

Meranie tvrdosti kovov

Patrik Doblej

Bakalárska práca
2011

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik DOBLEJ**
Osobní číslo: **T08587**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Téma práce: **Měření tvrdosti kovů**

Zásady pro vypracování:

- 1, Vypracování literární studie na dané téma
- 2, Příprava zkušebních vzorků 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. David Mañas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2011

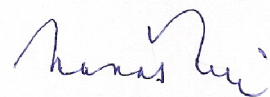
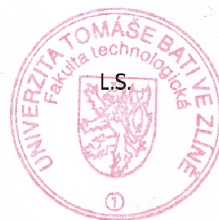
Termín odevzdání bakalářské práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 11. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Mañas, CSc.
ředitel ústavu

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, 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

.....

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

Bakalárska práca sa zaoberá štúdiom a meraním tvrdosti kovov a následným vyhodnotením výsledkov. V teoretickej časti sú rozdelené a popísané najznámejšie druhy skúšok, ich princíp a postup merania. V praktickej časti používam vybrané metódy merania na určenie tvrdosti skúšobných vzoriek s rôznym tepelným alebo chemicko-tepelným spracovaním.

Kľúčová slova: tvrdosť, Rockwell, Brinell, Vickers, Shore, meranie tvrdosti

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the study and the measuring of metal hardness and the following evaluation of the results. In the theoretical part, there are divided and described the most widely known types of the hardness tests, their principles and measuring procedures. In the applied part I use the chosen methods of measuring in order to define the hardness of the given samples with different heat treatment or chemical heat treatment.

Keywords: hardness, Rockwell, Brinell, Vickers, Shore, hardness measurement

Chcel by som srdečne poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce pánovi doc.Ing. Davidovi Maňasovi Ph.D. za odborné rady, čas a trpezlivosť, ktorú mi venoval pri vypracovávaní mojej práce. Tiež by som chcel poďakovať firme PSL a.s. za odborné rady a pomoc a mojej rodine za podporu.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SKÚŠKY TVRDOSTI	12
1.1 SKÚŠOBNÉ METÓDY NA MERANIE TVRDOSTI.....	13
2 STATICKÉ SKÚŠKY	15
2.1 VTLÁČACIE SKÚŠKY	15
2.1.1 Skúška tvrdosti podľa Brinella	16
2.1.1.1 Princíp skúšky.....	16
2.1.1.2 Postup skúšky.....	17
2.1.1.3 Prehľad chýb pri meraní	21
2.1.1.4 Skúšobná vzorka.....	21
2.1.1.5 Voľba skúšobných podmienok	21
2.1.1.6 Označovanie tvrdosti	24
2.1.1.7 Protokol o skúške Brinellovej tvrdosti.....	24
2.1.1.8 Schéma tvrdomeru Brinell.....	25
2.1.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa.....	25
2.1.2.1 Princíp skúšky.....	26
2.1.2.2 Postup skúšky.....	27
2.1.2.3 Prehľad chýb pri meraní	29
2.1.2.4 Skúšobná vzorka.....	30
2.1.2.5 Označovanie tvrdosti	30
2.1.2.6 Protokol o skúške Vickersovej tvrdosti	30
2.1.2.7 Schéma tvrdomeru Vickers	31
2.1.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella.....	31
2.1.3.1 Princíp skúšky.....	32
2.1.3.2 Postup skúšky.....	34
2.1.3.3 Skúšobné telieska.....	35
2.1.3.4 Prehľad chýb pri meraní	36
2.1.3.5 Skúšobná vzorka.....	36
2.1.3.6 Označovanie tvrdosti	36
2.1.3.7 Skúšobný protokol.....	37
2.1.3.8 Schéma tvrdomeru Rockwell.....	38
2.1.4 Skúška tvrdosti podľa Knoopu.....	38
2.1.4.1 Princíp skúšky.....	38
2.1.5 Univerzálna tvrdosť	40
2.1.5.1 Princíp skúšky.....	40
2.1.5.2 Označovanie tvrdosti	40
2.2 VRYPOVÉ SKÚŠKY	41
2.2.1 Martensova metóda.....	41
3 DYNAMICKÉ SKÚŠKY	42
3.1 PLASTICKÉ METÓDY	43
3.1.1 Nárazová metóda voľným pádom.....	43
3.1.2 Nárazová metóda stlačenou pružinou	43

3.1.2.1	Baumanovo kladívko	43
3.1.3	Komparačná metóda	44
3.1.3.1	Poldi kladívko	44
3.2	ELASTICKÉ METÓDY	45
3.2.1	Odrazová metóda voľným pádam	45
3.2.2	Kyvadlová odrazová metóda	47
3.2.3	Porovnávacie meranie tvrdosti oceľových guľôčok	47
4	POROVNANIE METÓD A ICH POUŽITIE	48
II	PRAKTICKÁ ČASŤ	50
5	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	51
5.1	CIEĽ PRÁCE	51
5.2	NAVRHNUTÉ SKÚŠOBNÉ TELESÁ	51
5.3	POSTUP MERANIA	51
6	TEPELNÉ A CHEMICKO - TEPENÉ SPRACOVANIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK	54
6.1	CEMENTOVANIE	54
6.2	NITRIDOVANIE	54
6.3	KALENIE	54
6.3.1	Povrchové kalenie	55
6.4	ZUŠEACHŤOVANIE	55
7	SPRACOVANIE VÝSLEDKOV	56
7.1	OCEĽ 14 220 CEMENTOVANÁ	57
7.2	OCEĽ 11 353 CEMENTOVANÁ	58
7.3	OCEĽ 11 353 NITRIDOVANÁ	59
7.4	OCEĽ 12 060 POVRCHOVO KALENÁ	60
7.5	OCEĽ 12 060 KALENÁ	61
7.6	OCEĽ TEPELNE SPRACOVANÁ	62
7.7	OCEĽ 12 060 CEMENTOVANÁ	63
7.8	OCEĽ ZUŠĽACHTENÁ	64
7.9	OCEĽ NITRIDOVANÁ	65
8	DISKUSIA VÝSLEDKOV	66
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK	74

ÚVOD

Tvrdosť predmetov človek subjektívne rozlišuje nervovými zakončeniami „receptormi“ na povrchu svojho tela. Okrem veľkosti, tvaru, drsnosti alebo hladkosti predmetov môže tak zistiť aj ich tvrdosť. Všetky predmety, ktoré človek nestlačí vlastnou silou považuje za tvrdé. Ale to je v súčasnosti nedostačujúce.

V konštrukčnej praxi radíme skúšky tvrdosti k najstarším skúškam kovových, nekovových a iných materiálov. V dnešnej dobe zastávajú v odbore skúšania materiálov jedno z najdôležitejších a najvýznamnejších miest. Sú v praxi veľmi rozšírené z hľadiska ich jednoduchosti, rýchleho vykonania, cenovej dostupnosti, ale aj možnosti ich použitia v tom prípade, kde sa iné mechanické skúšky použiť nedajú. Veľmi často sa tvrdosť materiálu považuje za rozhodujúcu vlastnosť z hľadiska jeho použitia. Môžeme povedať, že aj keď dochádza k deštrukcii materiálu, sú tieto skúšky v podstate nedeštruktívne, pretože funkčné a vzhľadové poškodenie skúšobných dielcov je väčšinou bezvýznamné.

Tvrdosť nie je možné definovať ako fyzikálnu veličinu, jej hodnota závisí od komplexných vlastností povrchu skúšaného materiálu a od skúšobných podmienok, pri ktorých sa tvrdosť zisťujeme. Tvrdosť je mechanická vlastnosť materiálu vyjadrená odporom proti deformácii povrchu vyvolanej pôsobením geometricky určeného, definovaného telesa.

Hlavným cieľom bakalárskej práce je porovnať tvrdosti rôznych vzoriek vybranými metódami merania. V teoretickej časti sa budem zaoberať vypracovaním literárnej rešerše so zameraním na najpožívanejšie druhy skúšok tvrdosti, ich rozdelením, princípom a postupom merania, geometriou testovacích teliesok a ich odtlačkov, z ktorých sa následne určí výsledné tvrdosť. V praktickej časti budem experimentálne analyzovať tvrdosť vybraných kovov rôznej štruktúry, tepelného a chemicko-tepelného spracovania. Následne vyhodnotím a porovnam jednotlivé vzorky a metódy merania.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SKÚŠKY TVRDOSTI

Skúšky tvrdosti radíme k najstarším a najrozšírenejším skúškam kovových, nekovových a iných materiálov. Môžeme povedať, že aj keď dochádza k deštrukcii materiálu, sú tieto skúšky v podstate nedeštruktívne, pretože funkčné a vzhľadové poškodenie skúšobných dielcov je väčšinou bezvýznamné. [1]

Pri konštrukčných materiáloch, a najmä pri kovochoch a ich technických zliatinách, má tvrdosť povrchu veľký technický a praktický význam. Preto sa definícia a rozlišovanie ich tvrdostí zakladá na objektívnych fyzikálnych a technických princípoch a skúšobných metódach. [2]

Technickú tvrdosť nemožno jednoznačne definovať ako fyzikálnu veličinu, pretože jej hodnota závisí, viac ako pri ktorejkoľvek inej mechanickej vlastnosti, od komplexných vlastností povrchu skúšaného materiálu a od skúšobných podmienok, pri ktorých tvrdosť zisťujeme. Pri jednom materiáli je možno namerať toľko hodnôt tvrdosti, koľko meracích metód sa použije. Pri skúške tvrdosti sa povrch materiálu mechanicky zaťažuje tlakom cudzieho telesa z tvrdého materiálu a výsledok tohto pôsobenia sa kvalitatívne vyjadří ako tvrdosť. [1]

Tvrdosť môžeme definovať takto:

Tvrdosť je mechanická vlastnosť materiálu vyjadrená odporom proti deformácii jeho povrchu vyvolanej pôsobením geometricky definovaného telesa. [2]

alebo:

Tvrdosť materiálu je obecné definovaná ako vlastnosť materiálu, ktorá sa prejavuje ako odpor proti pružnej alebo plastickej deformácii, alebo oddeľovaní častí povrchu, alebo ich kombinácii. [1]

Tvrdosť možno všeobecne vyjadriť ako funkciu:

$$H = f(e, P, F, T, t, v) \quad (1)$$

kde: e- sú pružné vlastnosti skúšaného materiálu, najmä moduly pružnosti E, G a K

P- plastické vlastnosti skúšaného materiálu

F- veľkosť sily pôsobiacej na vtláčacie teliesko

T- tvar, rozmery a tvrdosť vtláčaného telieska

t- trenie medzi vtláčacím telieskom a skúšaným materiálom

v- rýchlosť pohybu vtláčacieho telieska

Hodnoty e a P v uvedenej funkčnej závislosti predstavujú odolnosť skúšaného kovu proti vnikaniu cudzieho telesa do jeho povrchu pri danej teplote. Táto odolnosť je výslednicou viacerých činiteľov, z ktorých sú rozhodujúce:

- Štruktúra kovu definovaná druhom atómovej väzby, typom kryštálovej mriežky a mriežkovými poruchami (vakencie, interstície, vrstvené chyby a ich hustota)
- Mikroštruktúra kovu definovaná najmä veľkosťou zrna, stupňom morfolologickej nerovnosti a nerovnovážnosti štruktúry
- Vnútorne napätie v kove vyvolaná tvárnením za studena, nerovnomerným ochladzovaním, fázovými premenami a pod.
- Teplota skúšaného kovu, ktorá výrazne ovplyvňuje aj jeho pružné, plastické a pevnostné vlastnosti a tým aj hodnotu nameranej tvrdosti. Po prekročení určitej hraničnej teploty sa v závislosti od druhu kovového materiálu mení jeho subštruktúra, štruktúra a vlastnosti, čo výrazne ovplyvňuje výsledky skúšky.

Z uvedeného vyplýva, že tvrdosť materiálu sa mení podľa jeho čistoty, stavu štruktúry a pod.[2]

Hodnoty tvrdosti sa uvádzajú bezrozmerné, alebo s jednotkou N.mm^2 . Použitie jednotky N.mm^2 však môže viesť k zámene s pevnosťou. Preto sa tvrdosť uvádza bezrozmerné s udaním spôsobu merania alebo stupnice. [1]

1.1 Skúšobné metódy na meranie tvrdosti

Skúšky mechanickej tvrdosti sú výhodné a v praxi veľmi rozšírené, najmä kvôli jednoduhosti a možnosti použitia aj vtedy, keď iné skúšky nemôžu byť použité (napr. na skúšanie veľkých, rozmerných a ťažkých kusov priamo na mieste).

Kov sa pri takejto skúške neporuší ako pri väčšine ostatných mechanických skúšok, pretože meraním tvrdosti sa ovplyvní len veľmi malý objem na povrchu skúšaného kovu.

Tvrdosť sa skúša viacerými metódami, ktoré možno rozdeliť:

1. podľa **rýchlosti zat'azujúcej sily**:

- statické – Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop
- dynamické: a) plastické- Poldi kladívko, Baumanove kladívko, nárazová metóda voľným pádom
- b) elastické- Shore, kyvadlová odrazová metóda(duroskop)

2. podľa účelu merania tvrdosti:

- skúšky makrotvrdosti (skúša tvrdosť kovu ako celku)
- skúšky mikrotvrdosti (skúša tvrdosť jednotlivých zložiek štruktúry kovu)

3. podľa princípu:

- vtláčacie
- vrypové
- odrazové [2]

Pri **vrypových metódach** sa do hladko vylešteného povrchu skúšaného kovu rýpe diamantovým telieskom určitého tvaru, zaťaženého závažím. Hodnota tvrdosti sa zistí zo šírky vrypu (Martensova metóda). Tieto metódy nie sú normalizované a v praxi sa preto používajú pomerne málo.

Princíp **odrazových metód** spočíva v odraze padajúceho telieska určitého tvaru a hmotnosti od skúšanej vzorky. Časť energie padajúceho telieska vytvorí jamku v skúšanom kove a zvyšok energie vo forme pružného odrazu vymrští skúšobné teliesko do určitej výšky. Výška odrazu je meradlom tvrdosti skúšaného materiálu (Shore). Metóda sa používa na skúšanie veľmi tvrdých materiálov.

Pri **kyvadlových metódach** je meradlom tvrdosti úbytok energie kyvadla, ktoré rozširuje vopred vytvorený vtláčok guľôčky v skúšanom materiáli. Táto metóda sa už v praxi nepoužíva. [2]

Presné porovnanie hodnôt tvrdosti je možné iba pri použití rovnakej metódy a rovnakého skúšobného zariadenia.

Hodnoty tvrdosti stanovené jednou metódou nie je možné obecné previesť na iné stupnice tvrdosti alebo pevnosť v ťahu. [1]

2 STATICKÉ SKÚŠKY

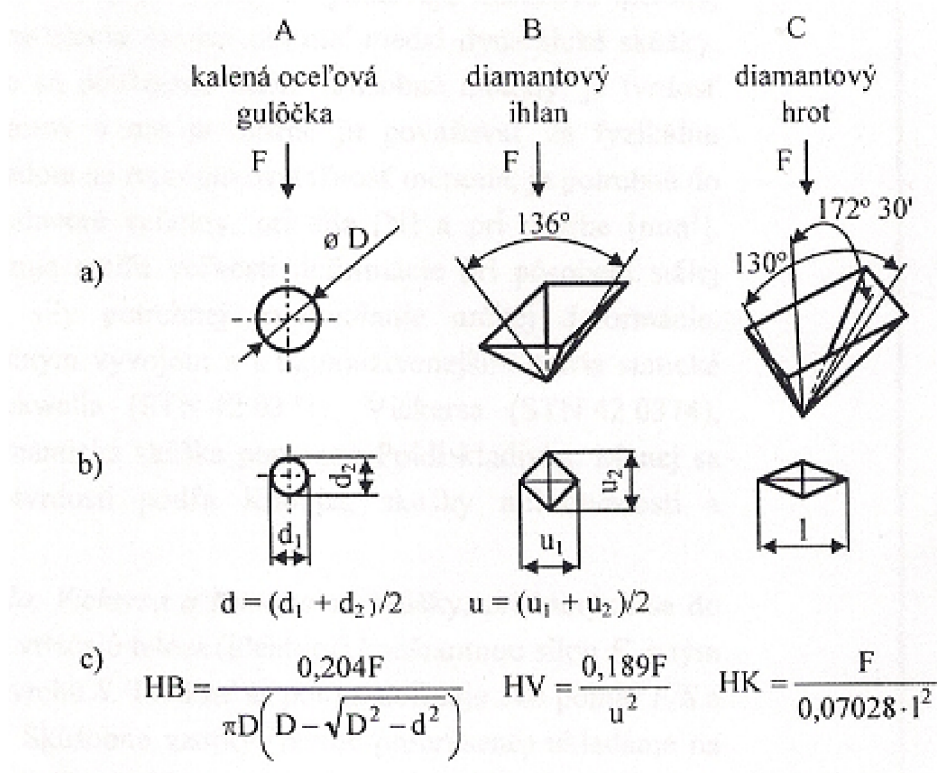
Statické skúšky sú založené na vniknutí skúšobného telieska štandardnou skúšobnou statickou silou do meraného materiálu a určení hodnoty tvrdosti ako podielu veľkosti sily a charakteristickej veľkosti vtlačku v skúšanom materiáli.

2.1 Vtláčacie skúšky

Vtláčacie skúšky sa zakladajú na princípe vtláčania guľôčky, ihlanu, kužeľu alebo iného presne definovaného telesa zo zakalenej ocele, tvrdého kovu alebo diamantu do skúšaného materiálu. Meradlo tvrdosti je veľkosť plastickej deformácie (Brinell, Vickers, Knoop), alebo metódy u ktorých je meradlo tvrdosti veľkosť elasticko-plastickej deformácie (Rockwell). Tvrdosť u vtláčacích metód je definovaná ako pomer medzi zaťažením a plochou vtlačku (Brinell, Vickers) alebo zaťažením a plochou priemetu vtlačku (Knoop). U metód podľa Rockwella sa tvrdosť určuje priamo z trvalej hĺbky vtlačku. [1]

Pri vtláčacích skúškach majú na namerané hodnoty vplyv:

- Pružné vlastnosti materiálu
- Plasticke vlastnosti materiálu
- Veľkosť sily pôsobiacej na vtláčacie teleso
- Tvar, rozmery a tvrdosť vtláčacieho telesa
- Trenie medzi vtláčacím telesom a skúšaným materiálom
- Teplota
- Doba pôsobenia zaťaženia
- Hrúbka skúšobného telesa alebo výrobku [11]



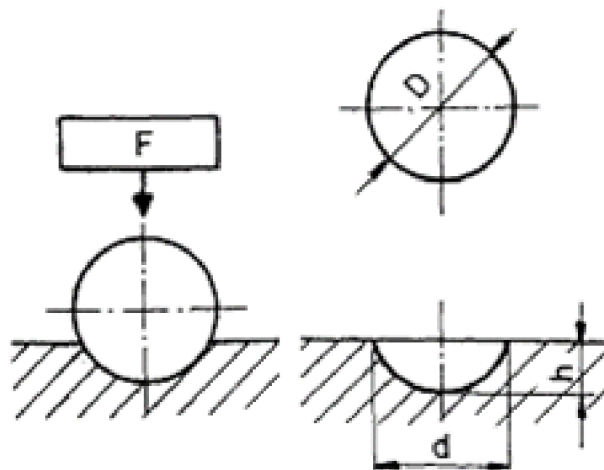
Obr.1 Skúšky tvrdosti: a- tvary inventora, b- tvary vtlačkov, c- vzorec pre výpočet tvrdosti, A- Brinellova metóda, B- Vickersova metóda, C- Knoopova metóda

2.1.1 Skúška tvrdosti podľa Brinella

Autor tejto skúšobnej metódy je Švédsky inžinier J.A.Brinell a prvýkrát ju predviedol v roku 1900 na II medzinárodnom kongrese o skúšaní materiálu a na svetovej výstave v Paríži. Skúška merania tvrdosti kalnej ocel'ovej gul'ôčky sa ujala a dnes je najrozšírenejšou skúškou tvrdosti. [1,9]

2.1.1.1 Princíp skúšky

Brinellova skúška tvrdosti spočíva vo vtlačaní skúšobného telieska (kalenej ocel'ovej gul'ôčky alebo tvrdokovovej gul'ôčky o priemere D) do povrchu skúšaného materiálu silou F , ktorá smeruje kolmo k povrchu telesa po stanovený čas t . Po odľahčení sa odmeria priemer vtlačku d (Obr.2 a,b). [2]



Obr.2. Princíp skúšky podľa Brinella

Hodnota Brinellovej tvrdosti je daná podielom zaťažujúcej sily F a povrchu vytlačeného guľového vrchlíka S

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (2)$$

Pričom

$$S = \pi \cdot D \cdot h = \frac{\pi \cdot D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (3)$$

kde h je hĺbka trvalého vtlačku (mm).

Po dosadení, ak je sila F vyjadrená v (N),

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

Hodnoty tvrdosti sa pri skúške môžu vypočítať podľa uvedeného vzorca, ale prakticky sa pre príslušný priemer vtlačku d a silu F odčítajú z tabuliek. Teplota pri skúške by sa mala pohybovať v rozmedzí 10-35°C. Keď sa robí skúška pri inej teplote, musí sa teplota uviesť v zápise o skúške. [2]

2.1.1.2 Postup skúšky

- Skúška sa robí pri teplote okolia v rozmedzí 10-35°C.
- Kontrolná skúška sa musí robiť pri teplote 18-28°C.
- Pri skúške sa používajú skúšobné zaťaženia uvedené v (Tab.1)

Tab.1. Hodnoty zaťaženia pre rôzne podmienky skúšania- Brinell

Označenie tvrdosti	Priemer guľôčky z tvrdokovu D [mm]	Pomer. zaťaženie- priemer guľôčky $0,102 \cdot F/D^2$ [N.mm ²]	Menovitá hodnota skúšobného zaťaženia F	
			[N]	[kPa]
HBW 10/3000	10	30	29 420	3000
HBW 10/1500	10	15	14 170	1500
HBW 10/1000	10	10	9 807	1000
HBW 10/500	10	5	4 903	500
HBW 10/250	10	2,5	2 542	250
HBW 10/100	10	1	980,7	10
HBW 5/750	5	30	7 355	750
HBW 5/250	5	10	2 452	250
HBW 5/125	5	5	1 226	125
HBW 5/62,5	5	2,5	612,9	62,5
HBW 5/25	5	1	245,2	2,5
HBW 2,5/187,5	2,5	30	1 839	187,5
HBW 2,5/62,5	2,5	10	612,9	62,5
HBW 2,5/31,25	2,5	5	306,5	31,25
HBW	2,5	2,5	153,2	15,625
HBW 2,5/6,25	2,5	1	61,29	6,25
HBW 1/30	1	30	294,2	30
HBW 1/10	1	10	98,07	10
HBW 1/5	1	5	49,03	5
HBW 1/2,5	1	2,5	24,52	2,5
HBW 1/1	1	1	9,807	1,0

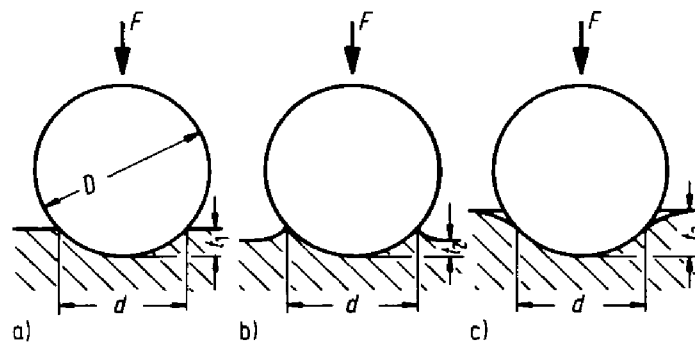
- Skúšobné zaťaženie sa musí vybrať tak, aby bol priemer vtlačku d v rozmedzí hodnôt od $0,24-0,6 D$.
- Pomer zaťaženia a priemeru ($0,102 \cdot F/D^2$) sa musí vybrať s ohľadom na skúšaný materiál a jeho predpokladanú tvrdosť podľa (Tab.2.)

Tab.2. Hodnoty pomeru zaťaženia a priemeru guľôčky pre rôzne materiály- Brinell

Skúšaný materiál	Brinellova tvrdosť HBW	Pomer zaťaženie- priemer guľôčky $0,102 \times F/D^2$ [N/mm ²]
Oceľ, zliatiny niklu, zliatiny titánu	-	30
Liatina (pri skúškach liatiny musí byť priemer guľôčky 2,5 mm, 5mm alebo 10mm)	<140	10
	≥140	30
Meď a zliatiny medi	<35	5
	Od 35 do 200	10
	>200	30
Ľahké kovy a ich zliatiny	<35	2,5
		5
	Od 35 do 80	10
		15
	>80	10
	15	
Olovo, cín	-	1
Spekaný kov	ISO 4498-1	

- Priemer guľôčky sa zvolí čo najväčší, ak to dovoľí hrúbka skúšobnej vzorky. Ak to hrúbka vzorky dovoľí, uprednostní sa priemer guľôčky 10 mm.
- Skúšobná vzorka sa musí položiť na tvrdú podložku.
- Styčné plochy musia byť čisté a bez cudzích teliesok. Dôležité je, aby sa skúšobná vzorka v priebehu skúšky nepohla.
- Vnikajúce teliesko sa zatláča do skúšobnej vzorky skúšobným zaťažením kolmo na jej povrch, bez nárazov a chvenia až do dosiahnutia plného zaťaženia.
- Čas od začiatku zaťažovania do jeho plnej hodnoty nesmie byť menší ako 2 s a väčší ako 8 s. Čas pôsobenia plného zaťaženia je od 10 s do 15 s.
- Počas skúšky sa musí skúšobný stroj chrániť pred nárazmi a chvením, ktoré môžu ovplyvniť výsledok skúšky.

- Vzďialenosť od okraje skúšobnej vzorky musí byť najmenej 2,5-násobok priemernej hodnoty vŕačku pre oceľ, liatinu, meď a jej zliatiny a minimálne 3-násobok priemeru vŕačku pri skúšaní ľahkých kovov, cínu, olova a ich zliatin.
- Vzďialenosť stredov dvoch susedných vŕačkov musí byť najmenej 4-násobok priemernej hodnoty vŕačku pre oceľ, liatinu, meď a jej zliatiny a 6-násobok pri skúšaní ľahkých kovov, cínu, olova a ich zliatin.
- Po skúške sa meria priemer vŕačku v dvoch na seba kolmých smeroch. Brinellova tvrdosť sa stanovuje na základe aritmetického priemeru týchto dvoch meraní.
- Presnosť merania tvrdosti podľa Brinella závisí predovšetkým od správneho premerania vŕačku. Toto meranie býva niekedy obtiažné a nepresné, čo je jej nevýhodou. Vŕačok môže byť niekedy nezreteľný a nesúmerný.
- Na priemer vŕačku má veľký vplyv aj vŕiahnutie materiálu po okraji vŕačku (pri nespevnenom materiály) alebo naopak vytlačenie obvodového valu (pri spevnenom materiály). Príčina ďalšej chyby je deformácia použitej oceľovej guľôčky. Pre materiály tvrdšie ako 400 HB nie je oceľová kalená guľôčka vhodná a je potrebné použiť guľôčky z tvrdokovu. [1]

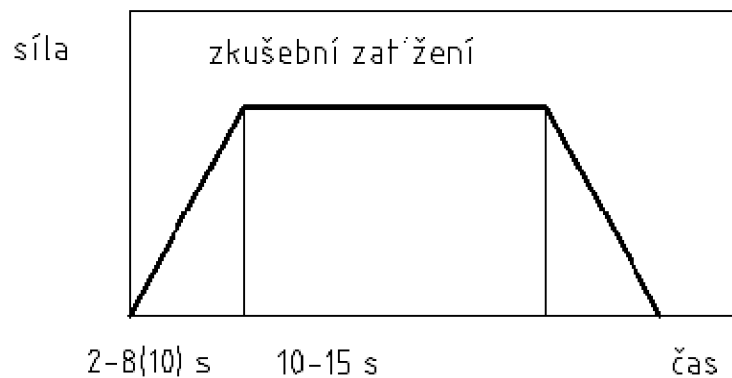


Obr.3. Meranie vŕačkov-Brinell

Skúška podľa Brinella ja dôležitá v tom, že medzi tvrdosťou HB a pevnosťou v ŕahu R_m platí u kovových materiálov závislosť:

$$R_m = (0,31 \text{ až } 0,41) HB \quad (5)$$

Pre uhlíkové ocele platí $R_m = 0,36 HB$ [6]



Obr. 4. Priebeh skúšobného zataženia-Brinell

2.1.1.3 Prehľad chýb pri meraní

- Chyby spôsobené odchýlkou zaťažujúcej sily
- Odchýlky od predpísaného priemeru guľôčky
- Chyby pri meraní rozmeru vtláčku
- Chyby spôsobené nedodržaním predpísaných skúšobných podmienok

2.1.1.4 Skúšobná vzorka

Skúška sa robí na povrchu, ktorý musí byť hladký a rovný, bez oxidačných šupín, cudzích látok a najmä bez mazív. Skúšobná vzorka musí mať povrch upravený tak, aby sa dal dobre zmerať priemer vtláčku. Príprava povrchu skúšobnej vzorky sa musí robiť tak, aby bola spôsobená čo najmenšia zmena vlastností (napr. tepelným opracovaním alebo tvárnením za studena). Hrúbka skúšobnej vzorky musí byť najmenej 8-násobok hĺbky vtláčku. Viditeľné stopy deformácie na opačnej strane skúšobnej vzorky naznačujú, že skúšobná vzorka je veľmi tenká. [1]

2.1.1.5 Voľba skúšobných podmienok

Výsledky tvrdosti namerané Brinellovou metódou závisia od skúšobných podmienok. Aby bolo možné porovnať namerané hodnoty tvrdosti rôznych materiálov, musia sa dodržať určité skúšobné podmienky. Pri voľbe skúšobných podmienok sú rozhodujúce:

- Priemer guľôčky
- Veľkosť zaťažujúcej sily

- Rýchlosť zaťaženia (vtlačania)
- Trvanie zaťaženia

Volba priemeru guľôčky:

Priemer guľôčky sa volí podľa:

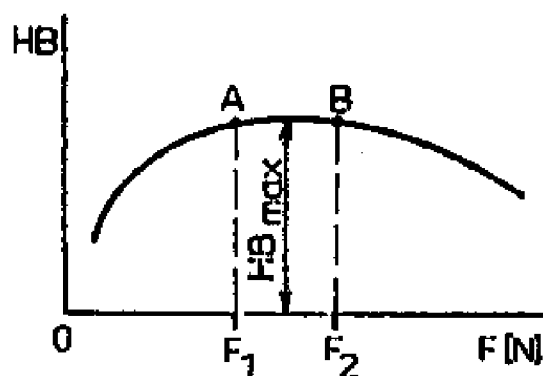
- Hrúbky meraného predmetu a smere pôsobenia sily F
- Rozmerov meraného predmetu v rovine kolmej na smer pôsobenia sily F
- Veľkosti zrna a heterogenity štruktúry skúšaného kovu

V praxi sa používa 5 priemerov guľôčok $D = 10, 5, 2,5, 2, 1$ mm.

Čím väčší priemer guľôčky sa použije, tým je väčšia presnosť pri meraní veľkosti vtlačku a dosiahne sa menší rozptyl nameraných výsledkov na jednej skúšobnej vzorke. Guľôčky sa vyrábajú z kalenej chrómovej ocele alebo zo spekaných karbidov, a musia mať presný rozmer, dokonale guľatý tvar a veľmi hladký povrch

Volba zaťažujúcej sily:

Ak sa pri konštantnom priemere guľôčky skúša na jednom materiáli tvrdosť podľa Brinella, s použitím rôznych zaťažujúcich síl sa mení aj nameraná hodnota tvrdosti. Vysvetľuje sa to tým, že tvar vtlačku pri rovnakom priemere vtlačku d , ale pri jeho rozličnej hĺbke h , vyvolanej rôzne veľkými zaťažujúcimi silami F , si nezachováva geometrickú podobnosť.



Obr.5. Závislosť Brinellovej tvrdosti na veľkosti zaťažujúcej sily

Princíp geometrickej podobnosti je pri Brinellovej skúške vyjadrený vzťahom

$$F = k \cdot D \quad (6)$$

Konštanta k sa určí na základe dodržania podmienky, že pri všetkých skúšaných materiáloch bol dodržaný pomer $d=(0,25\text{ až }0,6)D$. Jej hodnota je odstupňovaná podľa tvrdosti skúšaných materiálov do piatich stupňov. (Tab.3.)

Tab.3. Hodnoty konštanty k pre materiály rôznej tvrdosti- Brinell

Kovy a zliatiny	k	Rozsah HB
Železo, oceľ, liatina, vysokopevné zliatiny	30	Od 96 do 450
Meď, nikel a ich zliatiny	10	Od 32 do 200
Hliník, horčík, zinok a ich zliatiny	5	Od 16 do 100
Ložiskové kovy	2,5	Od 8 do 50
Cín, olovo	1	Od 3,2 do 20

Veľkosť zaťažujúcej sily F je v [N] pre jednotlivé hodnoty konštanty k a príslušné priemery guľôčok D zostavená v (Tab.4.)

Tab.4. Veľkosť zaťažujúcej sily pre hodnoty k a priemery guľôčky D - Brinell

D[mm]	Sila F[N]				
	30	10	5	2.5	1
10	29 430	9 800	4 900	2 450	980
5	7 355	2 450	1 225	613	245
2,5	1 840	613	306,5	153,2	61,5
2	1 176	392	196	98	39,2
1	294	98	49	24,5	9,8

Hodnoty Brinellovej tvrdosti sú ekvivalentné len v rámci jednej hodnoty konštanty k .

Voľba rýchlosti a doby zaťaženia:

Rýchlosť zaťaženia je vyjadrená rýchlosťou rastu zaťažujúcej sily od okamihu, keď sa guľôčka dotkne povrchu skúšaného materiálu až do dosiahnutia plného zaťaženia. Po dosiahnutí plného zaťaženia guľôčka naďalej vniká do materiálu. Rýchlosť tohto vnikania závisí od priebehu spevňovacích a relaxačných procesov, ktoré v skúšanom kove počas plastickej deformácie prebiehajú. Pohyb guľôčky sa zastaví, keď nastane rovnováha medzi zaťažujúcou silou a odporom materiálu proti ďalšej deformácii.

Na to, aby pri plnom zaťažení pod stláčanou guľôčkou prebehol plasticky tok, teba určitý čas, ktorému hovoríme trvanie zaťaženia t . Čas zaťaženia by sa mal pohybovať v takom rozsahu, aby neovplyvnil výsledok merania. Z praktických dôvodov sa pri meraní tvrdosti vyžaduje čas skúšky čo najkratší. Preto sa trvanie skúšok stanovilo v príslušných normách a pohybuje sa v závislosti od taviacej teploty skúšaných kovov

- Pre zliatiny železa v rozsahu 10-15 s
- Pre neželezné kovy a ich zliatiny 10-180s [2]

2.1.1.6 Označovanie tvrdosti

Podľa STN EN ISO 6506 je Brinellovo označenie tvrdosti HBW a nesmie sa zamieňať s predchádzajúcim označením HB alebo HBS, čo je označenie pre tvrdosť pri použití oceleovej guľôčky ako vtláčacieho telieska.

Písmená HBW sa uvádzajú za hodnotu tvrdosti a sú doplnené indexom, ktorý charakterizuje podmienky skúšky v nasledujúcom poradí:

- a) Priemer guľôčky v mm
- b) Veľkosť skúšobného zaťaženia
- c) Čas pôsobenia skúšobného zaťaženia v sekundách

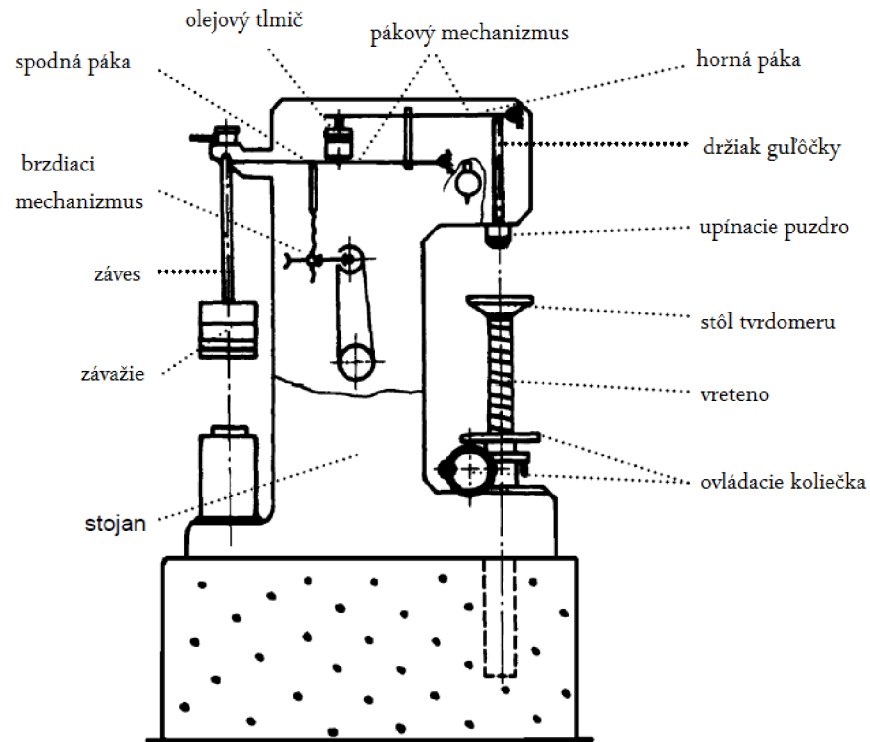
Príklad: 600 HBW 1/30/20- Brinellova tvrdosť s hodnotou 600 stanovená guľôčkou s priemerom $D=1$ mm pri skúšobnom zaťažení 30 kPa s časom zaťaženia 20 s.

2.1.1.7 Protokol o skúške Brinellovej tvrdosti

Protokol o skúške Brinellovej tvrdosti musí obsahovať:

- Odkaz na medzinárodnú normu podľa ktorej sa meria t.j. STN EN ISO 6506
- Všetky podrobnosti potrebné na úplnú identifikáciu skúšobnej vzorky
- Teplotu skúšania
- Výsledok skúšky
- Všetky požiadavky, ktoré nie sú uvedené v norme
- Akékoľvek podrobnosti, ktoré by mohli ovplyvniť výsledok skúšky [1,5]

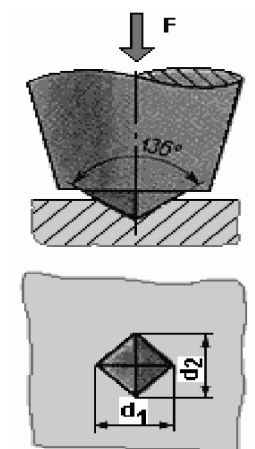
2.1.1.8 Schéma tvrdomeru Brinell



Obr.6. Schéma tvrdomeru Brinell

2.1.2 Skúška tvrdosti podľa Vickersa

Skúška vznikla v Anglicku a prvýkrát ju opísali R.L. Smith a G.E. Sandland v roku 1922. Terajšie pomenovanie vzniklo podľa tvrdomeru, ktorý skonštruovali a vyrobili v anglickej firme Vickers. V USA sa táto skúška označuje ako diamond pyramid hardness test. [2]



Obr.7. Princíp skúšky podľa Vickersa

2.1.2.1 Princíp skúšky

Vickersova skúška sa zakladá na rovnakom princípe ako Brinellova. Do povrchu skúšobného telesa sa zatlačí diamantové teliesko v tvare pravouhlého štvorbokého ihlana so štvorcovou základňou a so špecifickým uhlom medzi protíľahlými stenami vrcholu 136° . Potom nasleduje zmeranie dĺžky uhlopriečok vtláčku, ktoré zostali na povrchu po uvoľnení skúšobného zaťaženia F . Tvrdosť podľa Vickersa je úmerná hodnote získanej z pomeru skúšobného zaťaženia k ploche vtláčku, o ktorom sa predpokladá že je pravouhlým štvorbokým ihlanom so štvorcovou základňou, pričom má vrchol s rovnakým uhlom ako skúšobný hrot. Tvrdosť podľa Vickersa je definovaná:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,189F}{d_{1,2}^2} \quad (7)$$

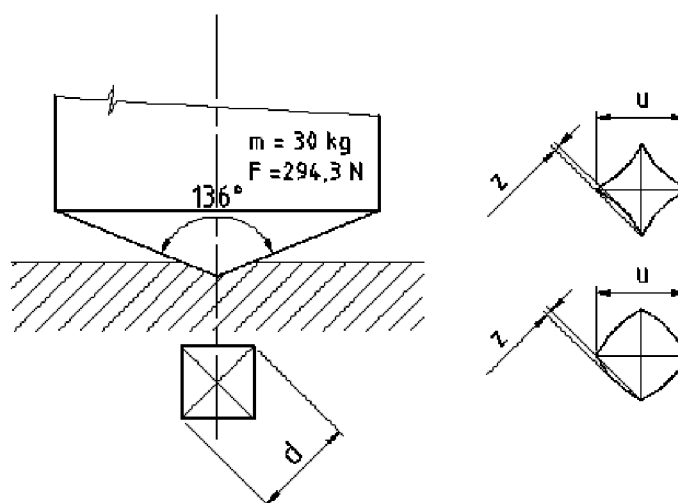
Kde F je veľkosť skúšobného zaťaženia [N], S je plocha povrchu vtláčku [mm^2], $d_{1,2}$ je aritmetický priemer $\frac{d_1 + d_2}{2}$ meraných dĺžok uhlopriečok d_1 a d_2 vtláčku [mm].

Skúška tvrdosti podľa Vickersa je určená pre dĺžky uhlopriečok vtláčku od 0,02 mm do 1,4 mm. Znižovanie skúšobného zaťaženia zvyšuje rozptyl výsledkov merania. To platí najmä pre skúšky tvrdosti pri nízkom zaťažení a skúšky mikrotvrdosti, kde základné obmedzenie spôsobuje meranie uhlopriečok vtláčkov. Pri skúške mikrotvrdosti je obtiažne dosiahnuť lepšiu presnosť stanovenia priemernej dĺžky uhlopriečky vtláčku ako $\pm 0,001$ mm.

Tab.5. Meranie podľa Vickersa

Rozsah skúšobného zaťaženia F [N]	Označenie tvrdosti	Predošlé označenie (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Skúška tvrdosti podľa Vickersa
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Skúška tvrdosti podľa Vickersa
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až < HV 0,2	Skúška mikrotvrdosti podľa Vic-

Následkom rozdielneho spevnenia pri hranách ihlanu a uprostred plôch nemusí byť priemer vtláčku presne štvorcový, ale strany môžu byť buď vyduté u mäkkých materiálov, alebo naopak vypuklé u spevnených materiálov. (Obr. 8.) [1]



Obr.8.Schéma skúšky podľa Vickersa

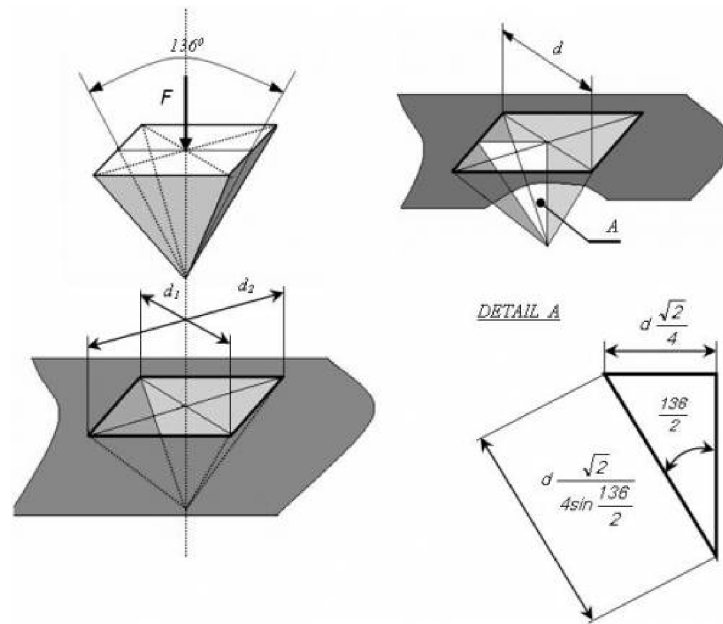
2.1.2.2 Postup skúšky

- Skúška sa robí pri teplote okolia 10-35 °C.
- Skúšky vykonávané v kontrolných podmienkach sa majú robiť pri teplote 18-28 °C.
- Skúšobné teleso je rovnaké pre všetky metódy Vickers. Tvorí ho diamant v tvare pravidelného štvorbokého ihlana so štvorcovou základňou. Vrcholový uhol je $136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$
- Pri skúške sa používajú zaťaženia uvedené v (Tab.6.)

Tab.6. Rozsah skúšobných zaťažení- Vickers

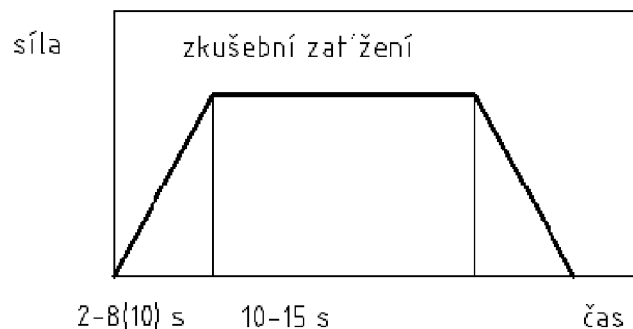
Skúška tvrdosti		Skúška tvrdosti pri nízkom zaťažení		Skúška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV	0,1417
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

- Voľba zaťaženia pri meraní závisí od hrúbky a tvrdosti skúšaného materiálu.
- Skúšaná vzorka sa musí položiť na pevnú podložku.
- Povrch vzorky musí byť čistý a zbavený cudzích materiálov.
- Konečná úprava povrchu musí umožniť presné stanovenie rozmerov uhlopriečok.
- V priebehu skúšky nesmie dôjsť k posunutiu skúšobnej vzorky.
- Skúšobný hrot sa zatlačí do skúšaného povrchu skúšobným zaťažením kolmo na povrch, bez otrasov a vibrácií, až kým zaťaženie nedosiahne predpísanú hodnotu. Skúšobný stroj musí byť počas skúšky chránený pred otrasmi a vibráciami.
- Čas od začiatku zaťažovania až po dosiahnutie maximálnej hodnoty zaťaženia má byť v rozmedzí 2 s až 8 s. Pri skúške tvrdosti pri nízkom zaťažení a skúške mikrotvrdosti tento čas nemá prekročiť 10 s.
- Trvanie skúšobného zaťaženia má byť 10 až 15 s.
- Pri skúške tvrdosti pri nízkom zaťažení a skúške mikrotvrdosti rýchlosť posuvu hrotu nemá prekročiť 0,2 mm/s.
- Vzdialenosť medzi stredom vtlačku a okrajom skúšobnej vzorky má byť najmenej 2,5-násobok priemernej dĺžky uhlopriečky vtlačku v prípade ocele, meďi a zliatin meďi a minimálne 3-násobok priemernej dĺžky uhlopriečky pri skúšaní ľahkých kovov, cínu, olova a ich zliatin.
- Vzdialenosť stredov dvoch susedných vtlačkov musí byť najmenej 3-násobok veľkosti uhlopriečky pre oceľ, liatinu, meď a jej zliatiny a 6-násobok pri skúšaní ľahkých kovov, cínu, olova a ich zliatin.
- Po skúške sa merajú dĺžky oboch uhlopriečok. Na výpočet tvrdosti podľa Vickersa sa má použiť aritmetický priemer týchto dvoch údajov. Na rovných povrchoch by rozdiel medzi dĺžkou týchto dvoch uhlopriečok nemal byť väčší ako 5%. Ak je tento rozdiel väčší, musí sa to uviesť v protokole o skúšky. [1]



Obr.9. Meranie vtláčkov- Vickers

- Výhodou tejto skúšky je to, že vtláčky sú veľmi malé a plytké takže ju možno použiť na meranie tvrdosti bez porušenia povrchu hotových a načisto opracovaných výrobkov.
- Ďalšou výhodou je použitie na meranie tvrdosti tenkých predmetov a vrstiev (cemen-tovaných, nitrídaných a pod.). [6]



Obr.10.Priebeh skúšobného zaťaženia-Vickers

2.1.2.3 Prehľad chýb pri meraní

- Chyby spôsobené odchýlkou zaťažujúcej sily
- Odchýlka od vrcholového uhla stien
- Chyby pri meraní dĺžky uhlopriečok
- Chyby spôsobené nedodržaním predpísaných skúšobných podmienok

2.1.2.4 Skúšobná vzorka

Skúška sa má vykonávať na povrchu, ktorý je hladký, rovný, zbavený oxidačného povlaku, cudzích materiálov a najmä úplne zbavený mazív. Stav povrchu má umožniť presné určenie dĺžky uhlopriečok vtlačku.

Príprava povrchu sa má vykonávať takým spôsobom, aby sa minimalizovala každá zmena tvrdosti povrchu (napr. v dôsledku ohrevu pri brúsení a leštení). Hrúbka skúšobného telesa alebo vrstvy pod vtlačkom má byť minimálne 1,5-násobok dĺžky uhlopriečky vtlačku. Na protiľahlej strane skúšobného vzorku nesmie byť po skúške vidieť žiadnu deformáciu.

2.1.2.5 Označovanie tvrdosti

Vickersova tvrdosť sa označuje **HV**. Písmená HV sa uvádzajú za hodnotu tvrdosti a sú doplnené o podmienky skúšky v poradí:

- a) Veľkosť skúšobného zaťaženia
- b) Čas pôsobenia zaťaženia

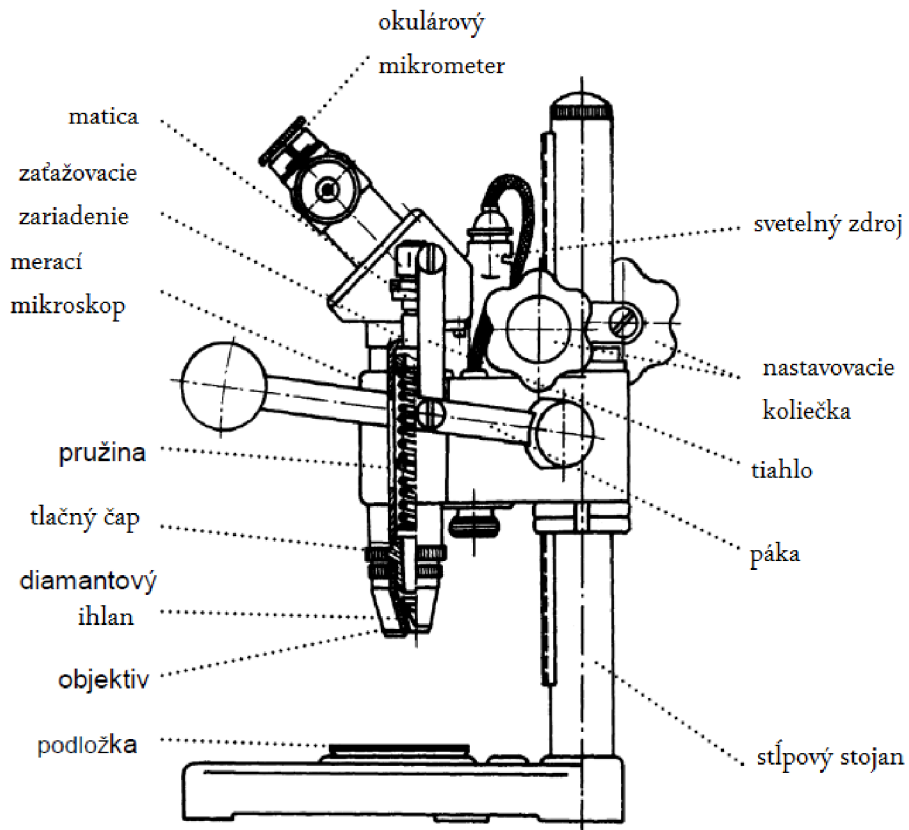
Príklad: 640 HV 30/20- Vickersova tvrdosť s hodnotou 640 stanovená pri skúšobnom zaťažení 294,2 N s časom zaťaženia 20 s. [2]

2.1.2.6 Protokol o skúške Vickersovej tvrdosti

Protokol o skúške Vickersovej tvrdosti musí obsahovať:

- Odkaz na medzinárodnú normu podľa ktorej sa meria t.j. STN EN ISO 6507
- Všetky podrobnosti potrebné na úplnú identifikáciu skúšobnej vzorky
- Teplotu skúšania
- Výsledok skúšky
- Všetky požiadavky, ktoré nie sú uvedené v norme
- Akékoľvek podrobnosti, ktoré by mohli ovplyvniť výsledok skúšky [1,5]

2.1.2.7 Schéma tvrdomeru Vickers



Obr.11. Schéma tvrdomeru Vickers

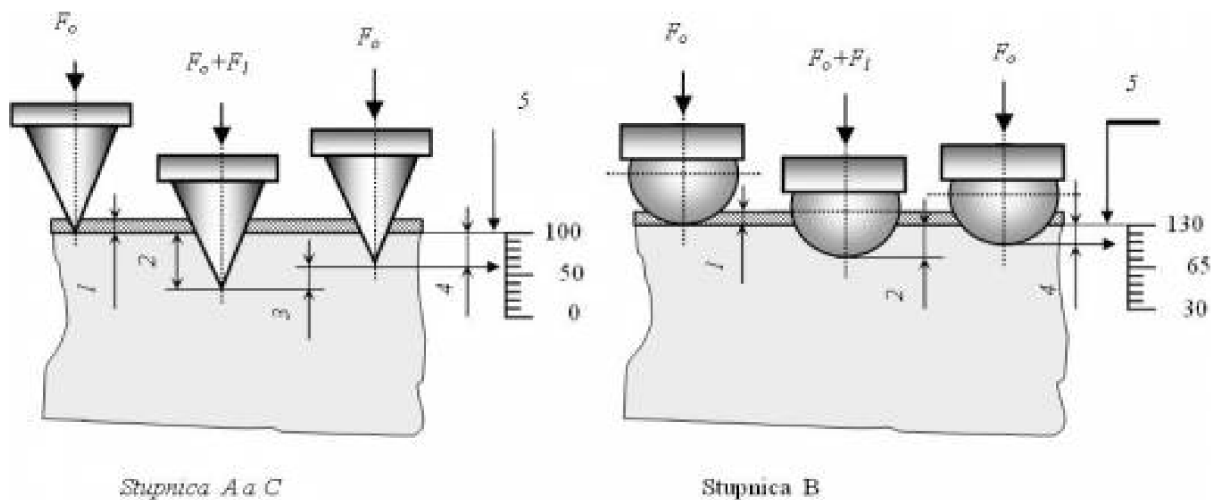
2.1.3 Skúška tvrdosti podľa Rockwella

Túto metódu vyvinul S.P. Rockwell v roku 1922. Radíme ju ku vtlačacím skúškam. Od predchádzajúcich skúšok podľa Brinella a Vickersa sa v princípe líši tým, že tvrdosť sa vyjadruje hĺbkou trvalého vtlačku. [2]

Ako skúšobný hrot sa používa buď diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° (pre tvrdé materiály), alebo oceľová guľôčka s priemerom $d=1,59$ mm (pre mäkké a stredne tvrdé materiály). [3]

2.1.3.1 Princíp skúšky

Skúška spočíva vo vtláčaní telieska (diamantového kužeľa alebo kovovej guľôčky) do povrchu skúšobnej vzorky v dvoch krokoch za určitých podmienok. Meria sa trvalá hĺbka vtláčku h pri predbežnom zaťažení po odstránení prídavného zaťaženia. [4]



Obr.12. Princíp skúšky podľa Rockwella

Z hodnoty h a dvoch konštánt S a N sa vypočíta tvrdosť podľa Rockwella pomocou vzťahu

$$\text{Tvrdosť podľa Rockwella} = N - \frac{h}{S} \quad (8)$$

kde:- h je trvalá hĺbka vtláčku pod predbežným skúšobným zaťažením po odstránení prídavného skúšobného zaťaženia- trvalá hĺbka vtláčku

- S je jednotka stupnice, charakterizuje stupnicu

- N je číslo charakterizujúce stupnicu

Stupnice podľa Rockwella sú uvedené v Tab.7. a spôsob výpočtu tvrdosti pre jednotlivé stupnice je v Tab.8.

Tab.7.Stupnice tvrdosti podľa Rockwella

Stupnice tvrdosti	Značka tvrdosti	Typ vtláčacieho telieska	Predbežné zaťaženie F_0 [N]	Prídavné zaťaženie F_1 [N]	Celkové zaťaženie F [N]	Oblasť použitia
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20-88 HRA
B	HRB	Guľôčka 1,5875 mm		882,6	980,7	20-100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1 373	1 471	20-70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		882,6	890,7	40-77 HRD
E	HRE	Guľôčka 3,175 mm		882,6	980,7	70-100 HRE
F	HRF	Guľôčka 1,5875 mm		490,3	588,4	60-100 HRF
G	HRG	Guľôčka 1,5875 mm		1 373	1 471	30-94 HRG
H	HRH	Guľôčka 3,175 mm		490,3	588,4	80-100 HRH
K	HRK	Guľôčka 3,175mm		1 373	1 471	40-100 HRK
15N	HR15N	Diamantový kužel		29,42	117,1	147,1
30N	HR30N	Diamantový kužel	264,8		294,2	42-86 HR30N
45N	HR45N	Diamantový kužel	411,9		441,3	20-77 HR45N
15T	HR15T	Guľôčka 1,5875 mm	117,1		147,1	67-93 HR15T
30T	HR30T	Guľôčka 1,5875 mm	264,8		294,2	29-82 HR30T
45T	HR45T	Guľôčka 1,5875 mm	411,9		441,3	10-72 HR45T

Pozn.: pre stupnice, ktoré používajú ako vtláčacie telieska guľôčky, sa značka tvrdosti doplní o „S“, ak je použitá oceľová kalená guľôčka a o „W“, ak je použitá guľôčka z tvrdokovu. [1]

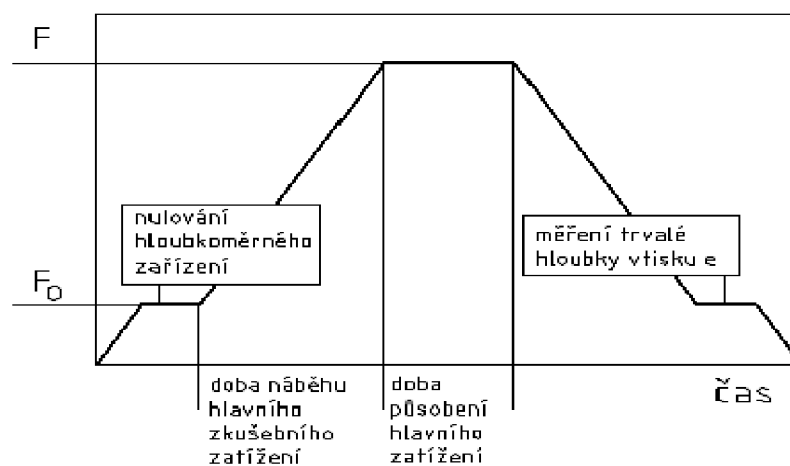
Tab.8. Spôsob výpočtu tvrdosti podľa Rackwella

Stupnice	Výpočet tvrdosti
A,C,D	$HRx = 100 - \frac{h}{0,002}$
B,E,F,G,H,K	$HRx = 130 - \frac{h}{0,002}$
N,T	$HRxx \ x = 100 - \frac{h}{0,001}$

2.1.3.2 Postup skúšky

- Skúška sa robí pri teplote okolia 10-35 °C.
- Skúšky vykonávané v kontrolných podmienkach sa majú robiť pri teplote 18-28 °C.
- Skúšobná vzorka musí byť umiestnená na tuhej podložke a podporeté tak, aby skúšaný povrch bol v rovine kolmej k osi vtláčacieho telieska a smeru zaťaženia.
- Skúšobná vzorka musí byť zabezpečená proti posunutiu.
- Výrobky valcového tvaru musia byť podporeté vhodným spôsobom, napr. strediace V-doštičky
- Vtláčacie teliesko sa privedie do styku so skúšaným povrchom a zaťaží sa predbežným zaťažením F_0 bez rázov, chvenia a kmitov. Doba pôsobenia predbežného zaťaženia F_0 nesmie prekročiť 3 s.
- Po dosiahnutí predzaťaženia sa nuluje meracie zariadenie hĺbky vtlačku t.j. meracie zariadenie sa nastaví do počiatkovej polohy a bez rázov, chvenia a kmitov sa zvýši zaťaženie z F_0 na F v čase od 1 do 8 s.
- Doba pôsobenia celkového zaťaženia musí byť $4 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$, t.j.:
 - 1 – 3 s u materiálov, ktoré nevykazujú závislosť plastickej deformácie na čase
 - 1 – 5 s u materiálov, ktoré vykazujú obmedzenú závislosť plastickej deformácie na čase
 - 10 – 15 s u materiálov, ktoré nevykazujú silnú závislosť plastickej deformácie na čase

- Po odľahčení prídavného zaťaženia F_1 , kedy pôsobí predbežné zaťaženie F_0 a po krátkej dobe stabilizácie, sa musí spraviť konečný odpočet. Účelom predbežného zaťaženia je vylúčiť z meranej hĺbky nepresnosti povrchových plôch.
- Hodnota tvrdosti sa stanoví z trvalej hĺbky vtláčku h použitím vzťahov v Tab.9. alebo sa odčíta priamo z meracieho zariadenia.
- Skúšobné zariadenie musí byť chránené pred nárazmi, chvením a kmitmi počas celej doby skúšky.
- Vzďialenosť medzi stredom vtláčku a okrajom skúšobnej vzorky má byť najmenej 2,5-násobok priemeru vtláčku (min.1 mm).Vzďialenosť stredov dvoch susedných vtláčkov musí byť najmenej 4-násobok priemeru vtláčku (min.2 mm).- platí pre metódy HRA až HRK
- Vzďialenosť medzi stredom vtláčku a okrajom skúšobnej vzorky má byť najmenej 2,5-násobok priemeru vtláčku (min.1 mm).Vzďialenosť stredov dvoch susedných vtláčkov musí byť najmenej 3-násobok priemeru vtláčku (min.2 mm).- platí pre metódy HRxxN a T. [1,6]



Obr.13.Priebeh skúšobného zaťaženia-Rockwell

2.1.3.3 Skúšobné telieska

- Kuželové diamantové vtláčacie teliesko s uhlom 120° a polomerom zaoblenia vrcholu 0,2mm
- Oceľové alebo tvrdokovová guľôčka o priemere 1,5875 alebo 3,175 mm.

2.1.3.4 *Prehľad chýb pri meraní*

- a) Chyby spôsobené odchýlkou zaťažujúcej sily
- b) Odchýlka vrcholového uhlu kužeľa a odchýlka priemeru guľôčky
- c) Chyby spôsobené nedodržaním predpísaných skúšobných podmienok

2.1.3.5 *Skúšobná vzorka*

Skúška sa musí vykonať na povrchu, ktorý je hladký a rovný, bez nečistôt a cudzích teliesok a hlavne úplne bez mazadiel, pokiaľ nie je v norme uvedené inak. Príprava musí byť vykonaná tak, aby zmena povrchovej tvrdosti napr. vplyvom ohrevu pre rezaní, brúsení alebo leštení, bola čo najmenšia. Toto musí byť dodržané hlavne v prípade malých hĺbok vtlačkov. Na protíľahlom povrchu skúšaného telesa nesmú byť viditeľné stopy deformácie po skúške. Hrúbka skúšobného telesa alebo vrstvy pri skúške musí byť minimálne 10-násobok trvalej hĺbky vtlačku pre kužeľové telieska a 15-násobok trvalej hĺbky vtlačku pre guľôčky.

Pre skúšky na vypuklých valcových a guľovitých povrchoch musia byť použité korekcie. Niektoré tvrdomery používajú opravné súčinitele po zadaní priemeru zakrivenej plochy automaticky.

Mimoriadnu pozornosť treba venovať skúškam na zaoblených povrchoch. Vypuklá strana musí byť obrátená k vytlačaciemu teliesku. Ak je k vtlačaciemu teliesku obrátený vydutý povrch, môže dôjsť k chybám k dôsledku sploštenia v podložke. [1]

2.1.3.6 *Označovanie tvrdosti*

Tvrdosť podľa Rockwella pre stupnice **A,C** a **D** sa označuje značkou HR za hodnotu tvrdosti, ktorá je doplnená písmenom označujúcim stupnicu.

Príklad: 59 HRC – tvrdosť podľa Rockwella 59 nameraná na stupnici C

Tvrdosť podľa Rockwella pre stupnice **B,E,F,G,H** a **K** sa označuje značkou HR za hodnotu tvrdosti, ktorá je doplnená písmenom označujúcim stupnicu a písmenom označujúcim typ použitej guľôčky (S pre oceľovú kalenú a W pre tvrdokovovú).

Príklad: 60 HRBW – tvrdosť podľa Rockwella 60 nameraná na stupnici B s použitím guľôčky z tvrdokovu.

Tvrdosť podľa Rockwella pre stupnicu **N** sa označuje značkou HR za hodnotu tvrdosti, ktorá je doplnená číslom udávajúcim celkové skúšobné zaťaženie a písmenom N označujúcim stupnicu.

Príklad: 70 HR30N – tvrdosť podľa povrchového Rockwella 70 nameraná na stupnici 30N s celkovým skúšobným zaťažením 294,2N.

Tvrdosť podľa Rockwella pre stupnicu **T** sa označuje značkou HR za hodnotu tvrdosti, ktorá je doplnená číslom udávajúcim celkové skúšobné zaťaženie a písmenom T označujúcim stupnicu a písmenom označujúcim typ použitých guľôčok (S pre oceľovú kalenú a W pre tvrdokovovú).

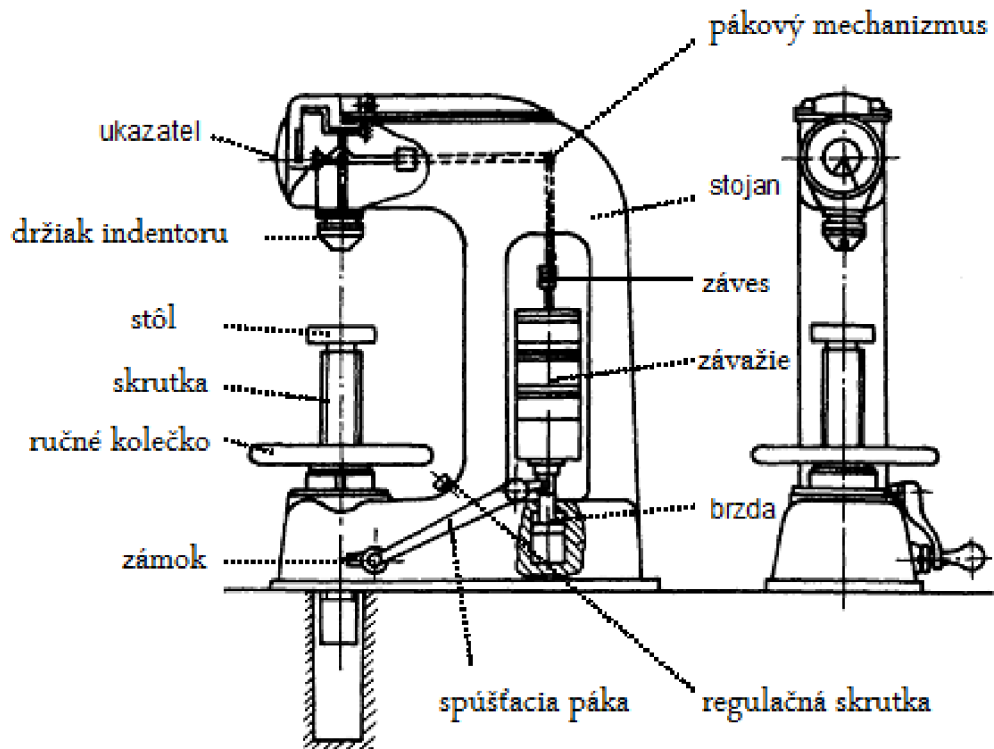
Príklad: 40 HR30TS – tvrdosť podľa povrchového Rockwella 40 nameraná na stupnici 30T s celkovým skúšobným zaťažením 294,2N a s použitím oceľovej kalenej guľôčky.

2.1.3.7 Skúšobný protokol

Protokol o skúške Rockwellovej tvrdosti musí obsahovať:

- Odkaz na medzinárodnú normu ISO 6508
- Všetky detaily potrebné pre úplnú identifikáciu skúšobného telesa
- Teplotu pri skúške
- Všetky postupy, ktoré nie sú uvedené v norme
- Podrobnosti každého prípadu, ktorý by mohol ovplyvniť výsledok [1,5]

2.1.3.8 Schéma tvrdomeru Rockwell



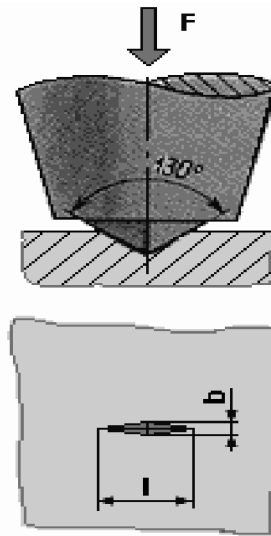
Obr. 14. Schéma tvrdomeru Rockwell

2.1.4 Skúška tvrdosti podľa Knoop

Skúška vznikla v roku 1939 v USA. Podstata skúšky je zhodná s Vickersovou skúškou ale líši sa tvarom indentoru. Skúška je určená na meranie veľmi tenkých vrstiev a mikrotvrdosti.

2.1.4.1 Princíp skúšky

Skúška je založená na princípe vtlačania diamantového telieska v tvare štvorbokého ihlanu (rovnako ako pri Vickersovej skúške) do skúšaného materiálu definovanou silou. Vrcholové uhly ihlanu sú $172,5^\circ$ a 130° . Vtlačok má tvar pretiahnutého kosoštvorca a na rozdiel do Vickersovej skúšky sa meria iba dĺžka dlhšej uhlopriečky.



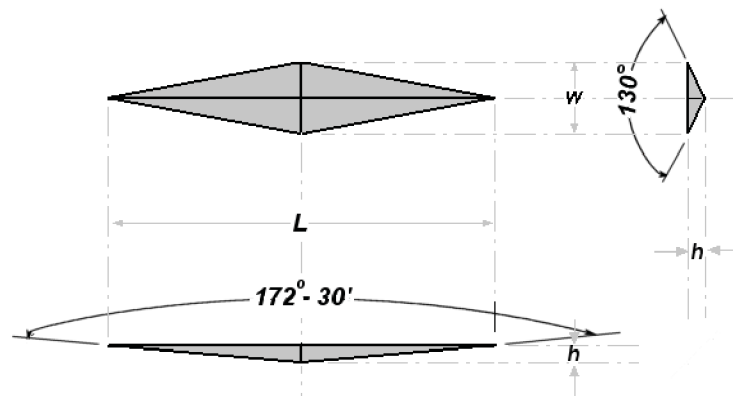
Obr.15. Princíp skúšky podľa Knoopa

Tvrdosť podľa Knoopa sa označuje **HK** a je definovaná ako podiel sily a druhej mocniny dĺžky uhlopriečky:

$$HK = \frac{1,4529 \cdot F}{d^2} \quad (9)$$

kde: F je pôsobiaca sila v N a d je dĺžka dlhšej uhlopriečky v mm.

Veľké nároky sú kladené na ostrosť hrán vtlačajúceho telieska a úpravu skúšaného povrchu.



Obr.16. Tvar indentoru pri Knoopovej skúške

Táto metóda je vhodná pre tenké plastové dosky, tenké kovové dosky, krehké materiály, alebo pre materiály, u ktorých nesmie byť použitá väčšia sila ako 3,6 kg. Zaťažujúca sila sa pohybuje v rozmedzí 25 – 3600 g. Vtlačok je pri rovnakom zaťažení takmer 3-násobne dlhší a plytší ako pri skúške podľa Vickersa. Plytkosť vtlačkov môže spôsobiť problémy pri meraní dĺžky uhlopriečky. Pri meraní sú kladené veľmi vysoké požiadavky na úpravu povrchu vzoriek a na ostrosť hrán skúšobného telieska. [7,9]

2.1.5 Univerzálna tvrdosť

Univerzálna tvrdosť bola svojho času označovaná za modernú metódu, ktorá by mala nahradiť stávajúce skúšobné metódy a dosiahnuť rýchle rozšírenie. Existujúce skúsenosti však tieto predpoklady nenapĺňujú. Norma DIN 50 359 popisuje metódu merania univerzálnej tvrdosti v rozsahu makro (skúšobné zaťaženie v rozsahu od 2 N do 1000 N) a mikro (skúšobné zaťaženia pod 2 N a hĺbka vtlačku väčšia ako 0,0002 mm).

2.1.5.1 Princíp skúšky

Do povrchu vzorky je vtlačované diamantové vtlačacie teliesko v tvare pravidelného štvorbokého ihlana so štvorcovou základňou (pyramída) a s daným vrcholovým uhlom (136°) medzi protíľahlými stranami. Zaťažujúca sila je aplikovaná v režime riadeného posuvu, alebo riadenej sily. Skúšobná sila F a hĺbka vtlačku h sa priebežne merajú vo fáze zaťažovania aj odľahčovania. Univerzálna tvrdosť je definovaná ako podiel skúšobnej (zaťažujúcej) sily F a plochy S vtlačku vypočítanej z hĺbky vtlačku pod zaťažením.

$$HU = \frac{F}{S(h)} = \frac{F}{26,43 \cdot h^2} \quad (10)$$

$$S(h) = \frac{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot h^2 \quad (11)$$

Univerzálna tvrdosť sa vypočíta z odpovedajúcich párov skúšobnej sily F a hĺbky vtlačku, ale iba pri zvyšovaní sily. Táto metóda umožňuje ďalej vyhodnocovať zistené závislosti $F = f(h)$. Je možno vyhodnotiť podiel elastickej a plastickej práce, plasticкую tvrdosť, relaxáciu a pod.

2.1.5.2 Označovanie tvrdosti

Univerzálna tvrdosť je označovaná symbolom HU, za ktorým nasledujú skúšobné podmienky v poradí:

- a) zaťaženie v N;
- b) čas dosiahnutia skúšobnej sily, ak je čas odlišný od v norme uvedeného rozsahu 3 až 10 s;

- c) počet krokov do dosiahnutia maximálnej skúšobnej sily, ak nie je skúšobná sila aplikovaná kontinuálne;
- d) hodnota tvrdosti. [1,2.6]

2.2 Vrypové skúšky

Vrypové skúšky patria medzi najstaršie skúšky merania tvrdosti materiálov. Historicky prvú stupnicu tvrdosti zostavil v roku 1822 Mohs. V rade za sebou empiricky zoradených materiálov (Tab. 9) možno nasledujúcim materiálom spraviť vryp do materiálu predchádzajúceho. Táto metóda sa používa v mineralógii. Pre meranie technických materiálov sú jej stupne relatívne veľké a nerovnomerné.

Tab.9. Mohsova stupnica tvrdosti

Stupeň tvrdosti	Minerál
1	Mastenec
2	Kamenná soľ
3	Kalcit
4	Fluorit
5	Apatit
6	Živec
7	Kremeň
8	Topás
9	Korund
10	Diamant

Táto stupnica je veľmi nepresná a jednotlivé stupne sú navzájom neúmerné. Preto sa u kovov z zliatin určuje tvrdosť na základe šírky vrypu. [8]

2.2.1 Martensova metóda

Nástrojom je brúsený diamant, ktorý je upevnený na dvojramennej páke. Diamant má hrot v tvare kužeľa s vrcholovým uhlom 90°. Na druhej strane páky je posuvné závažie. Skúšobná vzorka sa položí na stôl. Diamantový kužeľ je postupne zaťažovaný aby pri pohybe stola vytvoril na vzorke vryp o šírke 0,01mm. Zisťovanie tvrdosti nie je veľmi presné a v súčasnosti sa táto metóda používa veľmi málo. V súčasnej dobe sa využíva len na meranie tvrdosti veľmi tvrdých povrchových vrstiev. Označenie skúšky je **HMa**.

3 DYNAMICKÉ SKÚŠKY

Na rozdiel od predchádzajúcich metód, pri ktorých sa vtláčacie teliesko vtláčalo do povrchu skúšaného materiálu pomaly, pri dynamických metódach sa sila vyvodzuje rýchlo, t.j. dynamicky. Cieľom týchto skúšok nie je zisťovať dynamické hodnoty tvrdosti skúšaného materiálu. Dynamický účinok sily sa pri týchto skúškach využíva ako jednoduchý spôsob vyvedenia potrebného zaťaženia. Podľa základného princípu môžu byť tieto metódy:

- **Plastické** - keď nárazová sila vyvodzuje určitý trvalý vtláčok a tvrdosť sa určí jeho veľkosťou
- **Elastické** - keď sa na hodnotenie tvrdosti využívajú pružné vlastnosti materiálu [2]

DYNAMICKÉ SKÚŠKY TVRDOSTI			
PLASTICKÉ VYHOTOVENIE		ELASTICKÉ VYHOTOVENIE	
PRÍSTROJ TYP OZNAČENIE	SCHEMA	PRÍSTROJ TYP OZNAČENIE	SCHEMA
ω_{10} NÁRAZOVÁ METÓDA VOLNÝM PÁDOM		ω_{11} ODRAZOVÁ METÓDA VOLNÝM PÁDOM	
ω_{20} NÁRAZOVÁ METÓDA STLAČENOU PRUŽINOU		ω_{21} KYVADLOVÁ ODRAZOVÁ METÓDA	
ω_{30} KOMPARAČNÁ METÓDA		ω_{31} POROVNÁVACIE MĚŘENIE TVRDOSTI GULČOCOK	

Obr.17. Dynamické skúšky tvrdosti

3.1 Plastické metódy

3.1.1 Nárazová metóda voľným pádom

Pri tejto metóde (obr.18, P1) sa vtláča do skúšobného materiálu guľôčka silou, ktorá je vyvolaná pádom barana z určitej výšky. V prípade *a* baran padá na vtláčacie teliesko, ktoré sa pred skúškou dotýka skúšaného predmetu. V prípade *b* guľôčka padá súčasne s baranom. Tvrdosť sa vyjadruje ako merná deformačná práca:

$$A = \frac{W}{V} \quad (12)$$

kde *W* je celková spotrebovaná práca [J], a *V* je objem vtláčku [mm³]. [1]

3.1.2 Nárazová metóda stlačenou pružinou

Vtláčok sa dosiahne pôsobením pružiny, ktorá sa pred skúškou napne. Pri skúške sa baran vymršťí proti skúšanému predmetu (obr.18 P2). Systémom *a* pracuje tzv. Baumanovo kladívko, v prípade *b* je guľôčka nesená baranom. Tvrdosť sa podľa priemeru vtláčku odčíta z tabuliek, ktoré sú pre tento prístroj zvlášť zostavené. Keďže energia, ktorou sa guľôčka vtláča do skúšaného materiálu je konštantná, tvrdosť je úmerná veľkosti vtláčku.

3.1.2.1 Baumanovo kladívko

Baumanovo kladívko je mobilné tvrdomerne zariadenie používané často vo výrobných procesoch.

Princíp merania: Odistením a spustením pružiny, ktorá je súčasťou kladívka, dôjde k úderu razníka na vtláčacie teliesko v tvare guľôčky (ocel'ová kalená s priemerom $D = 10$ mm) a k jeho vtláčeniu do povrchu skúšobného materiálu. Meria sa priemer vtláčku d_{mat} , ktorý zostane na povrchu skúšobného materiálu. Tvrdosť sa určuje ako pomer skúšobného zaťaženia a povrchu vtláčku. Odmerajú sa vždy dva kolmé priemery vtláčku, z nich sa vypočíta aritmetický priemer. Výsledná tvrdosť je určená pomocou d_{mat} z tabuliek. Skúška sa robí na povrchu, ktorý je hladký a rovný, bez okují, cudzích teliesok a mazadiel. Na protiaľahlej strane skúšobného telesa nesmú byť po skúške viditeľné žiadne stopy deformácie.

Označenie tvrdosti pri tejto metóde je: - hodnota tvrdosti + **HB BAUMANN** [2]

3.1.3 Komparačná metóda

Pri tejto metóde vtláčame dynamickým rázom kalnú oceľovú guľôčku s priemerom $D = 10$ mm súčasne do skúšaného materiálu a porovnávacej tyčinky so známou tvrdosťou. Guľôčka zanechá vtláčok s priemerom d_M na skúšanom materiáli a vtláčok s priemerom d_T na porovnávacej tyčinke. Tvrdosť skúšaného materiálu zistíme zo vzťahu:

$$HB_M = HB_T \frac{D - \sqrt{D^2 - d_T^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_M^2}} \quad (13)$$

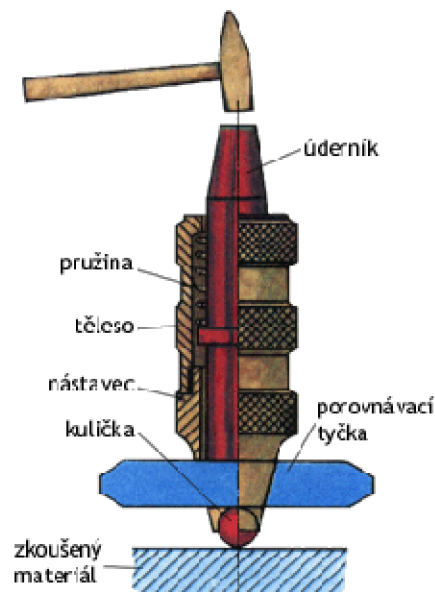
kde HB_M je tvrdosť skúšaného materiálu, HB_T je tvrdosť skúšobnej tyčinky, D je priemer guľôčky, d_M je priemer vtláčku na meranom materiáli, d_T je priemer vtláčku na skúšobnej tyčinke.

V tabuľkách, zostavených na základe veľkého počtu porovnávacích meraní, pre dané materiály nájdeme príslušnú tvrdosť skúšaného materiálu. Tabuľky sú zastavené pre porovnávanie tyčinky s pevnosťou v ťahu $R_m = 700$ MPa. V prípade, že porovnávací tyčinka má inú pevnosť, je potrebné tabuľkovú hodnotu vynásobiť prepočítavacím koeficientom :

$$k = \frac{\text{skutočková tvrdosť porovnávacej tyčinky [MPa]}}{700} \quad (14)$$

3.1.3.1 Poldi kladivko

Kladivko Poldi sa skladá z puzdra a odpruženého piestu. Puzdro je ukončené držiakom ocelevej kalenej guľôčky. Medzi piest a guľôčku sa vkladá porovnávací kalibrovaná tyčinka štvorcového prierezu o hrane 11 mm a tvrdosti cca 200 HBS. Pri vlastnom meraní sa prístroj postaví kolmo k povrchu skúšaného materiálu a na piest sa uderí kladivom o hmotnosti cca 500g. Nárazom kladiva sa vytvoria dva vtláčky – jeden na skúšanom materiáli a jeden v porovnávacej tyčinke. Odmeriame ich dva kolmé priemery a porovnaním určíme z prepočítavacích tabuliek tvrdosť skúšaného materiálu. [1]



Obr.18. Poldi kladivko

Skúška sa robí na povrchu, ktorý je hladký a rovný, bez okují, cudzích teliesok a mazadiel. Na protiahej strane skúšobného telesa nesmú byť po skúške viditeľné stopy deformácie. Výhodou tvrdomeru sú jeho malé rozmery, hmotnosť a možnosť funkčnosti prakticky v akejkoľvek polohe. Ide o najmenší prenosný tvrdomer pre meranie tvrdosti metódou Brinell.

Oblasť jeho využitia je predovšetkým pri potrebe merania tvrdosti na veľkých výrobkoch a konštrukciách, kde nie je možné využiť meranie na statickom alebo prenosnom prístroji, ktoré pracujú normalizovanou metódou merania tvrdosti podľa Brinella, resp. najmä na veľkých a ťažkých predmetoch priamo vo výrobe, v prevádzke a všade tam, kde nie je možné ani účelne odoberať vzorky na meranie tvrdosti v laboratóriu. Meranie je zaťažené značnou chybou (až $\pm 10\%$) a na zistenú hodnotu tvrdosti je potrebné pozeráť len ako na hodnotu informačnú.

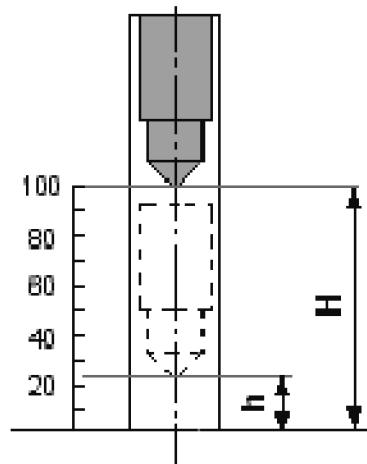
Označenie tvrdosti je hodnota tvrdosti + **HB POLDI** [1,3,10]

3.2 Elastické metódy

3.2.1 Odrazová metóda voľným pádam

Táto metóda je založená pružnom odraze štandardného telieska, padajúceho z určitej výšky na povrch skúšaného materiálu. Tvrdosť zisťujeme z veľkosti odskoku závažia (gulôčka,

diamantový hrot) spusteného z určitej výšky od skúšaného materiálu. Pri náraze telieska sa malá časť kinetickej energie spotrebuje na nevratnú plastickú deformáciu povrchu skúšaného telesa a zvyšná energia sa prejaví odrazom telieska. Z dosiahnutej výšky po odraze sa vypočíta hodnota tvrdosti, ktorá ale u dynamických metód skúšania tvrdosti nedosahuje presnosť statických skúšok. Zaradujeme sem tvrdosť podľa Shorea, ktorá tak patrí medzi dynamicko – elastické skúšky. Prístroj na stanovenie tvrdosti podľa Shorea sa nazýva Shoreov skleroskop.



Obr.19. Shoreov skleroskop

Celá meraná dĺžka je rozdelená na 140 dielikov, pričom základ, ktorý tvorí 100 dielikov, zodpovedá tvrdosti vysokouhlíkovej ocele zakalenej na martenzit. Tvrdosť meraného materiálu je daná výškou odrazu v dielikoch. Celková výška $H = 140 \text{ dielikov} = 10'' \approx 25,4 \text{ cm}$.

Shoreho skleroskopy sa používali predovšetkým na meranie tvrdosti valcov do valcovacích stolíc. Presnosť merania je pomerne malá a závisí od mnohých faktorov, napr. pohyb telieska závisí od trenia vo valci, ďalej presnosť merania ovplyvňujú:

- hladkosť povrchu;
- kolmosť dopadu telieska;
- hmotnosť skúšaného materiálu;
- a predovšetkým modul pružnosti skúšaného materiálu.

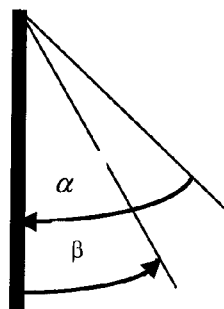
Porovnávať preto môžeme len výsledky merania u materiálov s približne rovnakým modulom pružnosti. Tento spôsob merania tvrdosti sa používa veľmi málo, väčšinou len pre me-

ranie tvrdosti veľkých výrobkov, konštrukcií a pod. Výhodou merania je, že empiricky zostavená stupnica skleroskopu udáva priamo hodnotu tvrdosti. Metóda je však oproti iným spôsobom meraní tvrdosti značne nespoľahlivá.

Označenie tvrdosti podľa Shorea je *hodnota tvrdosti HSh*.

3.2.2 Kyvadlová odrazová metóda

Princíp tejto skúšky je totožný s princípom Shoreovej metódy a rozdiel je len v spôsobe vyvedenia úderu padajúcim kyvadlom. Na tomto princípe pracuje Duroskop.



Obr.20. Duroskop

Princíp merania tvrdosti v tomto prípade spočíva v spustení definovaného skúšobného telieska z uhlu α na zvislú stenu skúšaného materiálu. Sleduje sa uhol β , pod ktorým skúšobné teliesko po dopade odskočí. Skúška sa robí na povrchu, ktorý je hladký a rovný, bez okují, cudzích teliesok a bez mazadiel. Vzhľadom k tomu, že skúška je založená na elastickej deformácii skúšaného povrchu, nemôžu byť na telese viditeľné stopy deformácie. Meria sa uhol odskoku skúšobného telieska β , niekedy býva miera odskoku kalibrovaná priamo v jednotkách tvrdosti.

3.2.3 Porovnávacie meranie tvrdosti ocelových guľôčok

Táto metóda sa používa na triedenie akosti guľôčok do ložísk a pod. kontroluje sa správnosť zakalenia, ktorá súvisí s tvrdosťou guľôčok padajúcich z rovnakej výšky. Výška ich odrazu je úmerná tvrdosti. [1]

4 POROVNANIE METÓD A ICH POUŽITIE

Najpoužívanejšie skúšobné metódy na meranie tvrdosti sú podľa Brinella, Vickersa a Rockwella. Každá z nich má svoje opodstatnenie, svoje oblasti použitia, ale aj určité prednosti a nedostatky, ktoré umožňujú, resp. vylučujú jej aplikáciu pri skúšaní konkrétnych materiálov. Pri vzájomnom porovnaní jednotlivých metód treba brať do úvahy najmä tieto hľadiská:

- jednoduchosť metódy;
- presnosť a citlivosť meraní;
- rýchlosť metódy;
- náročnosť na prípravu povrchu meraného materiálu;
- ekonomické hľadisko (cena skúšobného vtláčacieho telieska);
- oblasti použitia.

Brinellova metóda je vhodná na skúšanie mäkkých a stredne tvrdých materiálov, ktoré majú heterogénnu štruktúru (kovy s liatou štruktúrou, s textúrou po tvárnení, s hrubozrnnou štruktúrou a pod.). Odôvodňuje sa to tým, že pri tejto metóde sa skúša pomerne veľký objem kovu, čím sa získajú hodnoty tvrdosti zodpovedajúce priemerným vlastnostiam jeho štruktúry. Na druhej strane veľké vtláčky môžu znehodnotiť funkčnú plochu skúšaného výrobku. Vtláčacie teliesko je lacné a ľahko nahraditeľné. Skúška nevyžaduje veľmi čisto upravený povrch.

Rockwellova metóda sa vyznačuje najmä rýchlosťou a jednoduchosťou. Preto sa používa na bežnú a automatickú kontrolu tepelného spracovania výrobkov, najmä v hromadnej a sériovej výrobe. Rockwellove tvrdomery sú zaradené do výrobných linky a automaticky oddeľujú výrobky s nesprávnou tvrdosťou. Princíp merania tvrdosti podľa Rockwella sa dá dobre použiť aj na automatickú kontrolu hrúbky spevnených povrchových vrstiev, ktoré majú výrobky napr. po povrchovom kalení, cementovaní, nitridovaní a pod. Správna hrúbka vrstvy sa zistí tak, že diamantový kužeľ sa do nej vtláča postupne so stúpajúcim zaťažením, priebeh poklesu tvrdosti v závislosti od veľkosti zaťaženia sa registruje v počítači a porovnáva s normálom.

Z hľadiska opracovania meraného povrchu je táto metóda najmenej náročná. Presnosť a citlivosť pri meraní je menšia ako pri Brinellovej a Vickersovej metóde. Cena diamantového kužela je väčšia a jeho náhrada po poškodení nákladnejšia ako pri oceľových alebo tvrdokovových guľôčkach.

Vickersova metóda je najpresnejšia a najcitlivejšia na jemné rozdiely v tvrdosti skúšaného materiálu. Používa sa najmä v laboratóriách pri výskumných a vývojových prácach, ako aj na presnejšie práce pri kontrole a preberaní výrobkov a polovýrobkov. Meraný povrch sa musí starostlivo pripraviť, aby sa vtlačok mohol presne odčítať. Skúška nie je vhodná pre materiály s hrubozrnnou a nehomogénnou štruktúrou. Diamantový ihlan musí mať presné rozmery a nesmie byť poškodený. Jeho cena a náhrada sú pomerne nákladné. Pretože princíp tejto metódy je rovnaký ako pri Brinellovej metóde, hodnoty tvrdosti namerané obomi metódami sú dobre porovnateľné

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 EXPERIMENTÁLNÁ ČASŤ

5.1 Cieľ práce

Cieľom bakalárskej práce bolo meranie tvrdosti u vybraných typov ocelí, ktoré boli tepelne alebo chemicko-tepelne spracované. Meranie tvrdosti bolo realizované na integrálnom tvrdomeri Affri, v laboratóriách Ústavu výrobného inžinierstva Fakulty technologickej v Zlíne.

5.2 Navrhnuté skúšobné telesá

Meranie bolo realizované na deviatich kusoch skúšobných telies, ktoré boli tepelne alebo chemicko-tepelne spracované. Navrhnuté skúšobné telesá boli očíslované a následne brúsené a vyleštené. Na pripravených telesách sa realizovala séria meraní tvrdosti na 30 miestach rovnomerne rozložených po skúšanej ploche. Pretože sú medzi skúšobnými telesami vzorky s tenkými vrstvami (nitridované, cementované) bolo nutné túto skutočnosť zohľadniť pri meraní. Preto boli vybrané metódy Rockwell (HRA, HRC, HR15N, HR30N).

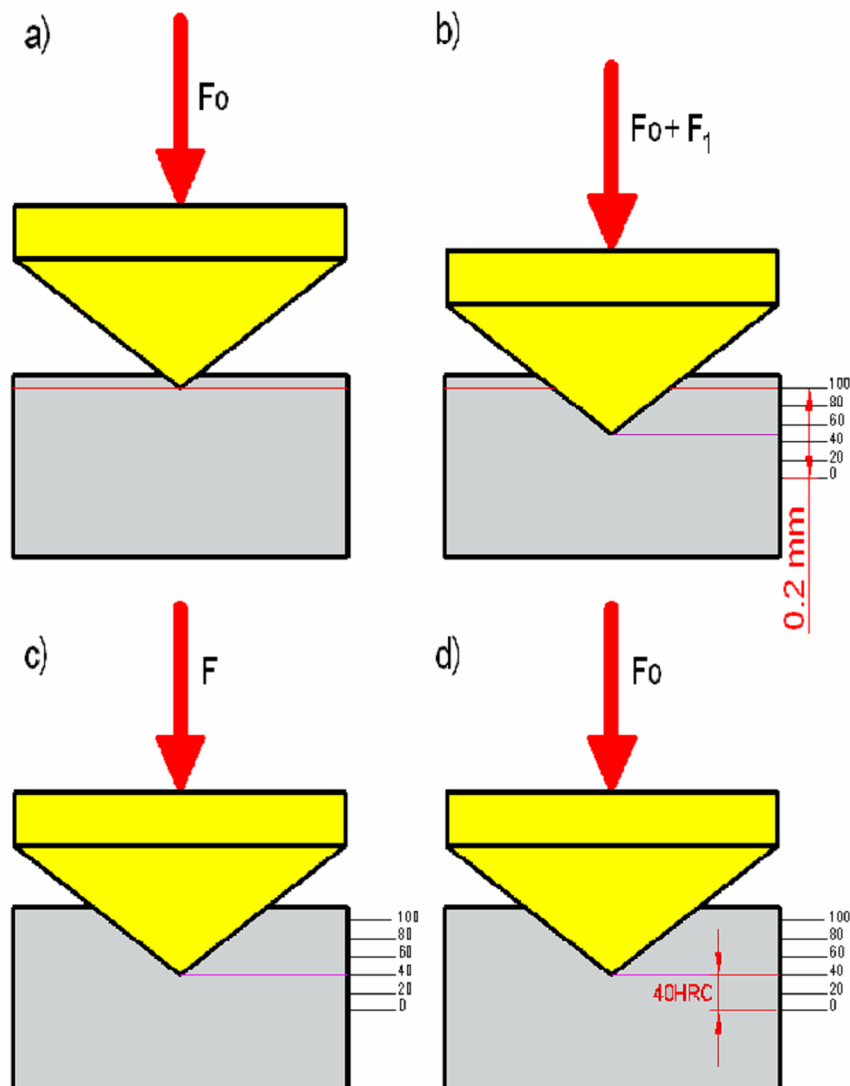
Tab.10. Použité metódy a normy

Por. č.	Názov	Norma
1	Skúška tvrdosti podľa Rockwella- metóda HRA	ČSN EN ISO 6508-1
2	Skúška tvrdosti podľa Rockwella- metóda HRC	ČSN EN ISO 6508-1
3	Skúška tvrdosti podľa Rockwella- metóda HR15N	ČSN EN ISO 6508-1
4	Skúška tvrdosti podľa Rockwella- metóda HR30N	ČSN EN ISO 6508-1

5.3 Postup merania

Pri všetkých použitých metódach podľa Rockwella sa ako indenter používal diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° a pomerom zakrivenia špičky $r = 2$ mm. Na meracom zariadení sa nastavila daná stupnica danej metódy a na podložku pod indenter sa umiestnila skúšobná vzorka. Na vzorku najskôr pôsobilo predbežné zaťaženie F_0 . Predbežné zaťaženie sa používa z dôvodu odstránenia nerovnosti a rozdielnej kvality povrchu. Po určitej dobe začne pôsobiť prídavné zaťaženie F_1 . Veľkosť zaťažujúcej sily je súčet predbežného

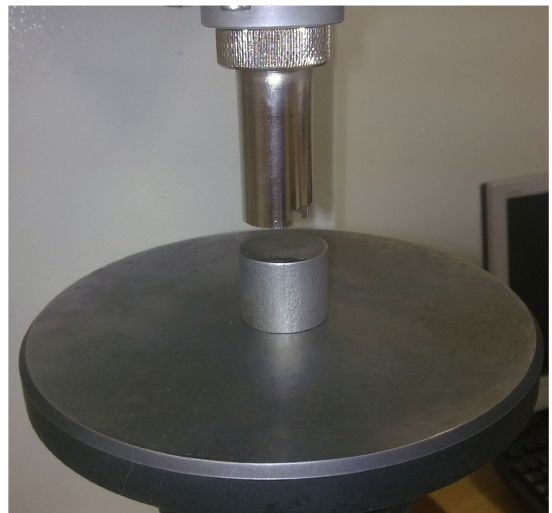
a prídavného zaťaženia ($F=F_0+F_1$). Veľkosť zaťažujúcej sily závisí od typu použitej metódy. Tvrdosť danej vzorky získame tak, že od hĺbky indentoru pri predbežnom zaťažení vynešieme stupnicu so 100 dielikmi do hĺbky 0,2 mm. Výsledná tvrdosť sa stanovuje z trvalej hĺbky vtláčku, ktorá je spôsobená zaťažujúcou silou. Tvrdosť je rozdiel hĺbky predbežného zaťaženia pred pôsobením prídavného zaťaženia a po ukončení pôsobenia prídavného zaťaženia.



Obr.21. Schéma metódy



Obr.22. Použité meracie zariadenie



Obr.23. Meracia hlava

6 TEPELNÉ A CHEMICKO - TEPENÉ SPRACOVANIE SKÚŠOBNÝCH VZORIEK

6.1 Cementovanie

Cementovanie je nasycovanie povrchu nízkouhlíkovej oceli uhlíkom a následné zakalenie. Pri tomto procese dochádza k vytváraniu vrstvy obohatenej o uhlík až na eutektoidnú alebo mierne nadeutektoidnú koncentráciu. Podľa druhu prostredia, z ktorého sa uhlík difunduje do oceli rozlišujeme 3 spôsoby cementovania (v tuhom, tekutom a plynnom prostredí). Už nacementovaná súčasť získa až po zakalení v povrchovej vrstve tetragonálny martenzit o vysokej tvrdosti, ktorý sa popúšťaním transformuje na kubický martenzit. Výsledný povrch materiálu je tvrdý a odolný voči opotrebeniu pri zachovaní húževnatosti základného materiálu pod touto vrstvou. Cementuje sa nad teplotou A_{C3} (850 – 950 °C). tvrdosť vrstvy dosahuje 50 – 60 HRC. Kalenia sa vykonáva buď priamo z cementačnej teploty, jednoduchým kalením po novom ohriatí alebo dvojitém kalením. [12]

6.2 Nitridovanie

Pri nitridácii dochádza k nasycovaniu povrchu ocele dusíkom v kvapalnom alebo plynnom prostredí. Povrch je tvorený veľmi tvrdými nitridmi legujúcich prvkov. Nitridácia sa vykonáva pri teplote 500 – 600 °C. K zlepšeniu nitridačnej vrstvy sa používajú špeciálne ocele obsahujúce uhlík, ktorého nitridi nie sú tak krehké ako nitridy železa a legujúcich prvkov. [12]

6.3 Kalenie

Kalenie je spôsob tepelného spracovania, ktorého cieľom je dosiahnuť stav odlišný od rovnovážneho. Podstatou je ohrev súčasti na kaliacu teplotu, zotrvanie na tejto teplote a prudké ochladenie. Kaliacu teplotu sa nevolí nad A_{Cm} , pretože by sa rozpustil cementit, ktorý prispieva k tvrdosti ocele po kalení. Prekročenie kaliacej teploty a príliš dlhé zotrvanie na kaliackej teplote spôsobujú rast austenitického zrna, ktorý sa zmení na hrubý martenzit s väčšou krehkosťou a zvyšuje sa množstvo zvyškového austenitu, čo má za následok pokles tvrdosti po kalení. Dostatočnú rýchlosť ochladzovania zabezpečíme vhodnými ochladzovacími prostrediami. [13]

6.3.1 Povrchové kalenie

Povrchové kalenie sa vykonáva tak, že sa materiál rýchlo ohreje na kaliacu teplotu a ihneď sa ochladí prúdom vody. Pretože je ohrev súčasti rýchly, nestačí sa súčasť ohriať v celom priereze ale len na povrchu. V jadre tak nedochádza ku prekryštalizácií a zostáva mäkké a húževnaté. Zakalená vrstva je tenká (1 – 3 mm) a jej štruktúra je tvorená martenzitom a zbytkovým austenitom. Po zakalení môžu v súčasti vznikajú značné pnutia, preto po kalení nasleduje popúšťanie za nízkych teplôt. [12]

6.4 Zušľachtovanie

Zušľachtovanie oceli je martenzitické kalenie s následným popúšťaním na teplotu 350 – 650 °C, pri ktorej sa pôvodný martenzit rozpadá na tzv. prechodové štruktúry- troostit, osmondit, sorbit čo je veľmi jemný perlit a ferit. Je to veľmi časté tepelné spracovanie súčastí. [12]

7 SPRACOVANIE VÝSLEDKOV

Namerané hodnoty tvrdosti boli zapísané do tabuliek a bol z nich aritmetický priemer, smerodajná odchýlka a stredná kvadratická chyba. Pri vyhodnocovaní dát boli použité tieto vzťahy:

Aritmetický priemer:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

Smerodajná odchýlka:

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2} \quad (16)$$

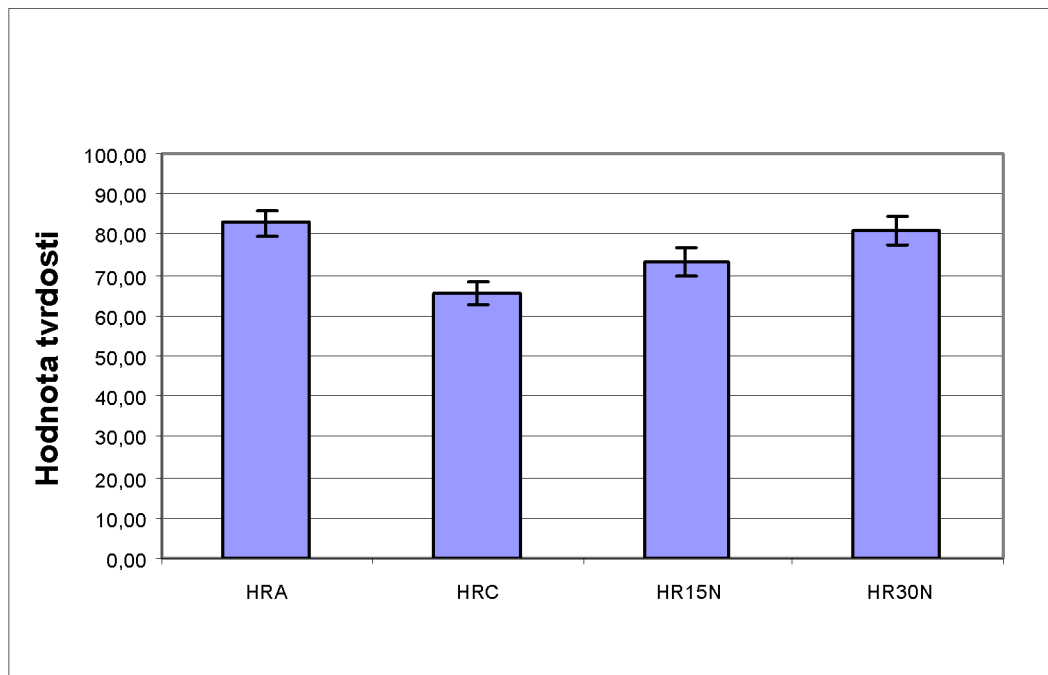
Stredná kvadratická chyba:

$$\delta = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

7.1 Oceľ 14 220 cementovaná

Tab.11. Oceľ 14 220 cementovaná

Oceľ 14 220 cementovaná				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
\bar{x}	82,77	65,54	72,95	81,00
s	3,21	3,02	3,57	3,76
δ	0,59	0,55	0,65	0,69



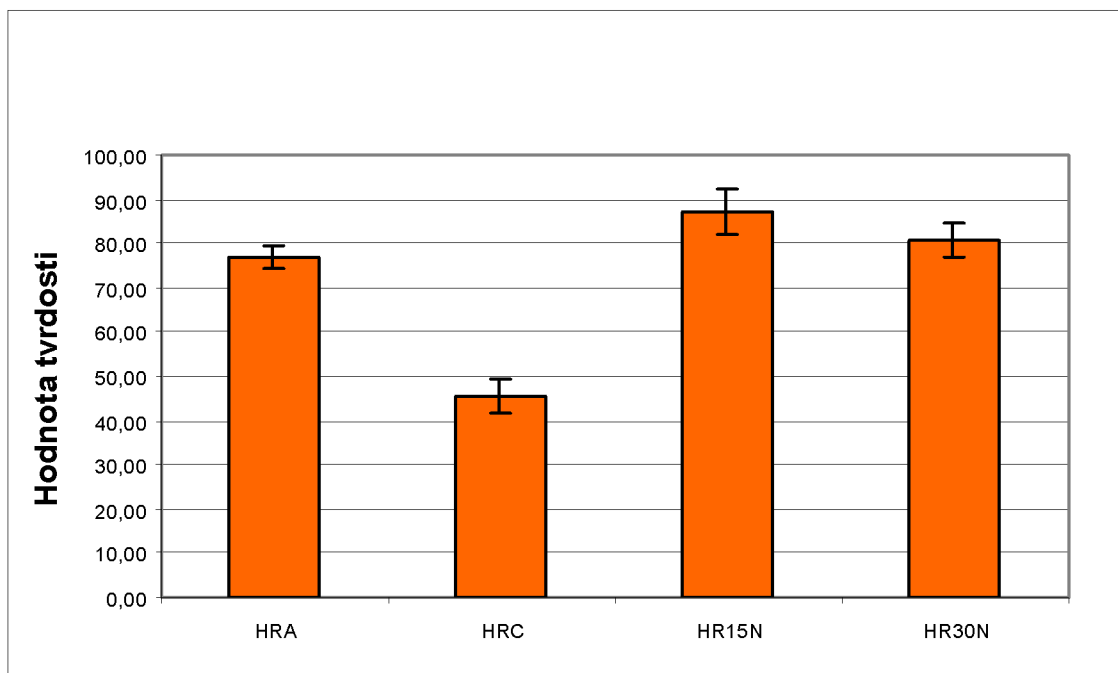
Obr.24. Tvrdość cementovanej oceľi 14 220

Z výsledkov skúšky tvrdosti vyplynulo, že najväčšia tvrdosť bola nameraná metódou HRA a to 82,77 HRA, naopak najnižšia tvrdosť bola zistená metódou HRC a to 65,54 HRC, ako je zrejmé z Tab.11. a Obr.24.

7.2 Oceľ 11 353 cementovaná

Tab.12. Oceľ 11 353 cementovaná

Oceľ 11 353 cementovaná				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
\bar{x}	77,03	45,55	86,99	80,85
s	2,41	4,07	5,20	3,70
δ	0,44	0,74	0,95	0,68



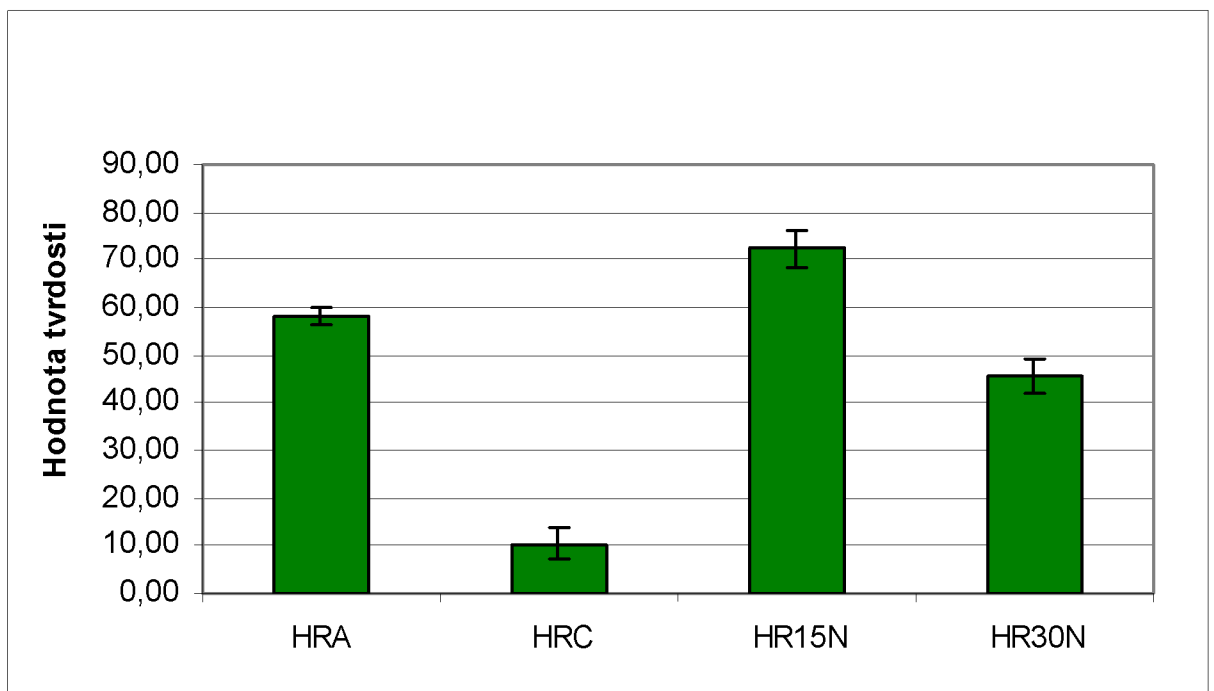
Obr.25. Tvrdosť cementovanej oceľi 11 353

Pri skúške tvrdosti bola najmenšia tvrdosť nameraná metódou HRC (45,55 HRC) a najväčšia tvrdosť bola zistená metódou HR15N (86,99 HR15N), ako je vidieť v Tab.12. a na Obr.25.

7.3 Ocel' 11 353 nitrídovaná

Tab.13. Ocel' 11 353 nitrídovaná

Ocel' 11 353 nitrídovaná				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
\bar{x}	58,33	10,48	72,32	45,72
s	1,96	3,29	3,70	3,75
δ	0,36	0,60	0,68	0,68



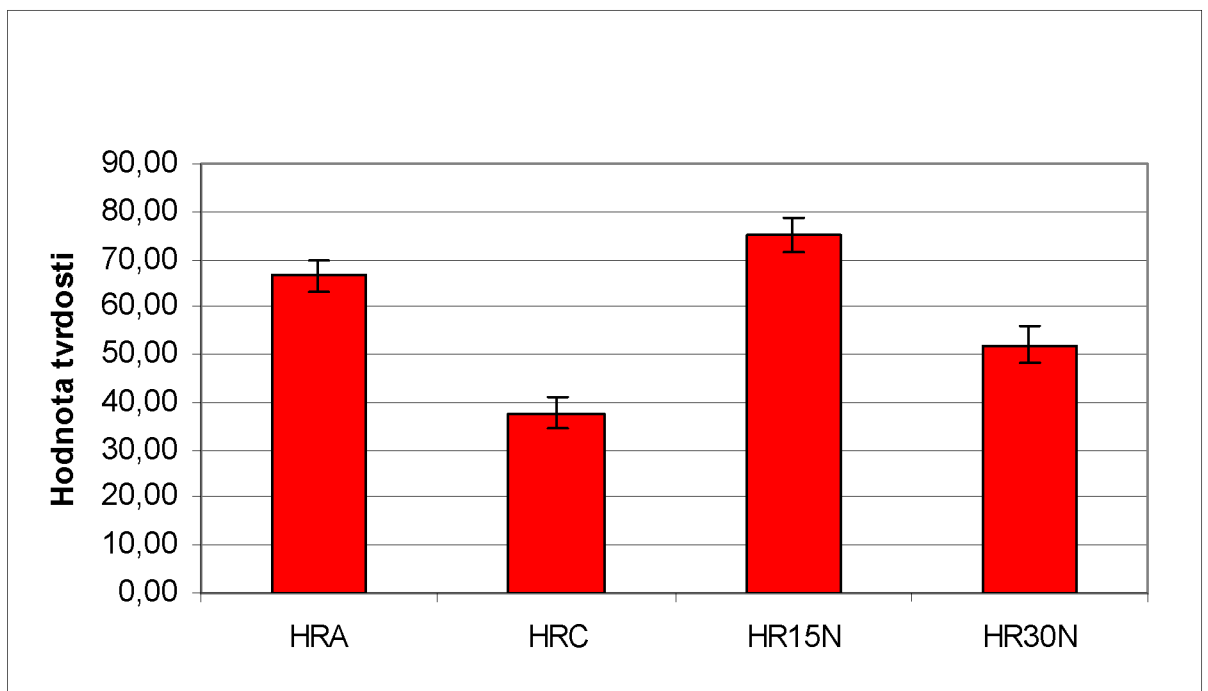
Obr. 26. Tvrdość nitrídovanej oceli 11 353

Pri skúške tvrdosti nitrídovanej oceli bolo zistené, že najmenšia tvrdosť bola nameraná metódou HRC a to 10,48 HRC a najväčšia tvrdosť bola nameraná metódou HR15N a to 72,32 HR15N, čo je zrejmé z Tab.13. a Obr.26.

7.4 Oceľ 12 060 povrchovo kalená

Tab.14. Oceľ 12 060 povrchovo kalená

Oceľ 12 060 povrchovo kalená				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
\bar{x}	66,49	37,82	75,21	52,15
s	3,28	3,07	3,67	3,93
δ	0,60	0,56	0,67	0,72



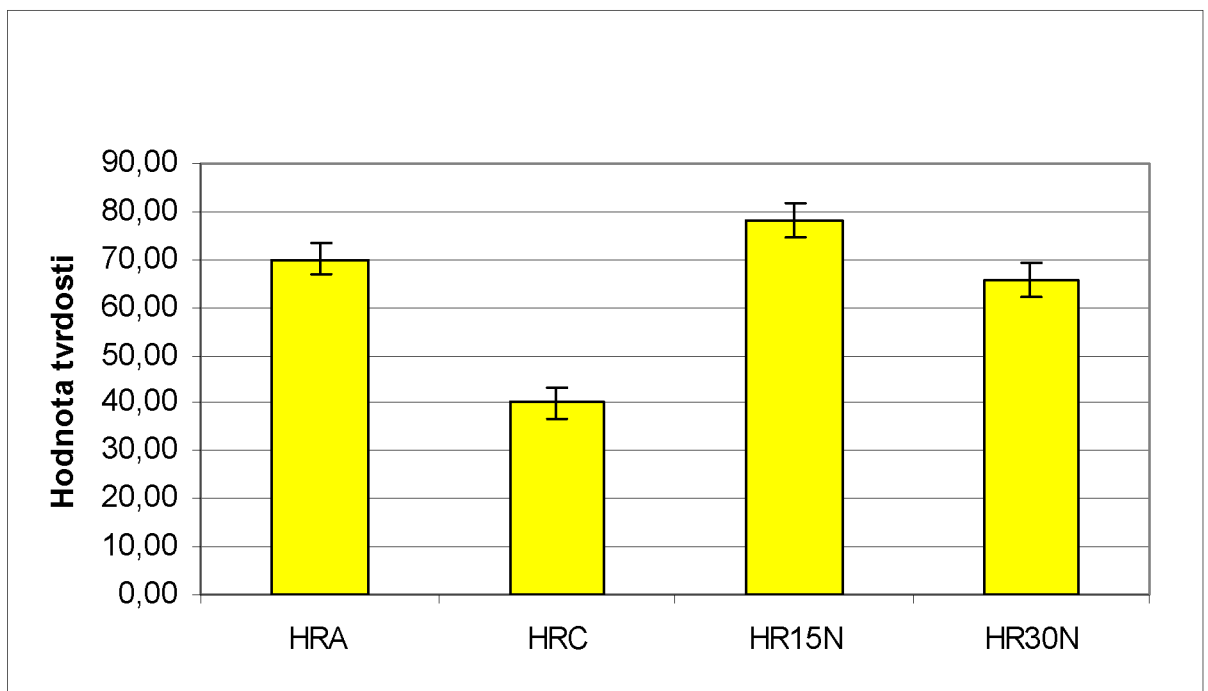
Obr. 27. Tvrdosť povrchovo kalenej oceľi 12 060

Pri meraní tvrdosti povrchovo kalenej oceľi vyšlo najavo, že daná vzorka dosahuje najväčšiu hodnotu tvrdosti metódou HR15N (75,12 HR15N) a naopak najmenšia nameraná tvrdosť bola zistená metódou HRC (37,82 HRC), čo je zobrazené v Tab.14. a na Obr.27.

7.5 Oceľ 12 060 kalená

Tab.15. Oceľ 12 060 kalená

Oceľ 12 060 kalená				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
\bar{x}	69,96	40,12	78,44	65,65
s	3,31	3,30	3,55	3,72
δ	0,60	0,60	0,65	0,68



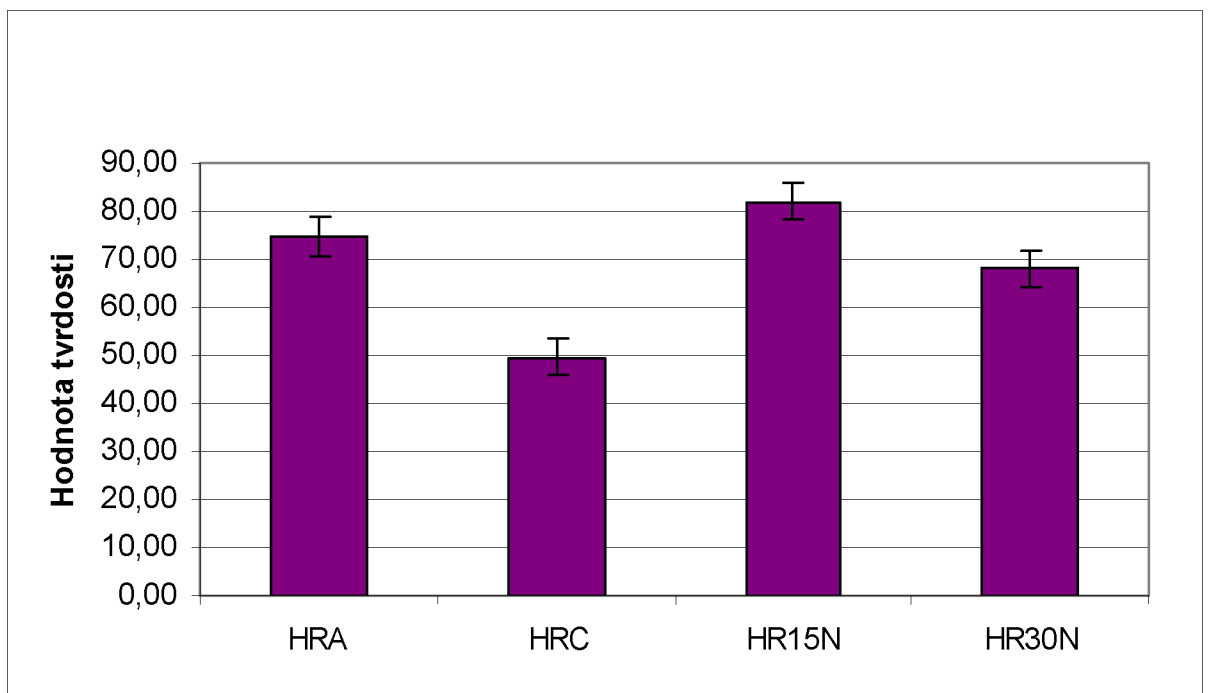
Obr. 28. Tvrdosť kalenej oceľi 12 060

Meranie tvrdosti ukázalo, že najmenšia hodnota tvrdosti bola nameraná metódou HRC (40,12 HRC) a najväčšia hodnota metódou HR15N (78,44 HR15N), čo je zrejmé z Tab.15. a Obr.28.

7.6 Oceľ tepelne spracovaná

Tab.16. Oceľ tepelne spracovaná

Oceľ tepelne spracovaná				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
\bar{x}	74,77	49,51	81,97	68,12
s	4,00	3,81	3,67	3,79
δ	0,73	0,70	0,67	0,69



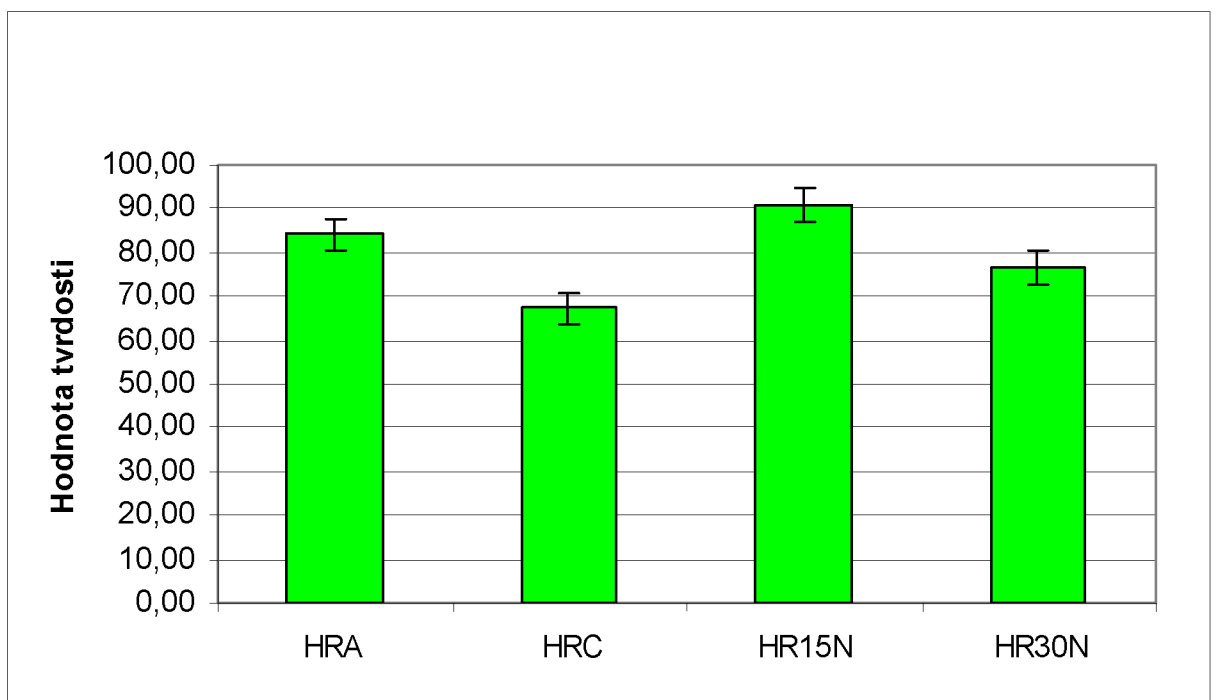
Obr. 29. Tvrdosť tepelne spracovanej oceľi

Ako je vidieť v Tab.16. a na Obr.29., najväčšia tvrdosť bola nameraná metódou HR15N a to 81,97 HR15N a naopak najmenšia hodnota tvrdosti bola zistená metódou HRC (49,51 HRC)

7.7 Oceľ 12 060 cementovaná

Tab.17. Oceľ 12 060 cementovaná

Oceľ 12 060 Cementovaná				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
X	84,18	67,25	90,79	76,56
s	3,36	3,64	3,90	3,76
δ	0,61	0,66	0,71	0,69



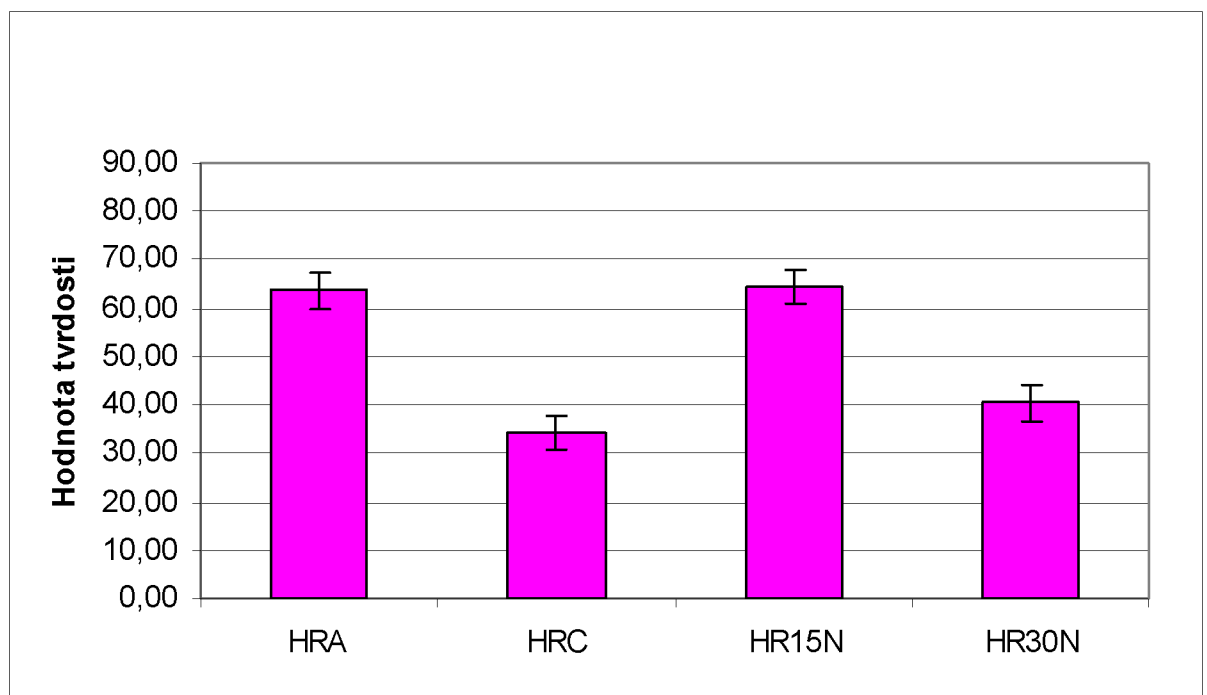
Obr. 30. Tvrdosť cementovanej oceli 12 060

Z výsledkov merania tvrdosti je zrejmé, že daná vzorka dosahuje najmenších hodnôt tvrdosti metódou HRC (64,25 HRC) a najväčších hodnou metódou HR15N (90,79 HR15N) ako je zrejmé z Tab.17. a Obr.30.

7.8 Ocel' zušľachtená

Tab.18. Ocel' zušľachtená

Ocel' zušľachtená				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
X	63,58	34,10	64,45	40,52
s	3,61	3,50	3,30	3,76
δ	0,66	0,64	0,60	0,69



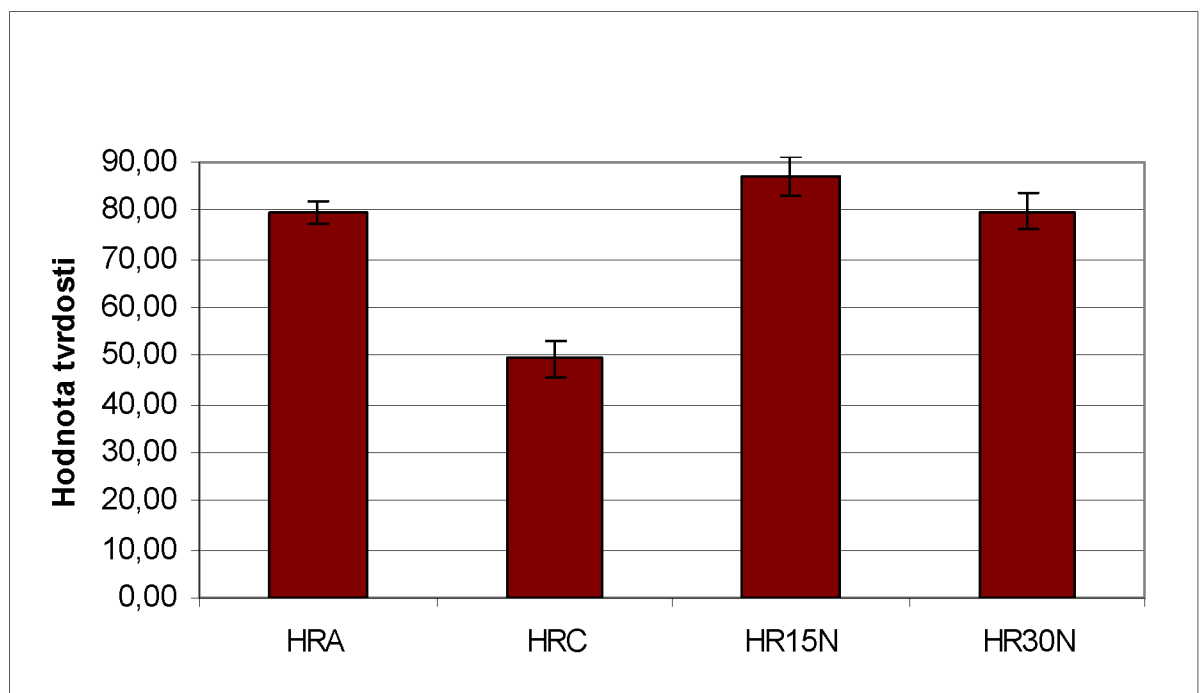
Obr. 31. Tvrdošť zušľachtenej ocele

Z výsledkov skúšky tvrdosti vyplynulo, že najväčšia tvrdosť bola nameraná metódou HR15N a to 64,45 HR15N, naopak najnižšia tvrdosť bola zistená metódou HRC a to 30,10 HRC, ako je zrejmé z Tab.18. a Obr.31.

7.9 Oceľ nitrídovaná

Tab.19. Oceľ nitrídovaná

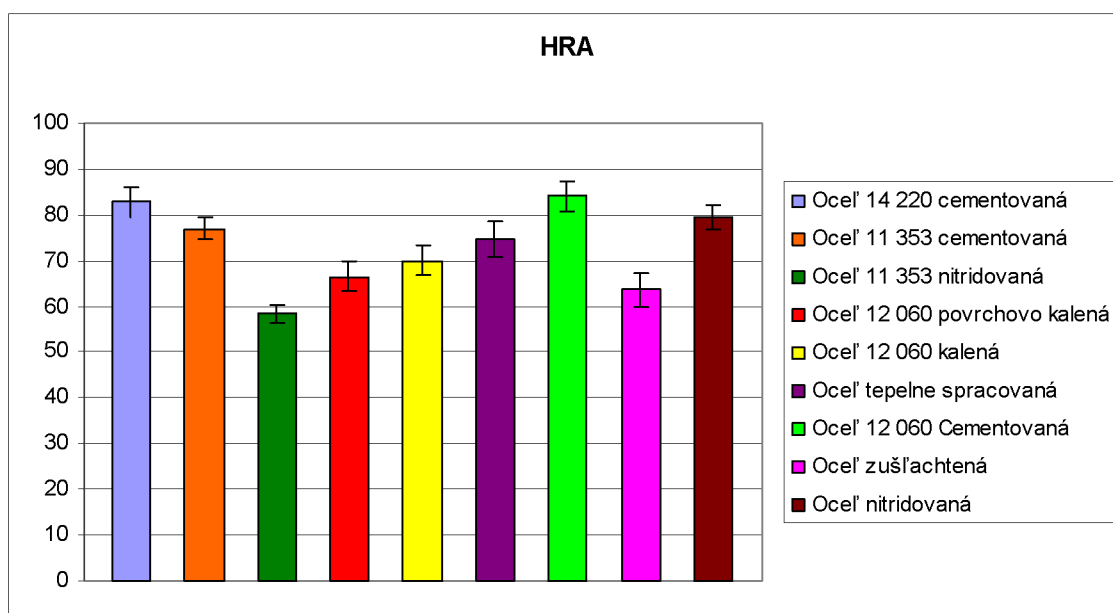
Oceľ nitrídovaná				
č.m	Metoda merania			
	HRA	HRC	HR15N	HR30N
X	79,55	49,34	87,15	79,67
s	2,53	3,55	3,89	3,80
δ	0,46	0,65	0,71	0,69



Obr. 32. Tvrdosť nitrídovanej oceľi

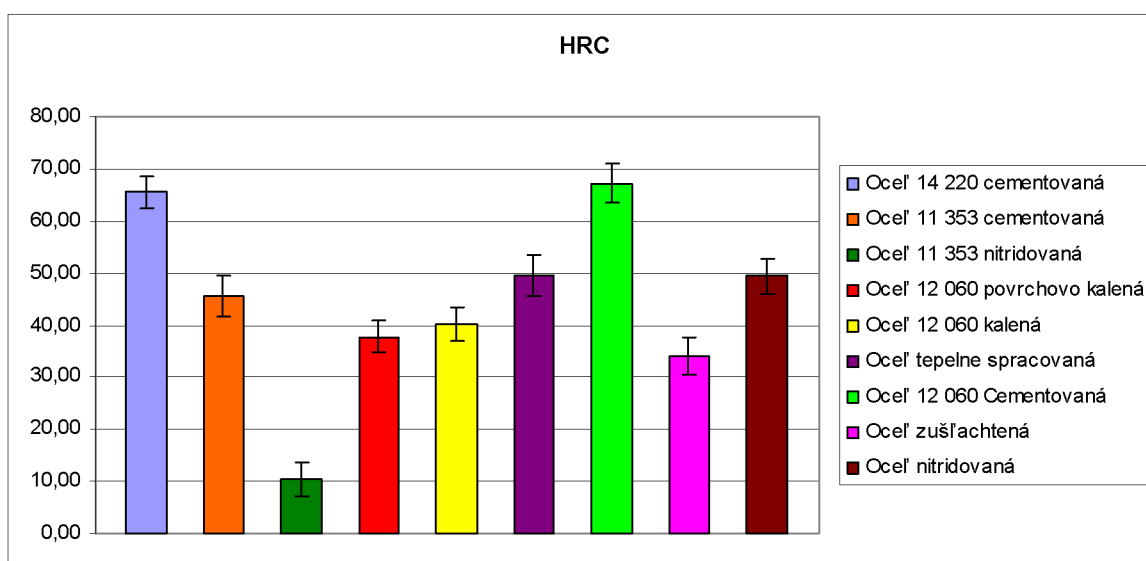
Pri skúške tvrdosti bola najmenšia tvrdosť nameraná metódou HRC (49,34 HRC) a najväčšia tvrdosť bola zistená metódou HR15N (87,15 HR15N), ako je vidieť v Tab.119. a na Obr.32.

8 DISKUSIA VÝSLEDKOV



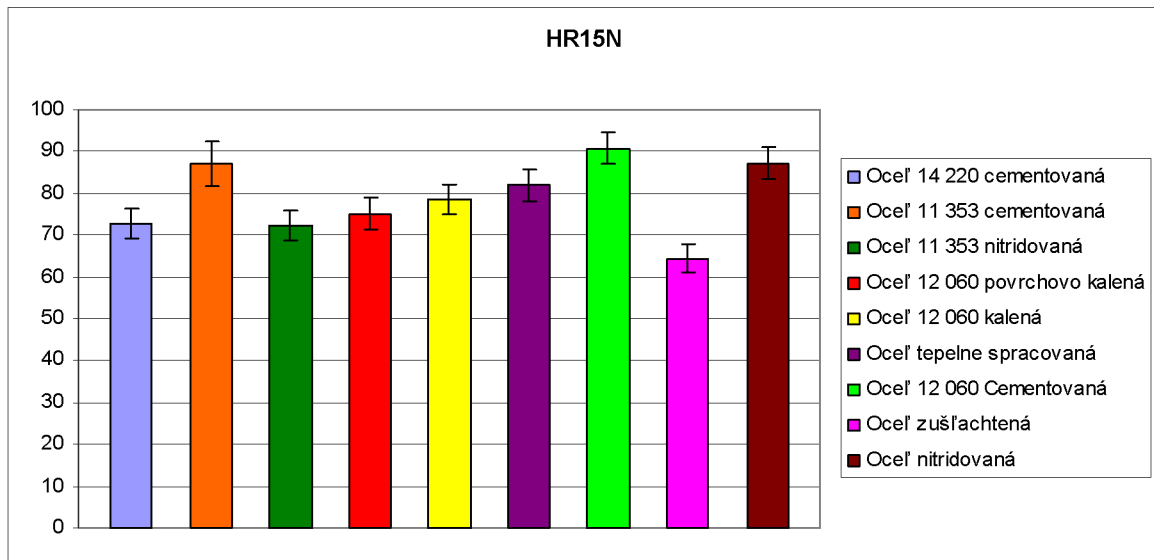
Obr.33. Tvrdosť meraná metódou HRA

Meranie metódou HRA ukázalo, že najmenšia hodnota tvrdosti bola nameraná u nitrídovanej oceli 11 353. Zrejme to bolo spôsobené tým, že indentor prenikol cez chemicko-tepelne spracovanú vrstvu až do základného materiálu. Väčšie hodnoty tvrdosti boli namerané u tepelne spracovaných oceli (kalených, zušľachtených) a najväčšiu tvrdosť vykazovali cementované ocele, ako je vidieť na Obr.33.



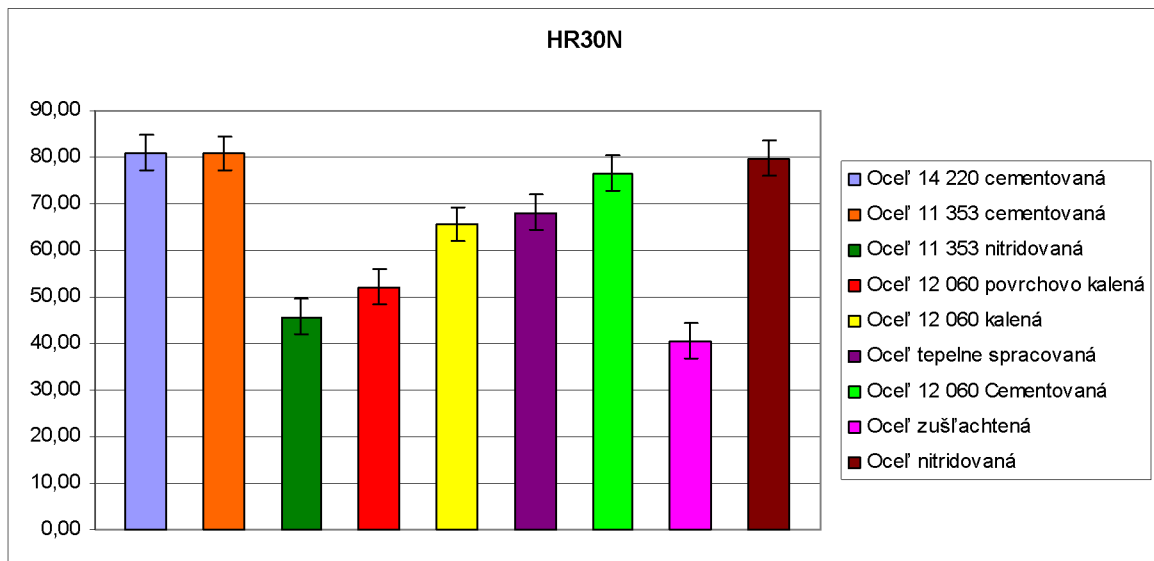
Obr.34. Tvrdosť meraná metódou HRC

Pomocou metódy HRC bolo zistené, že najväčšiu tvrdosť dosahujú cementované ocele. Nižšie hodnoty boli zistené u tepelne spracovaných oceli. A najmenšia tvrdosť bola zistená u nitrídovanej oceli 11 353, u ktorej bola veľmi tenká nitrídačná vrstva a pri použití veľkého zaťaženia indentor prenikol cez túto vrstvu až do základného materiálu (Obr.34.)



Obr.35. Tvrdosť meraná metódou HR15N

Pri metóde HR15N boli namerané pomerne veľké tvrdosti. Je to spôsobené tým, že pri tejto metóde sa používajú menšie zaťažujúce sily. Lepšie výsledky vykazovala aj nitrídovaná oceľ 11 353 z dôvodu, že pri použití menších zaťažujúcich síl indentor neprenikol cez nitrídovú vrstvu. Najvyššie tvrdosti boli namerané u chemicko-tepelne spracovaných ocelí (cementovaných, nitrídovaných). Vysoká tvrdosť bola nameraná pri tepelne spracovaných oceliach. Najnižšia tvrdosť bola zistená u zušľachtenej oceli ako je vidieť na Obr. 35.



Obr.36. Tvrdosť meraná metódou HR30N

Ako vidieť na Obr.35., najväčšiu tvrdosť dosahujú chemicko-tepelne spracované ocele, nižšia tvrdosť bola zistená u tepelne spracovaných oceli a najnižšia tvrdosť bola nameraná u zušľachtenej oceli. Nižšiu tvrdosť dosahuje aj nitridovaná ocel 11 353 a preto môžeme predpokladať, že nitridovaná vrstva je veľmi tenká. (Obr.36)

ZÁVĚR

Predložená bakalárska práca sa zaoberá meraním tvrdosti vybraných typov ocelí, ktoré boli tepelne alebo chemicko-tepelne spracované. U vybraných typov skúšobných vzoriek boli realizované merania tvrdosti metódami HRA, HRC, HR15N, HR30N. Meranie na každom vzorku boli opakovaná 30-krát. Namerané hodnoty boli graficky znázornené a vyhodnotené.

Zo získaných výsledkov merania vyplynulo, že najväčšie hodnoty tvrdosti boli namerané metódami HRA a HR15N. Naopak najmenšie hodnoty boli namerané metódou HRC.

Čo sa týka tepelného a chemicko-tepelného spracovania ocelí, boli najväčšie hodnoty tvrdosti namerané u cementovanej a nitridovanej vrstve. Najmenšie hodnoty boli namerané u zušľachtenej vzorky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TILLOVÁ,E.-BELAN,J.: *Skúšky tvrdosti, predľad základných metód merania tvrdosti*. Považská Bystrica, 2010
- [2] VELES,P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, Alfa Bratislava, 1985
- [3] ZÁBAVNÍK,V.-BURŠÁK,M.: *Materiál, tepelné spracovanie, kontrola kvality*, Tlač-Emilena, 2004
- [4] MATNET, [online]. 2006 [cit 2011-01-04]. Dostupné z: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531>>
- [5] Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2011-01-04]. Dostupné z: <www.ime.fme.vutbr.cz/>
- [6] METROTEST, s.r.o. Kladno. [online]. 2010 [cit. 2011-01-04]. Dostupné z: <http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrlosti.pdf>
- [7] GORDON ENGLAND, [online]. [cit 2011-01-04]. Dostupné z: <<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>>
- [8] FODOR, [online]. 1997 [cit 2011-01-01]. Dostupné z: <<http://www.fodor.sk/spectrum/nerasty.htm>>
- [9] CONVERTER, [online]. 2002 [cit. 2011-01-01]. Dostupné z: <<http://www.converter.cz>>
- [10] QUIDO, [online]. 2005 [cit 2011-01-01]. Dostupné z: <<http://www.quido.cz>>
- [11] SKOČOVSKÝ,P.-BOKŮVKA,O.-KONEČNÁ,R.-TILLOVÁ,E.: *Náuka o materiály pre obory strojnícke*, EDIS Žilina, 2001
- [12] ŠAŠINKA, R.: *Měření tvrdosti kovů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010
- [13] TEPELNÉ SPRACOVANIE KOVOV, [online]. 2009 [cit. 2011-04-11]. Dostupné z: <<http://www.htsbb.eu/de/kalennie.pdf>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	Celkové zaťaženie
H	Hĺbka vtlačku
D	Priemer guľôčky
d	Priemer vtlačku príp. dĺžka uhlopriečky
S	Plocha vtlačku
t	Čas
d_1	Dĺžka uhlopriečky
d_2	Dĺžka uhlopriečky
$d_{1,2}$	Aritmetický priemer uhlopriečok d_1 a d_2
m	Hmotnosť
F_0	Predbežné zaťaženie
F_1	Prídavné zaťaženie
A	Merná deformačná práca
W	Spotrebovaná práca
V	Objem vtlačku
H	Výška stupnice
α	Uhol spustenia skúšobného telieska
β	Uhol odrazu skúšobného telieska
r	Polomer
\bar{x}	Aritmetický priemer
s	Smerodajná odchýlka
δ	Stredná kvadratická chyba
n	Počet meraní

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1 Skúšky tvrdosti.....	16
Obr.2. Princíp skúšky podľa Brinella.....	17
Obr.3. Meranie vtlačkov-Brinell.....	20
Obr.4.Priebeh skúšobného zaťaženia-Brinell	21
Obr.5. Závislosť Brinellovej tvrdosti na veľkosti zaťažujúcej sily.....	22
Obr.6. Schéma tvrdomeru Brinell.....	25
Obr.7. Princíp skúšky podľa Vickersa.....	25
Obr.8.Schéma skúšky podľa Vickersa.....	27
Obr.9. Meranie vtlačkov- Vickers.....	29
Obr.10.Priebeh skúšobného zaťaženia-Vickers.....	29
Obr.11. Schéma tvrdomeru Vickers	31
Obr.12. Princíp skúšky podľa Rockwella	32
Obr.13.Priebeh skúšobného zaťaženia-Rockwell	35
Obr.14. Schéma tvrdomeru Rockwell.....	38
Obr.15. Princíp skúšky podľa Knoopa	39
Obr.16. Tvar indentoru pri Knoopovej skúške.....	39
Obr.17.Dynamické skúšky tvrdosti.....	42
Obr.18. Poldi kladívko.....	45
Obr.19. Shoreov skleroskop	46
Obr.20. Duroskop.....	47
Obr.21. Schéma metódy.....	52
Obr.22. Použité meracie zariadenie.....	53
Obr.23. Meracia hlava.....	53
Obr.24. Tvrdosť cementovanej oceli 14 220.....	57
Obr.25. Tvrdosť cementovanej oceli 11 353.....	58
Obr. 26. Tvrdosť nitridovanej oceli 11 353	59
Obr. 27. Tvrdosť povrchovo kalenej oceli 12 060	60
Obr. 28. Tvrdosť kalenej oceli12 060.....	61
Obr. 29. Tvrdosť tepelne spracovanej oceli	62
Obr. 30. Tvrdosť cementovanej oceli 12 060.....	63
Obr. 31. Tvrdosť zušľachtenej ocele	64

Obr. 32. Tvrdost' nitridovanej oceli	65
Obr.33. Tvrdost' meraná metódou HRA.....	66
Obr.34. Tvrdost' meraná metódou HRC.....	66
Obr.35. Tvrdost' meraná metódou HR15N.....	67
Obr.36. Tvrdost' meraná metódou HR30N.....	68

SEZNAM TABULEK

Tab.1. Hodnoty zaťaženia pre rôzne podmienky skúšania- Brinell	18
Tab.2. Hodnoty pomeru zaťaženia a priemeru guľôčky pre rôzne materiály- Brinell	19
Tab.3. Hodnoty konštanty k pre materiály rôznej tvrdosti- Brinell	23
Tab.4. Veľkosť zaťažujúcej sily pre hodnoty k a priemery guľôčky D- Brinell.....	23
Tab.5. Meranie podľa Vickersa.....	26
Tab.6. Rozsah skúšobných zaťažení- Vickers.....	27
Tab.7. Stupnice tvrdosti podľa Rockwella.....	33
Tab.8. Spôsob výpočtu tvrdosti podľa Rackwella	34
Tab.9. Mohsova stupnica tvrdosti	41
Tab.10. Použité metódy a normy.....	51
Tab.11. Oceľ 14 220 cementovaná.....	57
Tab.12. Oceľ 11 353 cementovaná.....	58
Tab.13. Oceľ 11 353 nitridovaná	59
Tab.14. Oceľ 12 060 povrchovo kalená	60
Tab.15. Oceľ 12 060 kalená.....	61
Tab.16. Oceľ tepelne spracovaná	62
Tab.17. Oceľ 12 060 cementovaná.....	63
Tab.18. Oceľ zušľachtená	64
Tab.19. Oceľ nitridovaná	65