uhlíku nad eutektoidní obsah. Nejvyšší tvrdost martenzitu bývá HV=950 nebo HRC=66. Ostatní prvky mají na tvrdost po kalení jen nepatrný vliv. [6]

Mezi kalící prostředí patří voda, olej, roztavené solné lázně, roztavené kovové lázně a vzduch.

Popouštění: Ocel zakalená na martenzitickou strukturu má značné vnitřní pnutí a je kromě toho, že má velkou tvrdost, také značně křehká. Aby se snížilo vnitřní pnutí a tím i křehkost (popř. k získání houževnaté struktury), je vhodné ocel po kalení popouštět. Je to ohřev na určitou (popouštěcí) teplotu.

Martenzit (přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α) vzniklý po základním kalení má jehlicovitý tvar a říkáme mu martenzit tetragonální. Při popouštění na teploty 80 až 180 C° podle druhu oceli dojde uvnitř jehlic k vyloučení (precipitaci) uhlíku v podobě přechodných fází (karbidů). Toto stadium martenzitu nazýváme kubickým martenzitem. Vyznačuje se mírným, někdy velmi nepatrným poklesem tvrdosti, ale výraznějším poklesem křehkosti. V rozmezí teplot 180 - 300 C° se rozpadá zbytkový austenit na bainit. Současně v teplotním rozmezí 200 - 400 C° dochází k úplnému rozpadu martenzitu na ferit a cementit ve velmi jemné formě. Přitom vyloučený cementit má tvar kuliček a zůstává ještě částečně zachována jehlicovitá struktura. Za teplotu nad 400 C° až do 700 C° se postupně cementitové kulovité částice zvětšují a mizí jehlicovitý charakter struktury. Výsledkem je jemná struktura s kuličkovitým cementitem v základní feritické hmotě a označujeme ji názvem sorbit. Tato struktura se vyznačuje pevností a vysokou houževnatostí.

Z hlediska výše popouštěcích teplot dělíme popouštění do dvou skupin:

- popouštěné za nízkých teplot asi do 350 C°, které často v praxi nazýváme napouštěním. Protože je používáme převážně u nástrojových ocelí, můžeme také mluvit o popouštění nástrojů, což pro praktické účely je vhodnější rozlišení.
- popouštění za vysokých teplot na 350 až 700 C°. Tomuto popouštění ve spojení s kalením říkáme podle ČSN 42 0004 zušlechťování. [6]

2.2 Chemicko - tepelné zpracování

Podstatou všech způsobů chemicko-tepelného zpracování je úmyslně vyvolaná změna chemického složení oceli v povrchových vrstvách, které se projeví zvýšenou tvrdostí buď přímo (nitridování) nebo po následujícím kalení (cementování). Hlavním účelem chemicko-tepelného zpracování je zvýšení tvrdosti povrchu a jeho odolnosti proti opotřebení a i únavě (stejně jako u povrchového kalení). Jádro součásti má tvrdost mnohem nižší a je houževnatější. Některé další způsoby chemicko-tepelného zpracování (hliníkování, difúzní chromování) zvyšují hlavně odolnost součástí proti korozi a proti žáru. Změny chemického složení povrchové vrstvy se dosahuje ohřevem, při němž se povrch obohacuje uhlíkem => cementování, dusíkem => nitridování, sírou => sulfidování, nebo kombinací těchto prvků. [6]

Mezi chemicko–tepelné úpravy patří: cementování, nitridování, nitrocementování, šeradování.

2.2.1 Cementování

Cementováním se označuje způsob chemicko-tepelného zpracování, při kterém se povrch oceli sytí uhlíkem na eutektoidní popřípadě těsně nadeutektoidní koncentraci (obvykle 0,8 % až 1,0 % uhlíku). Vysoké povrchové tvrdosti cementovaných součástí (až 800 HV) se dosahuje jejich následným kalením a nízkoteplotním popouštěním, zatímco jádro zůstává relativně houževnaté, neboť k cementování se převážně používají oceli s obsahem uhlíku v rozmezí 0,10 % až 0,25 %. Cementují se například ozubená kola, řetězová kola, drážkované hřídele, čepy apod. Sycení povrchu předmětu uhlíkem se provádí při potřebných teplotách, kdy je struktura cementační oceli austenitická, a ve které je podstatně vyšší rozpustnost

uhlíku než ve feritu. Překročení mezní rozpustnosti uhlíku v austenitu by vedlo k precipitaci sekundárního cementitu v povrchové vrstvě, což by mělo za následek její nežádoucí i křehnutí. Teploty cementování se obvykle pohybují v rozmezí 850 °C až 950°C. Nižších teplot (pod 850 °C) se používá jen u součástí o velmi malých průřezích. Naopak použití cementačních teplot až 1 150 °C je podmíněno volbou tzv. jemnozrnných cementačních ocelí.

Technologie cementování se dělí podle použitého prostředí, které bývá sytké (tuhé), kapalně nebo plynné. Při cementování v sytkém prostředí jsou předměty zasypány v uzavřených krabicích práškovou směsí dřevěného uhlí se 7 až 20 obj. % uhlíčitanu barnatého. Na cementační teplotě reaguje dřevěné uhlí s kyslíkem uzavřeným v krabici na oxid uhelnatý. [8]

2.2.2 Nitridování

Nitridováním se rozumí sycení povrchu oceli dusíkem, přičemž vysoké povrchové tvrdosti se dosahuje již během vlastního sycení povrchu v důsledku vzniku velmi tvrdých chemických sloučenin dusíku se železem a s některými přísadovými kovy (zpravidla nitridy nebo karbonitridy).

Základní představu o struktuře nitridované vrstvy lze získat z rovnovážného diagramu Fe-N. Fáze gama a alfa v systému Fe-N jsou "dusíkový austenit a ferit. Při obsahu asi 6 hm. % dusíku vzniká d'- nitrid železa (Fe₄N), který je stálý do teploty 680 °C, při které se přeměňuje na nitrid f, který se vyznačuje velmi širokým rozmezím složení a existuje ve značném rozmezí teplot.

Povrch nitridované součásti se obohacuje dusíkem na koncentraci až 12 hm. % N při teplotě 500 °C – 550 °C. Z toho vyplývá, že směrem od povrchu se ve struktuře vyskytují postupně vrstvy obsahující fáze f, d' + f, d' a ` + d'. V ocelích, tj. za přítomnosti uhlíku, vznikají i karbonitridy. V ocelích legovaných nitridotvornými prvky (nejčastěji přísady Cr, Al a V) vytváří dusík speciální nitridy (CrN, Cr₂N, AlN, VN), případně karbonitridy a struktura vrstvy se pak stává značně složitou. Ve srovnání s nitridy železa jsou nitridy uvedených legujících prvku stálejší za vysokých teplot a také jejich tvrdost je vyšší.

Konstrukční oceli se obvykle nitridují v plynném prostředí v plynotěsných zvonových, šachtových nebo komorových pecích s nucenou cirkulací atmosféry. Zdro-

jem dusíku je plynný čpavek, který ve styku s povrchem oceli disociuje podle rovnice $2 \text{NH}_3 \rightarrow 2 \text{N} + 3 \text{H}_2$. Vzniklý atomární dusík je zčásti absorbován povrchem oceli a v difúzní vrstvě vytváří nitridy, část atomu dusíku vytváří molekuly, které nejsou schopny adsorpce. Nitridační atmosféru je tudíž nutno obnovovat trvalým přívodem čpavku. [8]

2.2.3 Nitridocementování

Tvoří přechod mezi nitridováním a cementováním. Je to obohacování povrchových vrstev oceli současně uhlíkem i dusíkem. Ocel je nutno poté kalit do oleje. Nitrocementovaná vrstva má vysokou tvrdost a otěru vzdornost. Sycená vrstva přechází plynule do jádra. Nitrocementace plynem má nejširší pole uplatnění pro svou menší pracnost a lepší hygienické prostředí. Malé součásti (OK, hřídele) s obsahem C – 0,4%. [7]

2.2.4 Šeradování

Při šeradování jsou povrchy malé ocelové součásti nasycovány drobných ocelových součástí zinkem při teplotě 380 až 450 °C. Do otáčivého elektricky vytápěného bubnu se vloží součásti. Tento buben se otáčí a součásti v něm jsou obklopeny práškovým zinkem. Zinek tak vniká do povrchu součásti a vytváří na něm vrstvu, která je chrání před nežádoucími atmosférickými vlivy.

3 TVRDOST OCELI

Tvrдость je odolnost materiálu vůči deformaci, kterou způsobuje těleso určitého tvaru (kulička, jehlan, hranol) neboli odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Tvrдость v technické praxi není veličina fyzikální, protože není jednoznačně definovatelná. Je výslednicí vlastností hmoty, zejména elasticity, křehkosti a plasticity, fyzikálně chemickými vlastnostmi povrchu i chemických vlastností [9].

Metody měření tvrdosti lze rozdělit do dvou skupin. Na zkoušky dynamické (odrazové) a statické (vrypové, vnikající).

3.1 Měření mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost je jedna ze základních hodnot charakterizujících mechanické vlastnosti systému. Toto měření poskytuje informace o elastickém a plastickém chování materiálu v lokálním objemu. Mikrotvrdomost je v principu odpor materiálu proti lokální plastické deformaci, která je vyvolána zatěžováním indentoru. Zatížení indentoru se u mikrotvrdomosti pohybuje maximálně do 2N. [11]

Při studiu mikrostruktury kovů a slitin je někdy třeba určit i tvrdost jednotlivých strukturních složek k posouzení jejich vlastností, popřípadě k jejich identifikaci. Zkouška mikrotvrdomosti je charakteristická tím, že se při měření používá velmi malých zatížení (až o několik řádů menší než při měření makrotvrdomosti), proto také velikost vtisků je nepatrná. Touto metodou je možné měřit tvrdosti miniaturních částic, drátků, tenkých planžet a žiletek velké tvrdosti, hliníkových fólií malé tvrdosti, pochromovaných vrstev součástí apod. Pro takováto měření tvrdostí se používají mikrotvrdomoměry. Mikrotvrdomoměry jsou buď jako samostatné přístroje nebo v metalografických laboratořích, kde se tímto způsobem převážně mění tvrdost strukturních částic, jsou součástí metalografických mikroskopů. Mikrotvrdomoměry pracují nejčastěji v rozsahu zatížení $4,3 \cdot 10^{-3}$ N (0,5 p) až 196 N (200 p). Při užití Vickersovy pyramidy se mikrotvrdomost označuje písmeny HM a užitým zatížením (p), např. 560 HM 30. Tyto typy přístrojů jsou rovněž založeny na vnikací metodě. Podle provedení mohou být tyto přístroje rozděleny do dvou skupin:

- mikrotvrdomoměry, u nichž je diamantový Vickersův jehlan vsazen přímo do speciálního objektivu, který se vloží místo normálního objektivu do metalografického mikroskopu.

- b) mikrotvrdoměry s diamantovým Vickersovým jehlanem v samostatném nástavci mimo optiku.[12]

3.2 Měření nanotvrdoti

Při měření nanotvrdoti se užívá stejných postupů jako při měření mikrotvrdoti. Zatížení se však pohybují v ještě nižších hodnotách, a to až 1nN. Hloubky vtisků se pak mohou dostat až k hodnotě 0,1 nm. Jako nanoindentor je nejčastěji používán Berkovichův jehlan, který se dá relativně snadno vybrousit do bodové špičky. Při zkoušce prováděné Berkovichovým diamantem dochází u vzorku současně k plastické i elastické deformaci. Z hlediska vyhodnocování výsledků je výhodnější, aby k plastické a elastické deformaci docházelo postupně. Toho lze dosáhnout použitím nanoindentoru ve tvaru kuličky, při jehož aplikaci dochází nejprve k elastické a potom k plastické deformaci. Problém však je, že nanoindentory jsou vyráběny z diamantu a vyrobit kuličku z tohoto materiálu je velmi obtížné, což je důvod globálního preferování Berkovichova jehlanu. Jeho výroba je nepoměrně jednodušší. Jak bylo zmíněno, v průběhu zkoušky dochází po zatížení u zkoušeného materiálu k plastické i elastické deformaci. Po odlehčení zůstává v materiálu vlivem plastické deformace vtisk.[13]

4 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

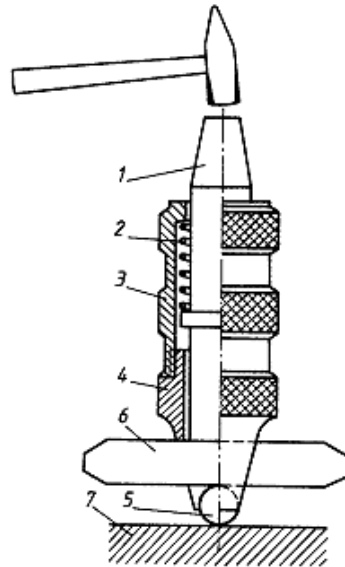
Indentor proniká do zkoumaného povrchu rázem vedeným kolmo – tzv. „rázové zkoušky“.

V podstatě je třeba rozlišovat rázové zkoušky dvojího druhu. Buď je to zkouška vnikající, u níž je avšak klidné zatěžování nahrazeno rázem, nebo zkouška založená na principu měření velikosti odrazu indentoru spuštěného na zkoušený vzorek určitou energií. Dynamické vnikající zkoušky jsou prováděny pomocí Kladívka Poldi nebo Baumanova kladívka. Dále sem patří Shoreho skleroskop, Duroskop.

4.1 Tvrdoměr Poldi

Přenosný tvrdoměr, který umožňuje stanovení tvrdosti na základě plastické deformace vzniklé rázem a porovnání velikosti vzniklého vtisku s velikostí vtisku na materiálu o známé tvrdosti. Jde o nejmenší přenosný tvrdoměr pro měření tvrdosti metodou Brinell. Oblast jeho využití je především při nutnosti změření tvrdosti na velkých výrobcích a konstrukcích, kde nelze využít měření na statickém nebo přenosném tvrdoměru, které pracují normalizovanou metodou Brinell. Výhodou tvrdoměru jsou jeho malé rozměry, hmotnost a možnost funkčnosti prakticky v jakékoliv poloze. Tvrdoměr byl vyroben a patentován již v r. 1921. Tvrdoměr se skládá z pouzdra a odpruženého pístu. Pouzdro je ukončeno držákem ocelové kuličky o průměru 10 mm. Mezi kuličku a píst se vkládá porovnávací kalibrovaná tyčka čtvercového průřezu o hraně 11 mm a tvrdosti cca 200 HBS. Při vlastním měření se přístroj postaví kolmo k povrchu zkoušeného předmětu a na píst se udeří kladivem o hmotnosti cca 500 g. Nárazem kladiva se vytvoří 2 vtisky – jeden na zkoušeném předmětu a druhý na porovnávací tyčce. Porovnáním průměrů obou vtisků lze z přepočítávacích tabulek dodávaných s tvrdoměrem určit tvrdost zkoušeného předmětu. Měření je ovšem zatíženo poměrně značnou chybou (až $\pm 10\%$) a na zjištěnou hodnotu tvrdosti je nutné hledět jen jako na hodnotu informativní.[10]

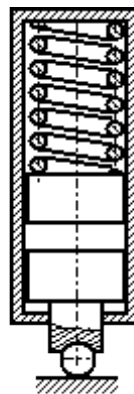
Na následujícím obrázku vidíme ruční přenosný tvrdoměr poldi, který se skládá z následujících částí. 1 – úderník, 2 – pružina, 3 – těleso, 4 – nástavec, 5 – kulička, 6 – porovnávací tyčka, 7 – zkoušený materiál.



Obr. 6 Tvrdoměr Poldi [5]

4.2 Baumanovo kládívko

Vtlačováním ocelové kuličky o průměru 5 – 10 mm úderem rázníku do zkoušeného materiálu. Jako u Poldiho tvrdoměru i tady se měří ve stupních Brinella. Úderem na rázník je vtlačovaná kulička vymrštěna stlačenou pružinou do zkoušeného materiálu. Na následujícím obrázku vidíme jak Baumanovo kládívko vypadá.

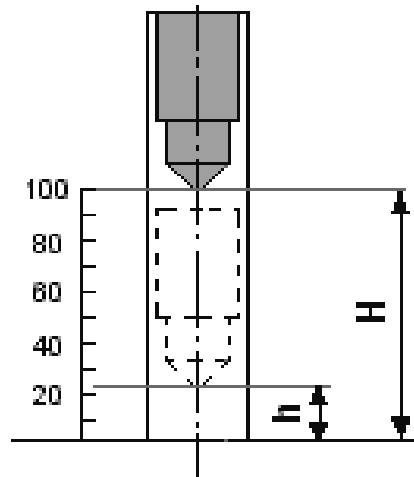


Obr. 7 Baumanovo kládívko

4.3 Shoreho skleroskop

Uvedená metoda patří mezi dynamické zkoušky tvrdosti a její princip je založen na pružném odrazu tělesa o standardní hmotnosti, které dopadá z konstantní výšky na povrch. Při nárazu tělesa se malá část kinetické energie spotřebuje na nevratnou plastickou deformaci povrchu zkoušeného tělesa a zbývající energie se projeví odrazem tělesa. Z dosažené výšky po odrazu se vypočte hodnota tvrdosti, která ale u dynamických metod zkoušení tvrdosti nedosahuje přesnosti statických metod. U původního Shoreho skleroskopu se pohybuje válcový čep ve skleněné trubce opatřené stupnicí, na které se odečte pomocí lupy dosažená výška odrazu tělesa. Nastavení počáteční výšky tělesa je možné buď vysátím vzduchu z prostoru nad tělesem pomocí gumového balónku nebo u některých přístrojů pomocí pružiny. Shoreho skleroskopy se používali především k měření tvrdosti válců do válcovacích stolic a používali se ve 2 stupnicích – HSC a HSD. Pádové těleso je válcového tvaru a je ukončené diamantovým hrotem s poloměrem zaoblení 1 mm.[10]

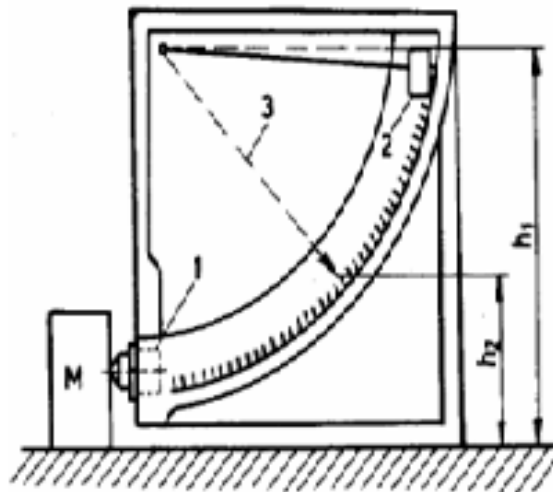
Na obrázku vidíme princip měření Shoreho skleroskopu, kde se pustí zkušební tělísko na zkoušený materiál a měří se výška jeho odrazu.



Obr. 8 Shoreho skleroskop

4.4 Duroskop

Skládá se z kladívka s ocelovým kulovým vrchlíkem na čele. Toto kladívko dopadá z určité výše na zkoušený předmět. Opět výška odrazu je ukazatelem tvrdosti zkoušeného povrchu.[11]



Obr. 9 Duroskop

5 STATICKÉ ZKOUŠKY TVRDOSTI

Všeobecného rozšíření dosáhly statické vnikací metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost plastické deformace (metody Brinell, Vickers, Knoop), nebo metody, u kterých je měřítkem tvrdosti velikost elasticko plastické deformace (metody Rockwell). Tvrdost je u vnikacích metod definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Vnikací tělesa jsou obvykle jednoduchého geometrického tvaru (koule, kužel, jehlan), nebo tvaru, který se těmto tvarům přibližuje – např. kužel s malým zaoblením vrcholu u některých metod Rockwell. Zvolením těchto tvarů se sledovala jednoduchost a reprodukovatelnost jejich výroby, optimální využití vlastností materiálu vnikacího tělesa (např. tvar vnikacího tělesa Vickers respektuje tvar krystalu diamantu a tak i jeho maximální tvrdost). Volbou tvaru kužele a jehlanu (pyramidy) se sledovala možnost stanovování tvrdosti nezávislé na velikosti použité zkušební síly (podobnost vtisků). Tvrdost u vnikacích metod je definována jako poměr mezi použitým zatížením a plochou vtisku (metody Brinell, Vickers), nebo poměrem mezi použitým zatížením a plochou průmětu vtisku (Knoop). U metod Rockwell je tvrdost určována přímo z trvalé hloubky vtisku. [10]

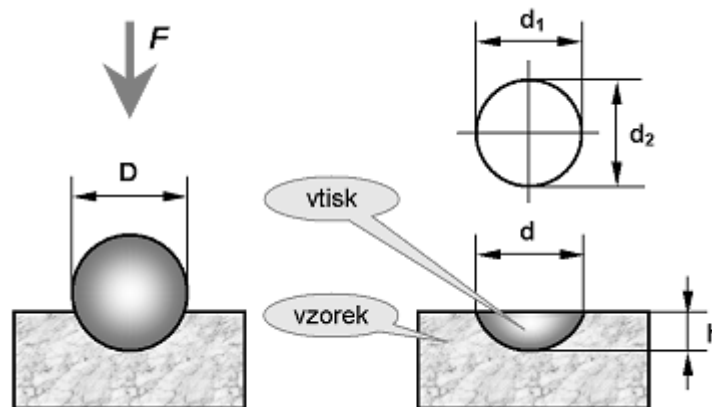
5.1 Brinell

Brinellovy zkoušky se provádí zatlačováním ocelové kalené kuličky o průměru D do upravené plochy zkoušeného vzorku konstantním zatížením. Tvrdost je pak vyjádřena vztahem: $HB=F/S$. Kde F je síla, kterou na těleso působíme S je obsah plochy vtlačované kuličky. Je-li d průměr a h hloubka vtisku, pak je jeho plocha dána vztahem:

$$S = \pi Dh = \pi D 0,5 [D - (D^2 - d^2)^{0,5}]$$

Jakmile zkoušku dokončíme, je třeba změřit průměr nebo hloubku vtisku. Měření průměru provádíme za pomoci tzv. Brinellovy lupy, což je měřicí mikroskop, který měří až na setiny mm. Hloubku lze přesně změřit mnohem obtížněji. Proto se při sériových zkouškách mikroskopem neměří, a tvrdoměry jsou konstruovány tak, aby se hloubka odečetla přímo na přístroji. Tento postup je vhodný pouze při poměrném stanovování tvrdosti. Pro přesné určení hodnoty tvrdosti je třeba vycházet z průměru vtisku.

Na obr. 10. Máme popsanou a znázorněnou zkoušku podle Brinella, kde je kulička zatlačována určitou silou F , následně je kulička vyjmuta a ve zkoušeném materiálu zbyde obtisk, u kterého se následně měří hloubku vtisku nebo obsah plochy, kterou kulička zanechala.



Obr. 10 Zkouška podle Brinella

5.2 Vickers

Diamantové vnikací těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s daným vrcholovým úhlem mezi protilehlými stěnami je vtlačováno do povrchu vzorku. Následně je měřena úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení F . Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku, jenž se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem rovnajícím se úhlu vnikacího tělesa. Tvrdost podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně. Tvrdost podle Vickerse je určena poměrem vtlačovací síly F a povrchu vtisku.

$$HV = 0,189 \cdot (F / d^2)$$

F - síla vtlačování

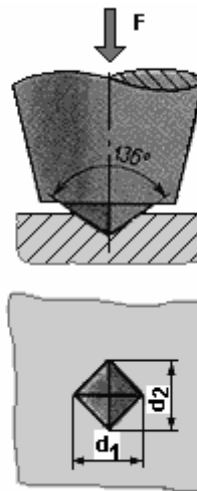
d - úhlopříčka vtisku.

Pro praktickou potřebu používáme tabulek, kde podle délky úhlopříčky d a použité síly F je uvedena odpovídající tvrdost. Metodu měření tvrdosti podle Vickerse lze použít pro všechny tvrdosti. Metoda je velmi přesná a je minimálně závislá na zatížení.

Diatester

Pro kontrolování tvrdosti po celou pracovní dobu se používá ve velkých závodech zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tak zvaných diatesterů. Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky úhlopříčky d . [14]

Na obr. 11. Vidíme hrot čtyřbokého pravidelného jehlanu jak vniká do materiálu a zanechává v něm obtisk, podle kterého se následně tvrdost měří.

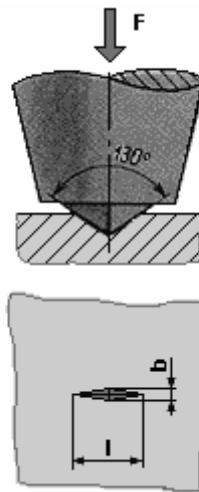


Obr. 11 Zkouška podle Vickerse

5.3 Knoop

Metoda Knoopova se liší od Vickersovy tvarem diamantového indentoru. Je to rovněž jehlan, ale je vybroušen tak, že jedna dvojice protilehlých hran svírá úhel 130° a druhá dvojice úhel $172^\circ 30'$. Vtisk má pak tvar kosočtverce s poměrem úhlopříček přibližně 1:7. Tvrdost podle Knoopa se počítá z delší úhlopříčky vtisku.

Na obr. 12. Vidíme, že zkouška podle Knoopa je téměř stejná jako u Vickerse. Liší se pouze ve tvaru základny.



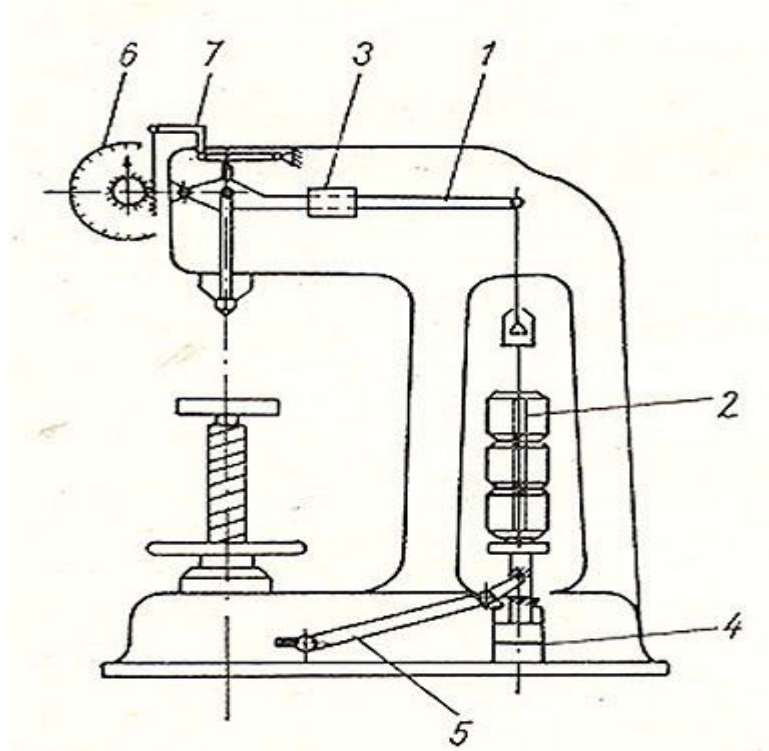
Obr. 12 Zkouška podle Knoopa

5.4 Rockwell

Tato zkouška se zjišťuje na Rockwellově tvrdoměru jako rozdíl hloubky vtisku vnikacího tělesa (ocelová kulička, diamantový kužel) mezi dvěma stupni zatížení (předběžného a celkového). Účelem předběžného zatížení je vyloučit z měřené hloubky nepřesnosti povrchových ploch. Kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). Kulička má průměr 1,5875 mm (HRB). Diaman-

tový kužel nebo ocelovou kulička, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve předběžně zatíží silou 100 N (výchozí poloha pro měření hloubky vtisku). Potom se pozvolna zvětšuje zatěžovací síla tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Pak se zatěžující síla opět zmenšuje až na 100 N a v tomto stavu se zjistí přírůstek h hloubky vtisku, který nastal proti výchozí poloze při 100 N. Zkouška tvrdosti podle Rockwella je rychlá, snadná a vpichy (důlky) jsou velmi malé (max. hloubka 0,2 mm). Je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií výrobků a tam, kde HB již není použitelná. [15]

Na Obr. 13 je schéma číslicového tvrdoměru Rockwell. 1. Hlavní páka zatěžovacího systému, 2. Výměnná závaží, 3. Pomocné závaží, 4. Olejový katarakt, 5. Ruční ovládací páka, 6. Indikátor, 7. Hřebenový převod.



Obr. 13 Rockwellův tvrdoměr

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem Bakalářské práce bylo měření mikrotvrdomosti vybraných druhů modifikovaných ocelí. Pro toto měření byly vybrány vzorky materiálů nástrojových oceli 13 240 kaleno, 13 240 základní materiál, 14 220 základní materiál, 14 220 cementováno, 16 220 cementováno, 16 220 základní materiál. Z každého materiálu byly zhotoveny tři vzorky. Jeden byl kalený, druhý je základní materiál a třetí byl cementován. Měření mikrotvrdomosti proběhlo na mikrotvrdoměru MicroCombi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 10 mN, 50 mN a 250 mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Cíle bakalářské práce byly:

- Vypracování literární studie na dané téma.
- Příprava zkušebních vzorků na experimentální část.
- Provedení experimentu.
- Vyhodnocení a grafické znázornění naměřených hodnot.

6.1 Měřící zařízení

Měření mikrotvrdomosti proběhlo na mikrotvrdoměru MicroCombi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 10 mN, 50 mN a 250 mN. Je to stolní přístroj, který je kompaktní a může být použit na libovolném stabilním stole. S jeho kombinovaným ovládáním z počítače a softwarem představuje snadno použitelný nástroj pro všechny laboratoře, které mají zájem o provádění makromechanických testů. Jako vnikající tělísko (Berkovičův indentor) byl použit diamantový čtyřboký jehlan. Systém může být použit k charakterizaci organických, anorganických, tvrdých a měkkých materiálů. Přístroj je schopen provádět vnikající zkoušky mikrotvrdomosti v rozsahu zatížení (od 0 do 30 N) a zkoušky nanotvrdomosti (od 0 do 500 mN).

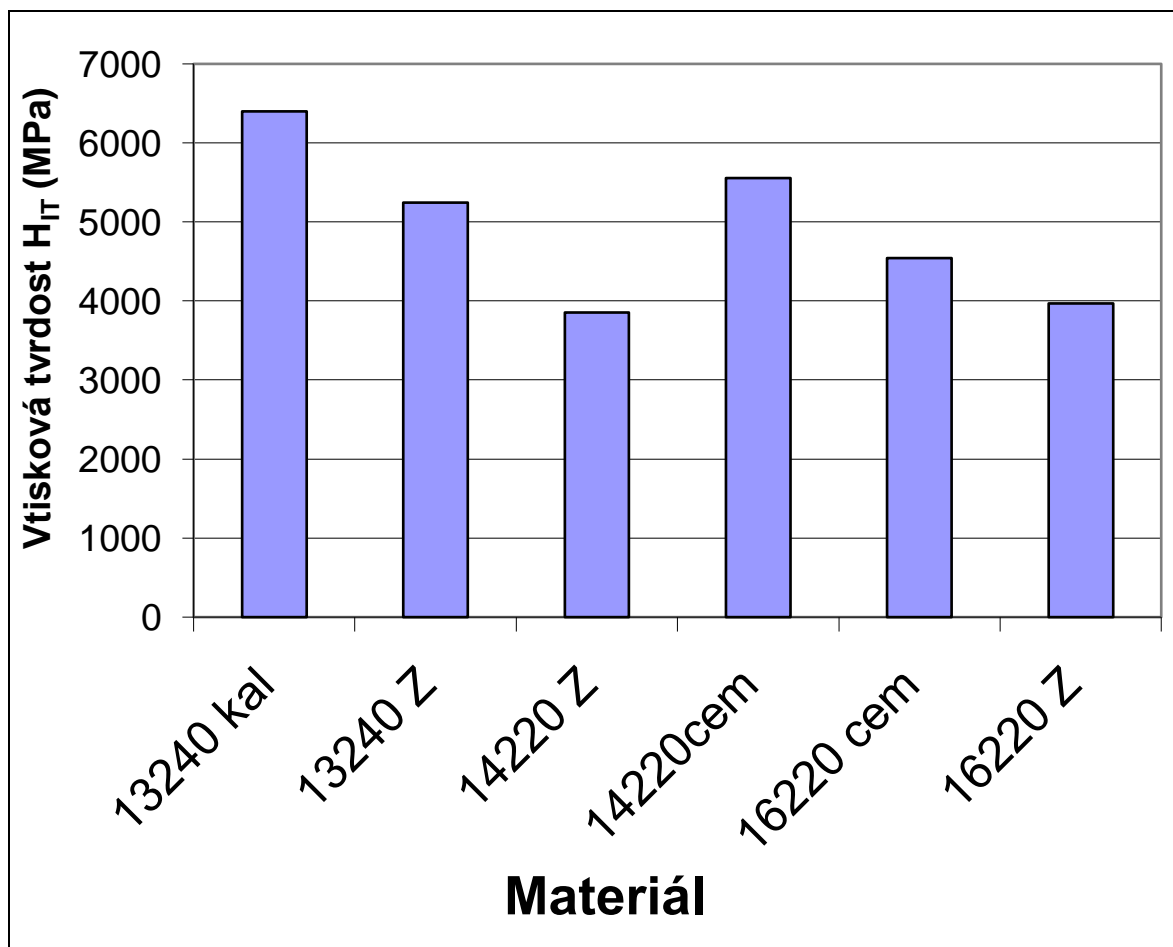


Obr. 14 MicroCombi Tester

Dva hlavní moduly přístroje:

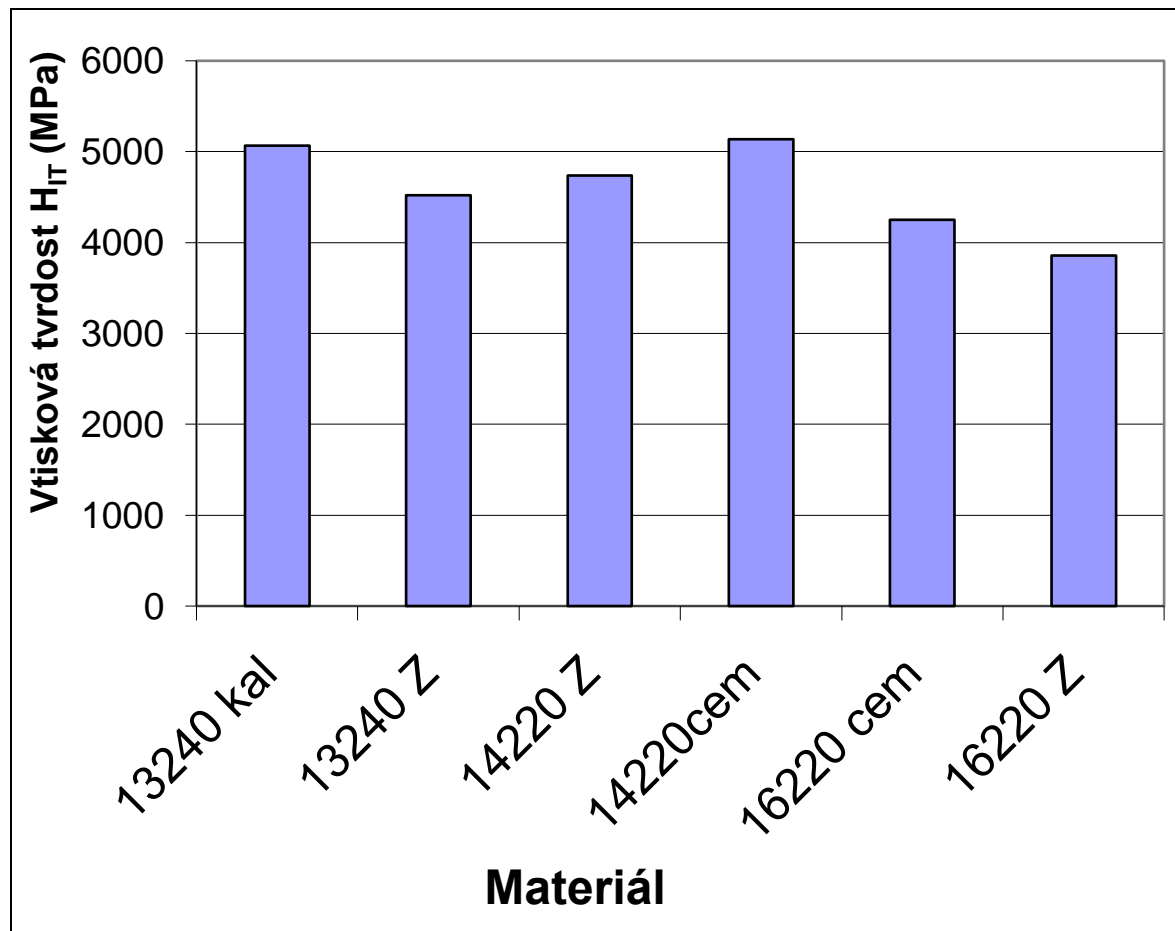
Mikroindentační a nanoindentační modul a dále „Scratch Testy” Modul opatřený optickým mikroskopem (z pořízení fotografie popřípadě videozáznamu).

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ



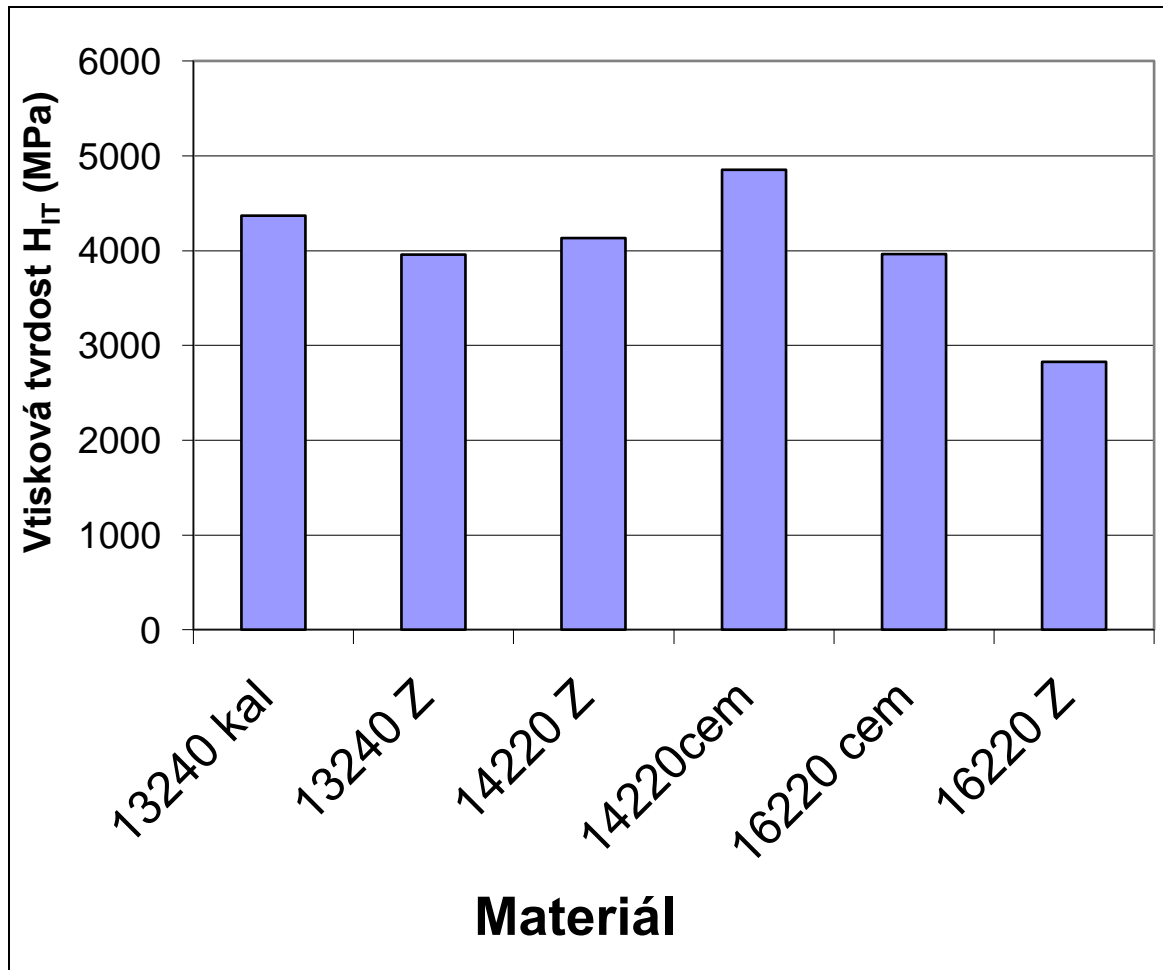
Obr. 15 Vtisková tvrdost při zatížení 10 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u oceli 14220 základní materiál. Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u oceli 13240 kaleno, jak je patrné z obrázku 15.



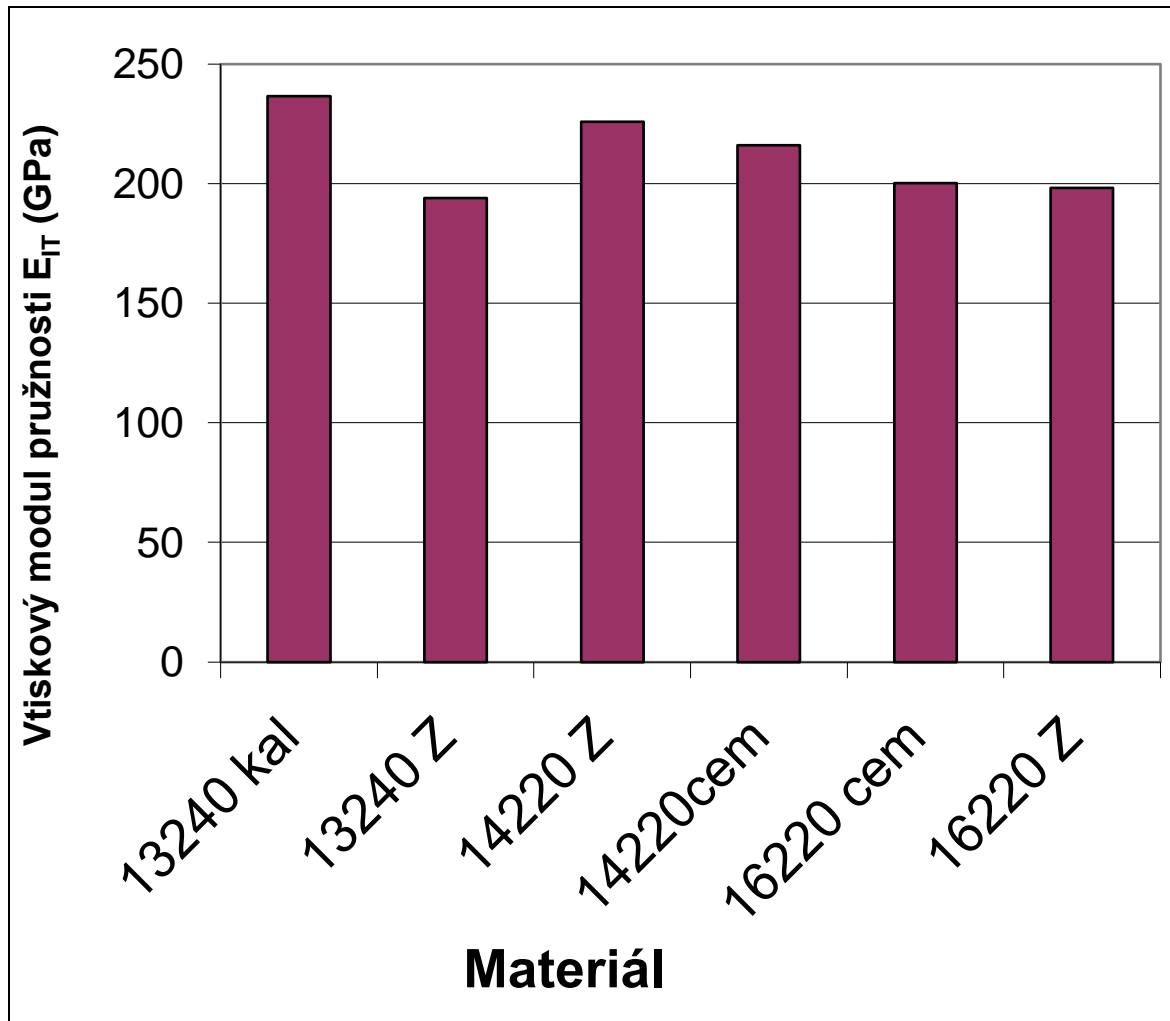
Obr. 16 Vtisková tvrdost při zatížení 50 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u oceli 16220 základní materiál. Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u oceli 14220 cementováno, jak je patrné z obrázku 16.



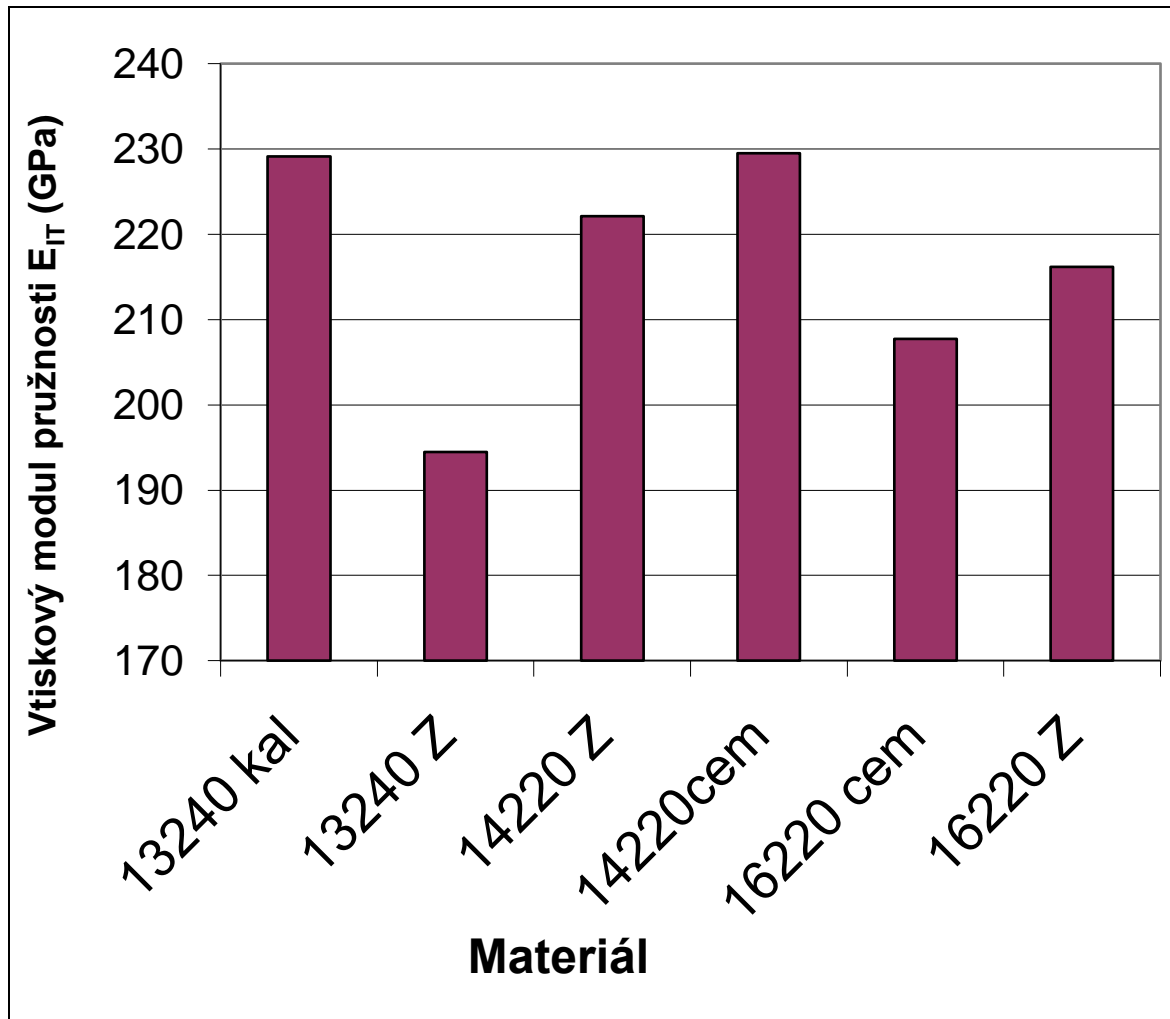
Obr. 17 Vtisková tvrdost při zatížení 250 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskové tvrdosti byla naměřena u oceli 16220 základní materiál. Naopak nejvyšší hodnota vtiskové tvrdosti byla zjištěna u oceli 14220 cementováno, jak je patrné z obrázku 17.



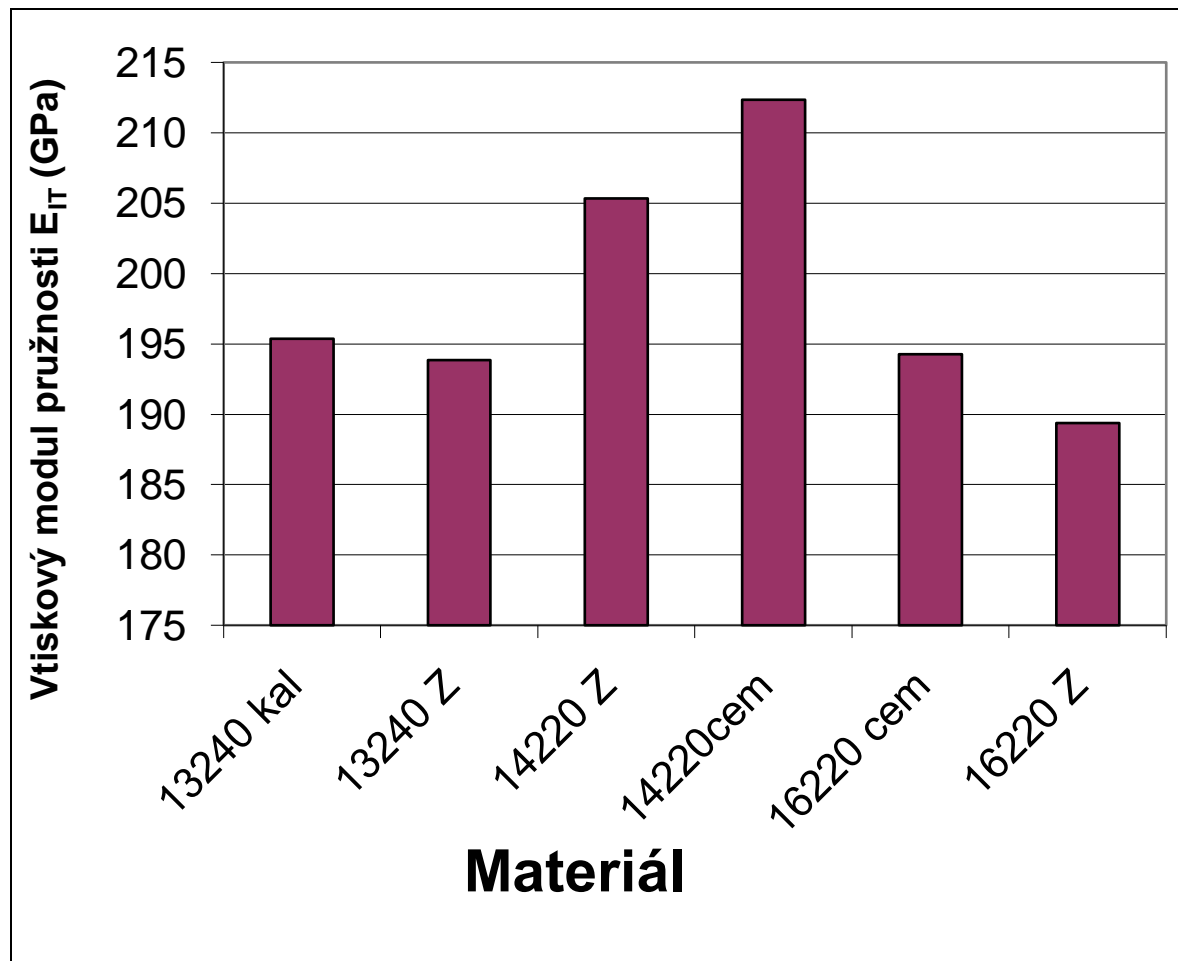
Obr. 18 Vtiskový modul pružnosti při zatížení 10 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u oceli 13240 základní materiálu. Naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla zjištěna u oceli 13240 kaleno, jak je patrné z obrázku 18.



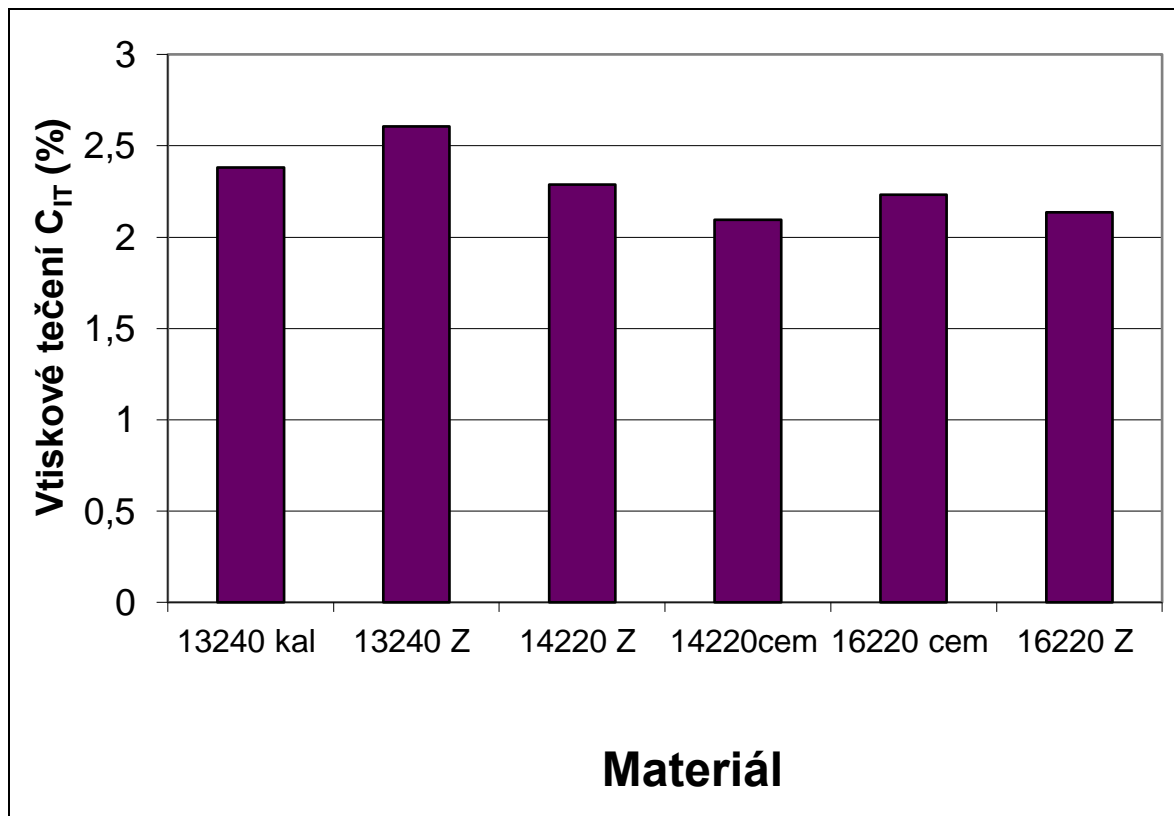
Obr. 19 Vtiskový modul pružnosti při zatížení 50 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u oceli 13240 základní materiál. Naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla zjištěna u oceli 14220 cementováno, jak je patrné z obrázku 19.



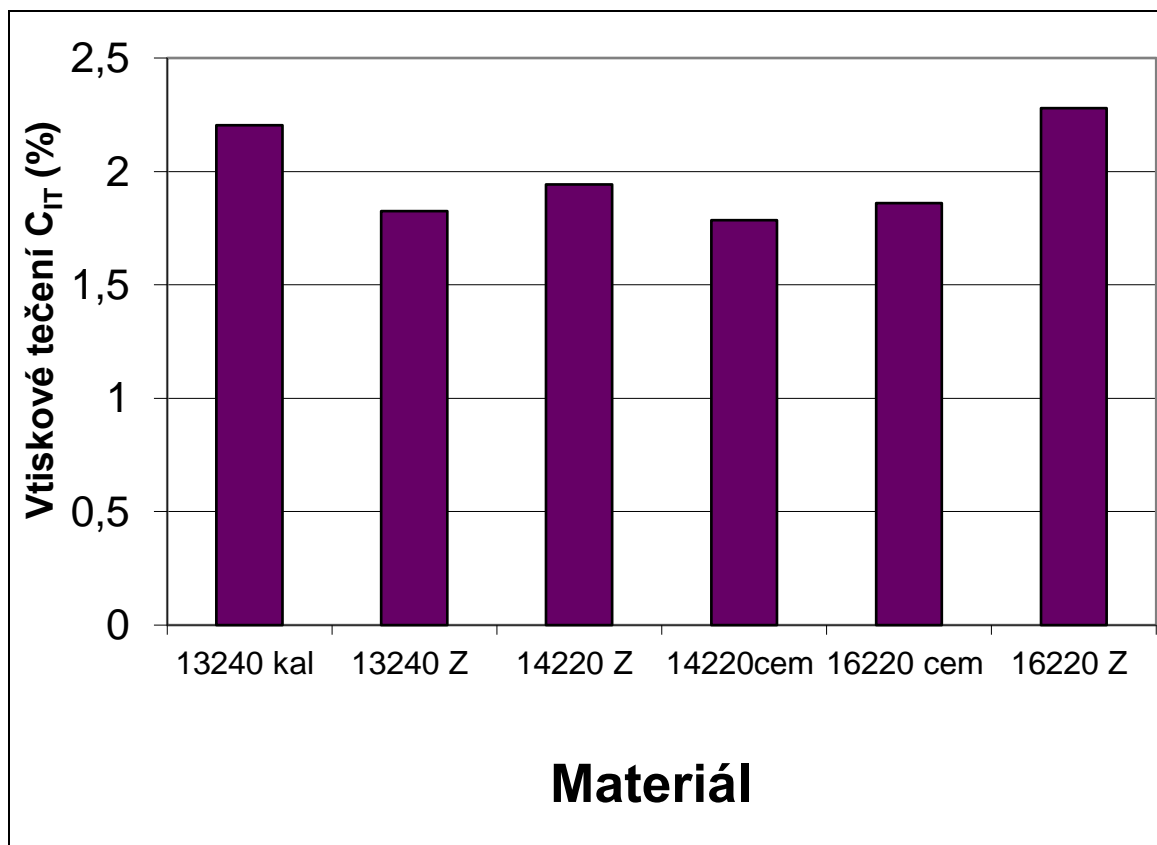
Obr. 20 Vtiskový modul pružnosti při zatížení 250 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla naměřena u oceli 16220 základní materiál. Naopak nejvyšší hodnota vtiskového modulu pružnosti byla zjištěna u oceli 14220 cementováno, jak je patrné z obrázku 20.



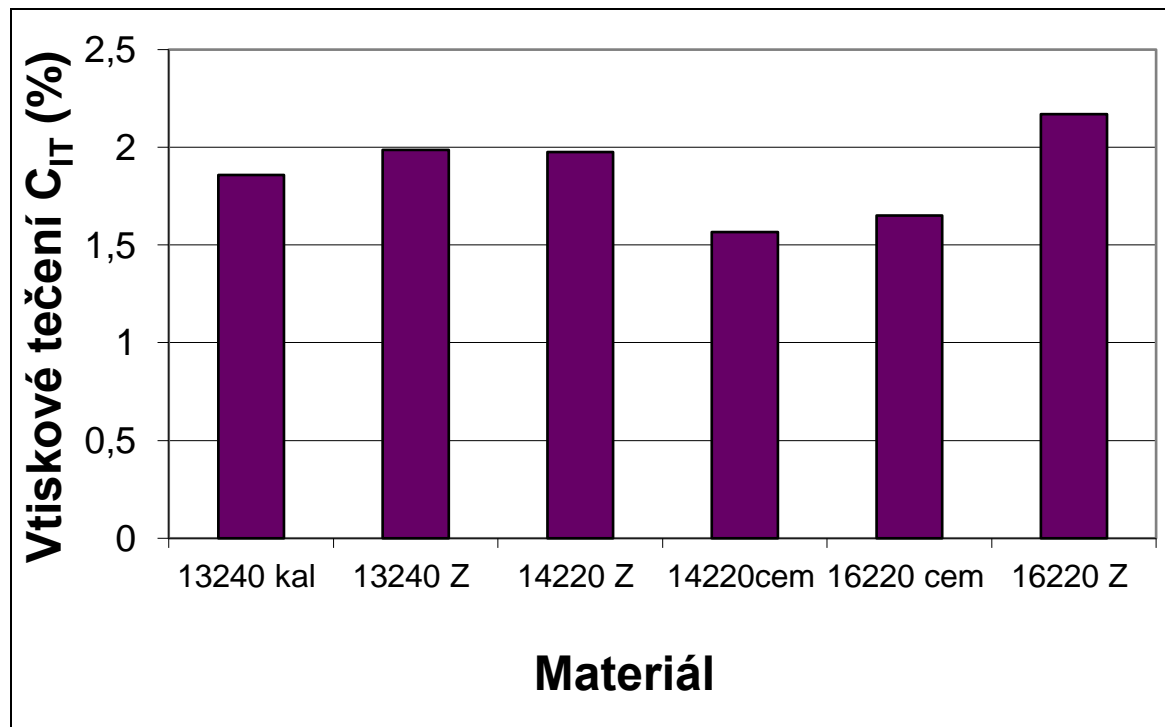
Obr. 21 Vtiskové tečení při zatížení 10 mN

Z výsledků měření mikrotvrdomosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskového tečení byla naměřena u oceli 14220 cementováno. Naopak nejvyšší hodnota vtiskového tečení byla zjištěna u oceli 13240 základní materiál, jak je patrné z obrázku 21.



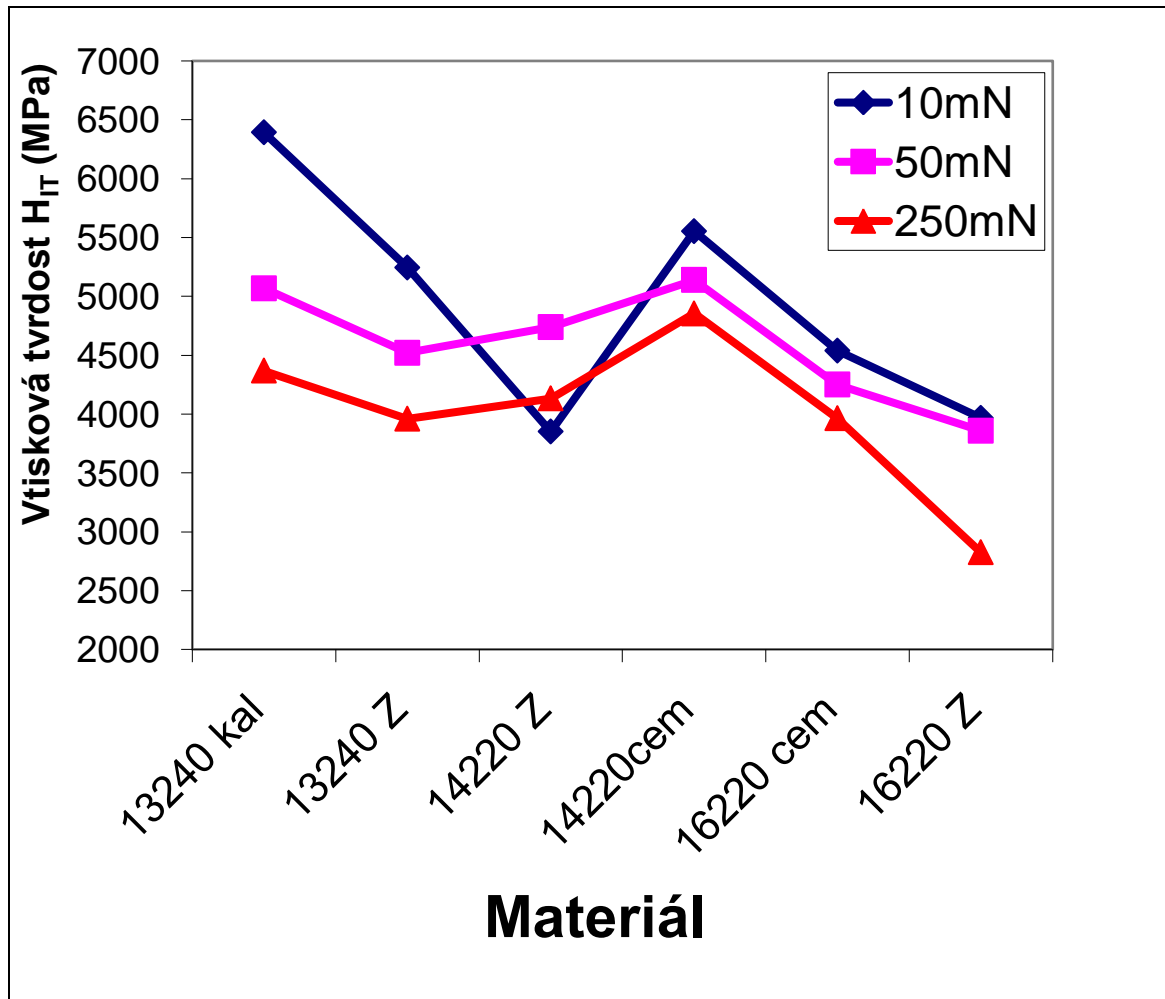
Obr. 22 Vtiskové tečení při zatížení 50 mN

Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskového tečení byla naměřena u oceli 14220 cementováno. Naopak nejvyšší hodnota vtiskového tečení byla zjištěna u oceli 16220 základní materiál, jak je patrné z obrázku 22.



Obr. 23 Vtiskové tečení při zatížení 250 mN

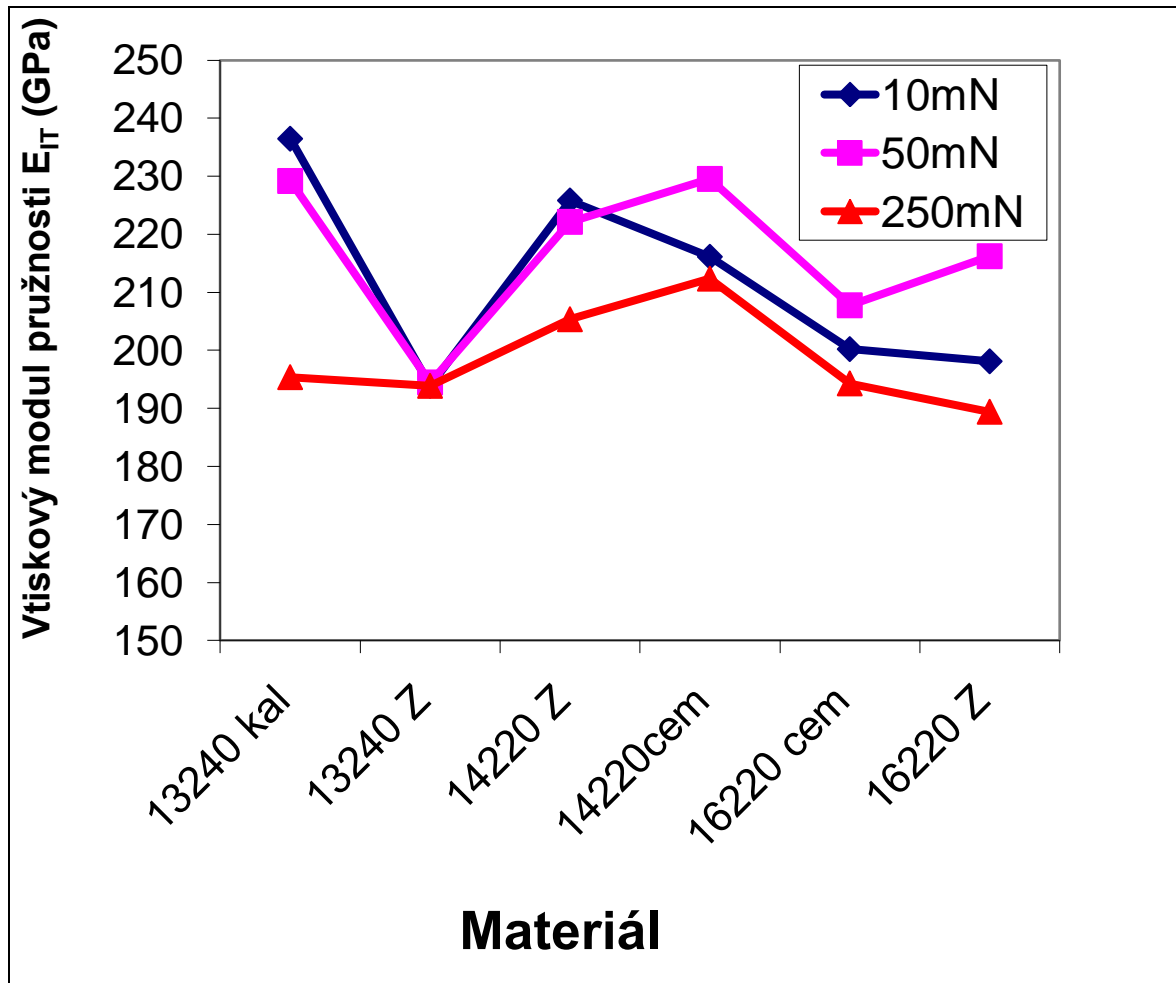
Z výsledků měření mikrotvrdosti vyplynulo, že nejmenší hodnota vtiskového tečení byla naměřena u oceli 14220 cementováno. Naopak nejvyšší hodnota vtiskového tečení byla zjištěna u oceli 16220 základní materiál, jak je patrné z obrázku 23.



Obr. 24 Vtisková tvrdost

Z výsledků měření mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti byly naměřeny u oceli 13240 kaleno při zatížení 10 mN. Jedná se o oceli, které byly zakaleny a následně popuštěny. Výsledná struktura po zakalení a popuštění byla tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny u oceli 16220 základní materiál. Podobných hodnot vtiskové tvrdosti po zakalení a následném popouštění bylo dosaženo i materiálem 14220 cementováno, kde pouze austenit v sobě rozpouští uhlík. Legované oceli zjemňují martenzit a tvoří tvrdší karbidy než cementit.

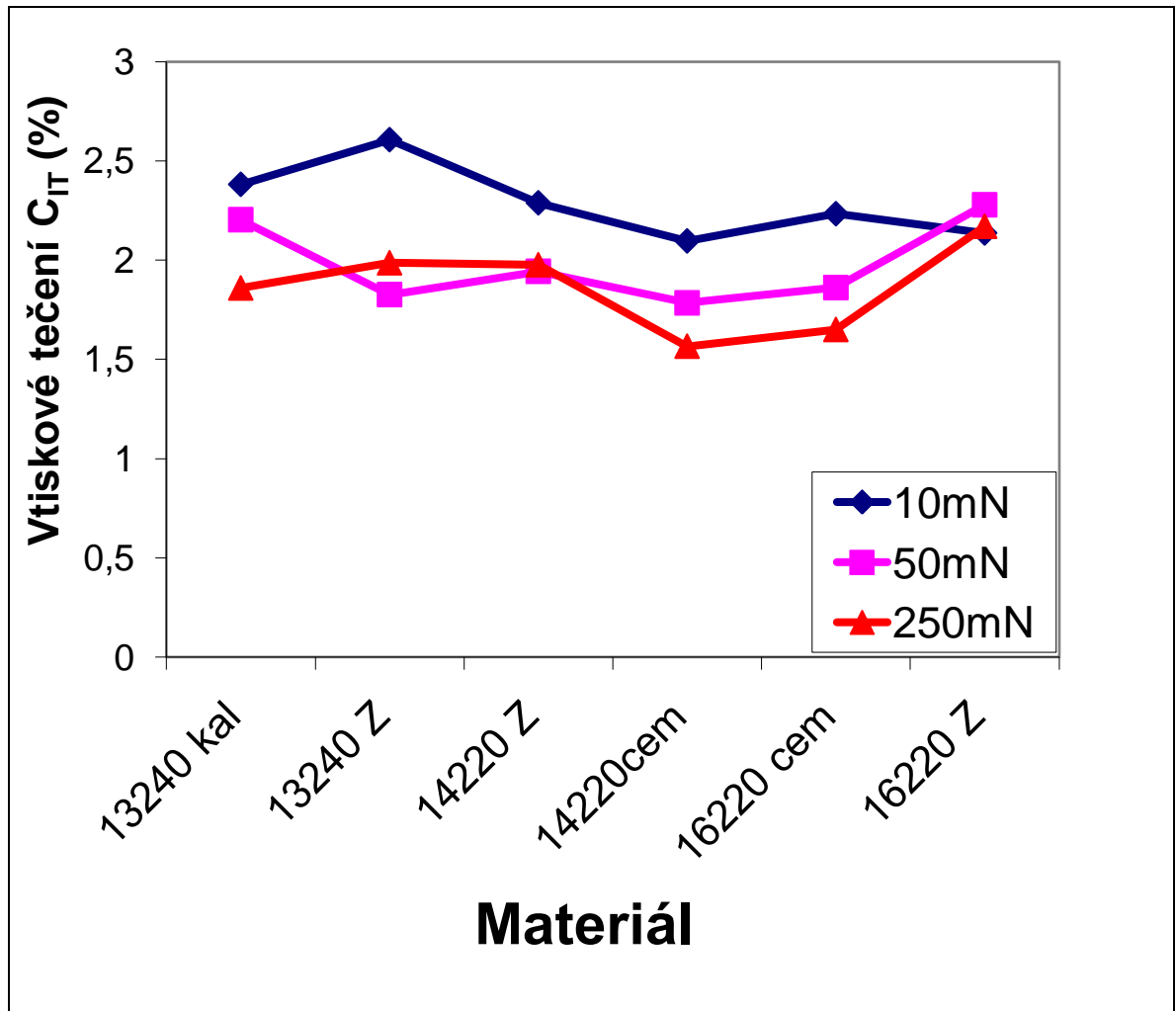
Při aplikaci rozdílného zatížení při testu mikrotvrdomosti bylo zjištěno, že s rostoucím zatížením klesaly hodnoty vtiskové tvrdosti u všech testovaných typů materiálů kromě materiálu 14220 cementováno, který se choval nepatrně jinak.



Obr. 25 Vtiskový modul pružnosti

Hodnoty vtiskového modulu pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy byly naměřeny nejvyšší u zakalených a následně popustěných testovaných ocelí. Zde byla zjištěna výsledná struktura martenzitu a austenitu zbytkového. Při zvyšujícím se zatížení byly pak nejvyšší hodnoty naměřeny u materiálu 14220 cementováno. Nejmenší hodnoty mikrotuhosti testované povrchové vrstvy byly zjištěny u testovaných ocelí, základních. Tato ocel je dobře obrobitelná a tvárná.. Tomu také odpovídají hodnoty mikrotuhosti.

Při zvyšujícím se zatížení se měnily i jednotlivé hodnoty u testovaných vzorků ocelí. Většina vzorků měla při zvyšující se zátěži klesající tendenci. Výjimkou byly oceli 14220 cementováno, 16220 cementováno, 16220 základní materiál, které při zatížení 50 mN naopak vzrostly.



Obr. 26 Vtiskové tečení (mikrokríp)

Při měření vtiskového tečení, bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot dosahují oceli, ze základního materiálu. Nejnižší hodnoty dosahují oceli, které byly cementovány. Aplikace různých zatížení pro testy mikrotvrdosti ukázalo, že nejvyšší hodnoty vtiskového tečení byly zjištěny u nejmenšího zatížení 10 mN, zatímco nejmenší hodnoty byly naměřeny u největšího zatížení 250 mN.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala měřením mikrotvrdosti vybraných druhů modifikovaných ocelí. Pro měření byly vybrány zkušební vzorky materiálů oceli 13240 kaleno, 13240 základní materiál, 14220 základní materiál, 14220 cementováno, 16220 cementováno, 16220 základní materiál. Měření mikrotvrdosti proběhlo na mikrotvrdoměru MicroCombi testeru od firmy CSM Instruments, při zatížení 10 mN, 50 mN a 250 mN. Naměřené hodnoty byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

Z výsledků měření zkoušky mikrotvrdosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty mikromechanického chování byly zjištěny u zakaleného testovacího vzorku oceli 13240. Vůbec nejvyšších hodnot vtiskové tvrdosti, mikrotuhosti byly naměřeny u oceli 13240 kaleno. Výsledná struktura u těchto povrchových vrstev byla tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým, které všeobecně vykazují dobré mechanické vlastnosti. U vtiskového tečení dosáhla nejvyšších hodnot ocel 13240 ze základního materiálu. Nejnižších hodnot při vtiskové tvrdosti a vtiskového modulu pružnosti dosahovala ocel 16220 ze základního materiálu. Základní materiál měl nejhorší mikromechanické chování. Tato struktura umožňuje snadný pohyb dislokací a tím snadnou plastickou deformaci.

Při sledování vlivu různých druhů zatížení při testu mikrotvrdosti bylo zjištěno, že nejlepší mikromechanické vlastnosti byly zjištěny u nejmenšího zatížení 10 mN. Pokles mikromechanických vlastností byl naopak zaznamenán u nejvyššího zatížení 250 mN.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Parma, V.: Výroba oceli v konvertorech, tandemových a SM pecích. In Brož, L. et al.: Hutnictví železa. Praha: SNTL, 1988, s. 210 - 325.
- [2] Vojtěch D. : Kovové materiály. 1. vydání, Vysoká škola chemicko – technologická v Praze
- [3] <http://mail.sstzr.cz/web/download/cat1/strojirenska-technologie.pdf>
- [4] <http://www.strojnilyceum.wz.cz/>
- [5] smaturita.wz.cz/tech/18.doc
- [6] <http://www.elitalyceza.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [7] <http://techstroj.g6.cz/T/T04.pdf>
- [8] Nauka o materiálu, Rostislav Chotěborský, 2006
- [9] Základní zkoušky kovových materiálů, Jana Skálová, Rudolf Kovařík, Vladimír Benedikt, Plzeň 2005
- [10] http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf
- [11] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [12] Nauka o materiálu (návody na cvičení) Ing. Jaroslav HORÁČEK, CSc.2004
- [13] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27918
- [14] <http://www.merenitvrlosti.cz/tvrlost.html>
- [15] <http://www.converter.cz/jednotky/tvrlost-rockwell.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procento
Fe ₃ C	Karbid železa
F	Síla
S	Plocha
Pa	Pascal
Kg/m ²	Kilogram na metr čtvereční
°C	Stupně Celsia
HV	Tvrlost Vickerse
HRC	Tvrlost Rockwella
HBS	Tvrlost Brinella
HSC	Tvrlost Shoreho
HSD	Tvrlost Shoreho
N	Newton
ČSN	Česká Státní Norma
g	Gram
Π	Ludolfovo číslo
α	Alfa
d	Průměr
h	Hloubka vtisku
R _m	Mez pevnosti v tahu
H _{IT}	Vtisková tvrlost
E _{IT}	Vtiskový modul pružnosti (mikrotuhost)
C _{IT}	Vtiskové tečení (kríp)

Cr Chrom

Al Hliník

N Dusík

H Vodík

V Vanad

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Konventor na výrobu oceli [1].....	11
Obr. 2 Siemens-Martinská pec [2].....	12
Obr. 3 Elektrická oblouková pec [3].....	12
Obr. 4 Rozdělení oceli	14
Obr. 5 Schéma číselného označení [4].....	14
Obr. 6 Tvrdoměr Poldi [5]	25
Obr. 7 Baumanovo kládívko	25
Obr. 8 Shoreho skleroskop.....	26
Obr. 9 Durosokop	27
Obr. 10 Zkouška podle Brinella.....	29
Obr. 11 Zkouška podle Vickerse	30
Obr. 12 Zkouška podle knoopu.....	31
Obr. 13 Rockwellův tvrdoměr	32
Obr. 14 MicroCombi Tester.....	35
Obr. 15 Vtisková tvrdost při zatížení 10 mN.....	36
Obr. 16 Vtisková tvrdost při zatížení 50 mN.....	37
Obr. 17 Vtisková tvrdost při zatížení 250 mN.....	38
Obr. 18 Vtiskový modul pružnosti při zatížení 10 mN.....	39
Obr. 19 Vtiskový modul pružnosti při zatížení 50 mN.....	40
Obr. 20 Vtiskový modul pružnosti při zatížení 250 mN.....	41
Obr. 21 Vtiskové tečení při zatížení 10 mN	42
Obr. 22 Vtiskové tečení při zatížení 50 mN	43
Obr. 23 Vtiskové tečení při zatížení 250 mN	44
Obr. 24 Vtisková tvrdost.....	45
Obr. 25 Vtiskový modul pružnosti	46
Obr. 26 Vtiskové tečení (mikrokrip).....	47

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: CD – Bakalářská práce Kovařík Jiří