

Ověření vlastností školního tvrdoměru Meopta Poldi-Vickers

Petr Vojvodík

Bakalářská práce
2007

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

nascannované zadání s. 2

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá ověřením vlastností školního tvrdoměru Poldi-Vickers. Teoretická část práce se zabývá metodami měření tvrdosti a seznamuje s jednotlivými přístroji pro měření tvrdosti. V praktické části dochází ke zpracování naměřených hodnot. Výsledky jsou statisticky vyhodnoceny a srovnány s hodnotami etanolu.

Klíčová slova: Bakalářská práce, zkouška tvrdosti, tvrdost HV

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with quality atestation of scholastik impact hamer Poldi-Vickers. Theoretical part is engaged to hardness and introduces several instruments for measuring hardness. Practical part is egnaged to process measured values. Results are statistically analysed and compared with etalon values.

Keywords: Bachelor thesis, hardness test, hardness HV

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Josefovi Hrdinovi za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytoval v průběhu vypracování celé bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 28.5.2007

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 TVRDOST MATERIÁLU	10
1.1 MIKROTVRDOST	10
1.2 NANOTVRDOST.....	11
2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	13
3 ZKOUŠKY TVRDOSTI	14
3.1 STATICKE ZKOUŠKY.....	14
3.1.1 Zkouška podle Brinella	14
3.1.2 Zkouška podle Rockwella	15
3.1.3 Zkouška podle Vickerse	16
3.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY	17
3.2.1 Tvrdoměr Poldi (Poldi kladívko)	17
3.2.2 Baumannovo kladívko.....	18
3.2.3 Duroskop	18
3.2.4 Shoreho skleroskop	18
4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKY TVRDOSTI	19
4.1 SCHEMA PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ TVRDOSTI PODLE BRINELLA	19
4.2 SCHEMA PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA.....	20
4.3 POLDI Kladívko	21
4.4 BAUMANNOVO Kladívko.....	22
4.5 DUROSKOP	23
4.6 SHOREHO SKLEROSKOP	23
5 MODERNÍ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ TVRDOSTI	25
5.1 STOLNÍ TVRDOMĚRY.....	25
5.2 PŘENOSNÉ TVRDOMĚRY	26
5.3 TVRDOMĚRY PRO MĚŘENÍ TVRDOSTI NEKOVÝCH MATERIÁLŮ.....	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	28
6 OVĚŘOVÁNÍ A KALIBRACE ZKUŠEBNÍCH STROJŮ	29
6.1 SCHÉMA PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ TVRDOSTI PODLE VICKERSE	29
6.2 PŘÍMÉ OVĚŘOVÁNÍ	30
6.3 NEPŘÍMÉ OVĚŘOVÁNÍ.....	31
7 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TVRDOMĚRU POLDI VICKERS	33

7.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESO	33
7.2	PROVEDENÍ ZKOUŠKY	33
7.3	SYMBOLY A OZNAČENÍ	34
7.3.1	Zápis hodnoty tvrdosti	35
7.4	PŘEHLED MOŽNÝCH CHYB PŘI MĚŘENÍ TVRDOSTI METODOU VICKERS	35
8	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	37
8.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY	37
8.2	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY	38
8.3	GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ STATISTICKÉHO SOUBORU	40
8.4	POROVNÁNÍ HODNOT	41
	ZÁVĚR	42
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44
	SEZNAM OBRÁZKŮ	45
	SEZNAM TABULEK	46

ÚVOD

Člověk zkoumá vlastnosti předmětů, se kterými přichází do styku, zajímá ho jejich velikost, tvar, drsnost a samozřejmě také tvrdost, kterou zjišťuje hmatem. To, co vlastní silou nestačí deformovat, subjektivně považuje za tvrdé. S postupem času význam tvrdosti nabýval na významu a v současnosti je tvrdost jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností charakterizujících materiál. S určitým omezením lze podle tvrdosti posuzovat chování materiálu při jiném způsobu namáhání. Pro konstrukční materiály má jejich tvrdost obrovský technický i praktický význam. Bohužel je však obtížné tvrdost přesně a jednoduše popsat, protože závisí na komplexních vlastnostech zkoušeného vzorku a také na zkušebních podmínkách, při kterých je měření prováděno.

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

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVRDOST MATERIÁLU

Tvrlost lze definovat jako odolnost materiálu proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. Mírou tvrdosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace.

Jeden z nejstarších způsobů zkoušení tvrdosti realizoval v roce 1722 Reamur pomocí tyče s proměnlivou tvrdostí od jednoho konce k druhému, přičemž hodnota tvrdosti byla určována podle polohy vrypu, kterou zkoušený materiál na měrné tyči zanechal. Dalším stupínkem ve vývoji měření tvrdosti byla známá Mohsova stupnice (v roce 1822) relativní povrchové tvrdosti, která zahrnovala deset minerálů, v rozsahu od 1 do 10. Autorem vrypové zkoušky je Martens. Ta spočívala v tažení raménka opatřeného diamantovým hrotem (s vrcholovým úhlem 90°) po vyleštěném povrchu zkušební vzorku a měření šířky výsledného vrypu. Číslem tvrdosti bylo aplikované zatížení, které na povrchu vzorku vytvořilo vryp široký 0,1 mm. Výhodou byla možnost využít jediného záznamu k měření relativní tvrdosti různých fází a složek obsažených v mikrostruktuře včetně změn tvrdosti na hranicích zrn. Kvantitativní měření tvrdosti bylo postupně rozvíjeno až do dnešní doby, kdy jsme schopni hodnotit tvrdost pomocí přesně daných podmínek měření, což umožňuje řadu aplikací.

1.1 Mikrotvrlost

V tomto případě je měření tvrdosti realizováno vtlačováním diamantového tělesa tvaru Vickersova nebo Knoopova jehlanu do povrchu měřeného tělesa silami v rozsahu od 1g (0,09807 N) do 1000g (9,807 N). Zatímco běžné zkoušky (makro) tvrdosti podle Vickerse jsou prováděny při zatíženích mezi 10 a 1200 N, první použití sil nižších než 10 N se datuje do roku 1932, kdy byly tyto zkoušky provedeny v National Physical Laboratory ve velké Británii. S klesajícími aplikovanými silami (se zmenšující se velikostí vtisku) při měření tvrdosti přesnost měření klesá. Navíc s klesající zátěžnou silou do oblasti mikrotvrlosti již není Vickersova tvrdost (jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisků u hodnot makrotvrlosti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení.

Protože vtisky při zkoušení mikrotvrlosti jsou malé, je použití této metody vhodné pro:

- malé nebo tenké součásti,
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušební vzorku,

- měření mikrotvrdomosti strukturních složek a fází,
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování,
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků,
- hodnocení svarových spojů,
- pro hodnocení oduhlíčujících procesů,
- studium difúzních pochodů,
- měření křehkých materiálů.

1.2 Nanotvrdomost

Při dalším snižování zátěžných sil se dostáváme do oblasti tzv. nanotvrdomosti, kde měření tvrdosti se provádí pomocí instrumentované zkoušky umožňující získat závislost velikosti působícího zatížení a hloubky vtisku. Jedná se o velmi malá zatížení velikosti až 1 nN, kde hloubky vtisků se mohou pohybovat v hodnotách 0,1 nm.

Záznam závislosti zatížení a hloubky vtisku je využíván při měření velmi tenkých vrstev, povlaků, filmů, a také strukturních složek ve slitinách. V řadě případů je získaný záznam využíván k měření dalších mechanických veličin, např. základních mechanických vlastností včetně modulu pružnosti v tahu, lomové houževnatosti křehkých materiálů atd.

Při měření nanotvrdomosti se používá řada vnikajících tělísek vyrobených z různých materiálů, nejčastějším materiálem je diamant vzhledem k jeho tvrdosti a vysokému modulu pružnosti, což významně snižuje vliv deformace indentoru na výsledky měření. Jako vnikající těleso se v oblasti nanotvrdomosti přednostně používá trojboký jehlan podle Berkoviche, který zachovává stejný poměr hloubky a plochy vtisku jako Vickersův jehlan, ale oproti jehlanu podle Vickerse (který je zakončen krátkým – u nejlepších hrotů jen cca 0,5 mikron dlouhým, příčným ostřím) má výhodu v možnosti vybrousit jeho špičku do bodu a zachovat tak geometrickou podobnost různě velkých a tedy i těch nejmenších vtisků. Jiným používaným indentorem je kulička, která oproti Berkovichovu vnikajícímu tělesu má výhodu postupného nárůstu zatížení nejprve v rozsahu elastických deformací a umožňuje tak identifikovat přechod od elastických k plastickým deformacím a vyhodnotit mez kluzu a zpevňování materiálu. Problémy s výrobou kulových indentorů pro měření nanotvrdomosti z tvrdých ma-

teriálů jsou příčinou, proč je v oblasti nanotvrlosti přednostně používána Berkovichova metoda.

2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Při mechanických zkouškách se vytváří v materiálu určité napětí, které se stupňuje až do porušení zkušební vzorku. Mechanickými zkouškami získáváme podklady, které jsou důležité pro ověření mechanických vlastností dodávaného materiálu. Ke zkouškám používáme zvláštní zkušební zařízení a zkoušky provádíme jednotným způsobem, předepsaným normou.

Mechanické zkoušky poskytují nejdůležitější hodnoty pro použití materiálu v konstrukci technologických zařízení, které musí odolávat při zatížení vnějšími silami základním druhům namáhání (tahem, tlakem, ohybem, kroucením, rázem). Jsou to převážně zkoušky destrukční, při nichž se zkoušený materiál namáhá až do porušení (přetržení, zlomení apod.). Proto se mohou provádět jen na zkušebních vzorcích (zkušebních tělesech), jejichž tvar je normalizován. Zhotovují se buď ze zkušební surového materiálu (tyče, profily, plochy) nebo z nejnámáhanějšího místa dané součásti. Někdy se zkouší podskupiny strojního zařízení, v letectví např. celý trup s křídly, což jsou zkoušky nákladné, avšak z hlediska bezpečnosti nezbytné [2]. Běžné zkoušení materiálů se provádí v laboratořích na speciálních zkušebních strojích, které v daných možnostech imitují aspoň některé druhy skutečných zatížení součástí v provozu.

Mechanické zkoušky lze rozdělit podle různých hledisek (způsobu zatěžování, fyzikální podmínky, stav napjatosti). Nejčastěji je dělíme na zkoušky statické (pomalu narůstající síla příp. síla stálé velikosti) a zkoušky dynamické (síla je v čase proměnná nebo působí rázem). Statické zkoušky určují chování (hlavně deformaci) materiálu při zatěžování zkušební tělesa klidným zatížením a spojitou pomalou změnou tohoto zatížení. Síla vyvolává deformaci, která většinou vede až k porušení vzorku. Zkoušky statické imitují v praxi nejčastěji se objevující druhy namáhání tj. tah, tlak, ohyb, krut, střih. Mezi základní zkoušky pro hodnocení mechanických vlastností patří zkouška tahem. Zkoušky tlakem a ohybem jsou méně univerzální. [1]

3 ZKOUŠKY TVRDOSTI

Zkoušky tvrdosti patří mezi nejstarší a nejrozšířenější zkoušky kovů a jiných technických materiálů (vývoj metod již téměř přes 200 let). Jedná se prakticky o zkoušky nedestruktivní, neboť funkční a vzhledové porušení zkoušených dílů je většinou bezvýznamné.

Základní zkoušky, které jsou dnes k měření tvrdosti používány, je možno dělit podle několika hlavních hledisek:

- a) podle principu zkoušky:
 - vtiskové,
 - vrypové,
 - odrazové,
 - kyvadlové.
- b) podle rychlosti působení zatěžující síly:
 - statické,
 - dynamické.

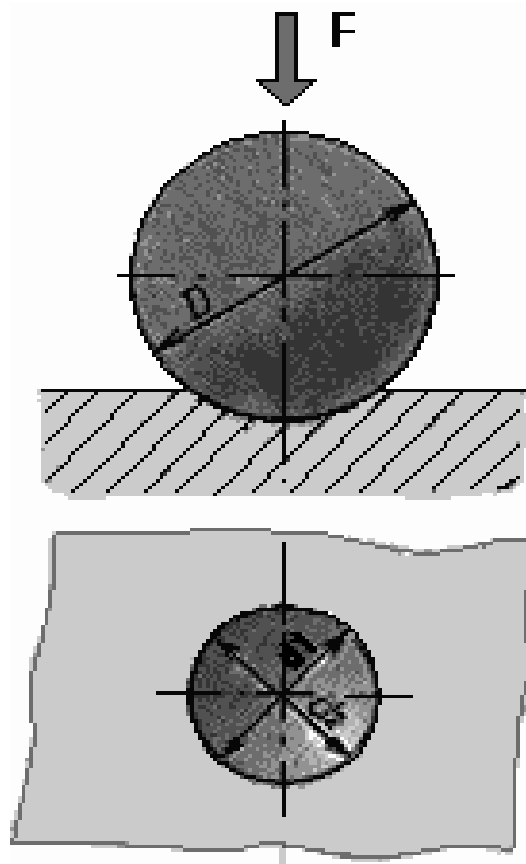
3.1 Statické zkoušky

V laboratorních přístrojích je vnikací tělísko do zkoušeného materiálu vtlačováno staticky působící silou, výsledky měření jsou velmi přesné.

3.1.1 Zkouška podle Brinella

Autorem této metody je švédský inženýr J. A. Brinell. Metoda byla poprvé představena v roce 1900 na 2. mezinárodním kongresu o zkoušení materiálů. Ujala se a dnes je nejrozšířenější zkouškou tvrdosti na světě. Je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Zkouší se poměrně velký objem kovu, čímž získáme průměrnou hodnotu tvrdosti celé struktury materiálu.

Princip metody spočívá v zatlačování vnikacího tělesa, kalené ocelové kuličky (metoda HBS) nebo kuličky z tvrdokovu (metoda HBW) o průměru D , do povrchu zkoušeného tělesa silou F . Po odlehčení se určí průměr vtisku d .



*Obr. 1. Schéma zkoušky tvrdosti dle
Brinella*

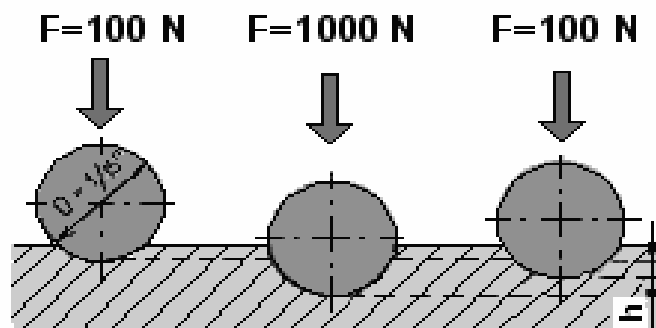
Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel. Zkoušené těleso musí mít povrch připraven tak, aby dovolil přesné měření průměru vtisku. Při úpravě povrchu je nutno postupovat tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění vlastností povrchu ohřevem nebo tvářením za studena. Tloušťka zkoušeného tělesa musí být nejméně osminásobek předpokládané hloubky vtisku a na protilehlé straně zkušebního tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace. [3]

3.1.2 Zkouška podle Rockwella

Autorem této metody je S. P. Rockwell a poprvé byla použita v roce 1922. Na rozdíl od metod měření tvrdosti podle Brinella a Vickerse se tvrdost podle Rockwella vyjadřuje pomocí rozdílu hloubky vtisku pod předběžným a celkovým zatížením. Tato metoda je velmi praktická a rychlá, tvrdost vzorku odečítáme přímo na tvrdoměru, není třeba měřit velikost vtisku, provádět další výpočty nebo vyhledávat hodnoty tvrdosti v tabulkách jako u Brinel-

lovy a Vickersovy metody. Z tohoto důvodu je Rockwellova metoda často používána v provozních podmínkách.

Zkouška spočívá (stejně jako ostatní statické zkoušky) ve vtlačování vnikacího tělesa (diamantový kužel nebo ocelová kulička) do povrchu zkoušeného tělesa za přesně určených podmínek. Požadovaný vtisk vznikne zatížením indentoru předběžným a přídavným zatížením. Měří se trvalá hloubka vtisku h po odstranění přídavného zatížení. Z hodnoty h se určí tvrdost podle Rockwella. [3]

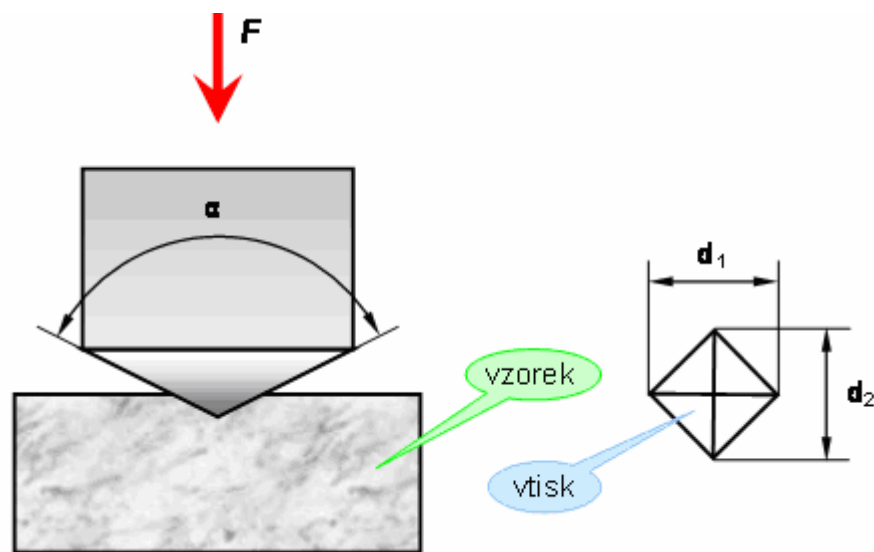


Obr. 2. Schéma zkoušky tvrdosti dle Rockwella

3.1.3 Zkouška podle Vickerse

Tato zkouška byla vyvinuta v Anglii a poprvé byla popsána R. L. Smithem a G. E. Sandlandem v roce 1922; pojmenována byla podle prvního tvrdoměru daného typu, který byl zkonstruován ve firmě Vickers. Je to metoda velmi přesná a citlivá, používaná hlavně v laboratořích, je rozšířena především v Evropě.

Vickersova zkouška je založena na stejném principu jako zkouška Brinellova, liší se pouze vnikacím tělesem, to v tomto případě tvoří diamantový pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , který je do zkušebního tělesa vtlačován zkušebním zatížením působícím v kolmém směru stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčka vtisku. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku.



Obr. 3. Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse

Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména úplně bez mazadel. Povrch zkušebního tělesa musí být upraven tak, aby dovolil přesné měření rozměrů vtisku. Při úpravě povrchu je nutno postupovat tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění vlastností povrchu ohřevem nebo tvářením za studena. [3]

3.2 Dynamické zkoušky

Výhodou těchto zkoušek jsou menší rozměry přístrojů, což umožňuje snadnou přepravu ke zkoušenému předmětu a měření tvrdosti za provozních podmínek (např. ve skladech, na stavbách a montážích nebo na předmětech velkých rozměrů bez nutnosti odběru vzorků apod.). Vzhledem k menší přesnosti získaných výsledků slouží tyto zkoušky k předběžnému třídění materiálu a k ověřování rovnoměrnosti jeho vlastností.

3.2.1 Tvrdoměr Poldi (Poldi kladívko)

Přenosný tvrdoměr, který umožňuje stanovení tvrdosti na základě plastické deformace vzniklé rázem a porovnání velikosti vzniklého vtisku s velikostí vtisku na materiálu (etalonu) 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, hmot-

nost a možnost funkčnosti prakticky v jakékoliv poloze. Tvrdoměr byl vyroben a patentován již v r.1921.

3.2.2 Baumannovo kladívko

Je to mobilní tvrdoměrné zařízení používané často ve výrobních procesech. Odjištěním a spuštěním pružiny, která je součástí kladívka, dojde k úderu razníku na vnikací tělísko ve tvaru kuličky a k jeho vtlačení do povrchu zkušební tělesa. Měří se průměr vtisku $d_{mat.}$, který zůstane na povrchu zkušební materiálu. Tvrdost se určuje jako poměr zkušební zatížení a povrchu vtisku (má povahu napětí). Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a bez mazadel. Na protilehlé straně zkušební tělesa nesmí být po zkoušce patrné viditelné stopy deformace.

3.2.3 Duroskop

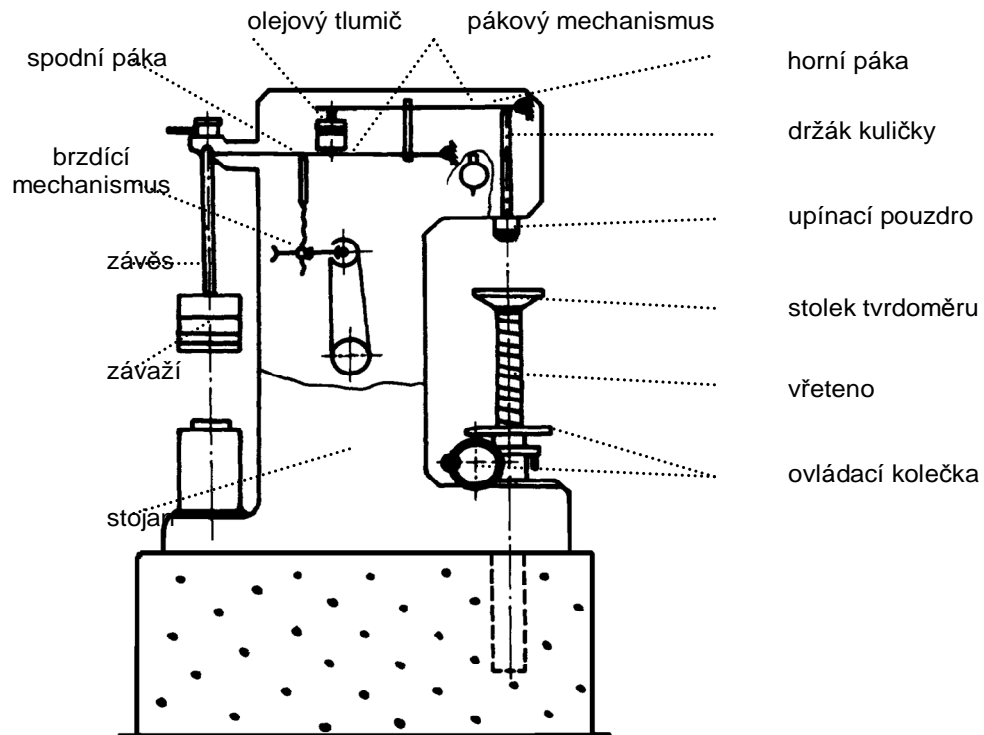
Podstata zkoušky spočívá ve spuštění definovaného zkušební tělíška z úhlu a na svislou stěnu zkoušeného materiálu. Sleduje se úhel b , do něhož zkušební tělíško po dopadu odskočí. Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a bez mazadel. Vzhledem k tomu, že zkouška je založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu, nemohou být na tělese patrné viditelné stopy deformace. Při určování tvrdosti materiálu měříme úhel odskoku zkušební tělíška.

3.2.4 Shoreho skleroskop

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. Vzhledem k tomu, že zkouška je založena na elastické deformaci zkoušeného povrchu, nemohou být na tělese patrné viditelné stopy deformace.

4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ PRO ZKOUŠKY TVRDOSTI

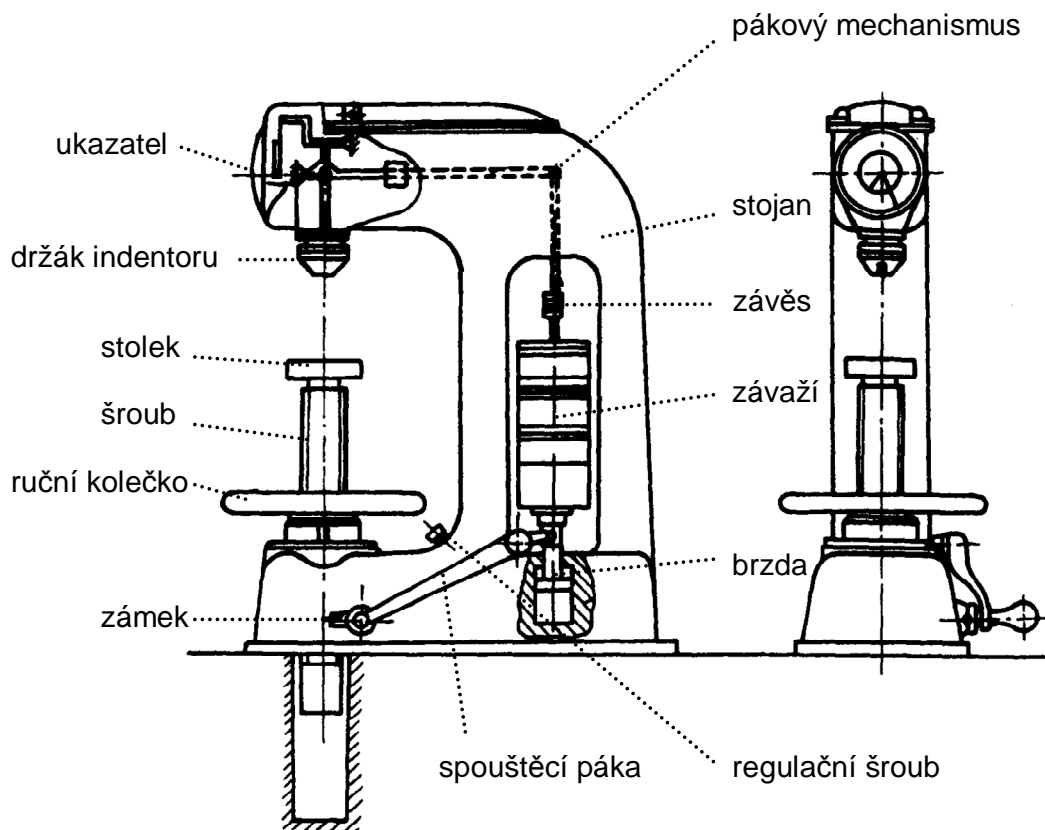
4.1 Schema přístroje na měření tvrdosti podle Brinella



Obr. 4. Schéma přístroje dle Brinella

Tvrdoměr na má masivní stojan ve tvaru písmene C. Zatěžovací síla je vyvozována pákovým mechanismem. Horní páka s olejovým tlumičem je spojena prostřednictvím břitu a tlačného čepu s držákem kuličky (indentoru). Na zadním břitu spodní páky je uložen závěs se závažími. Závaží jsou označena písmeny a na tabulce, umístěné na stojanu tvrdoměru, je uvedeno, jaké závaží má být pro dané zatížení použito. Rychlost spouštění zatěžovací páky odpovídající podmínkám zkoušky je zajišťována brzdícím mechanismem, který je poháněn elektromotorem. K umístění zkoušeného vzorku slouží stolek, který je fixován na vřetenu vedeném ve stojanu vřetene. Vřeteno je výškově nastavitelné pomocí koleček. Rovinné vzorky musí být uloženy na doraz k upínacímu pouzdru.

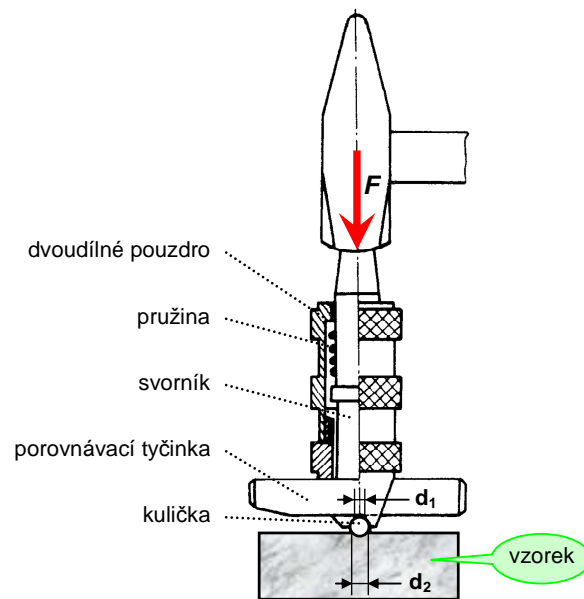
4.2 Schema přístroje na měření tvrdosti podle Rockwella



Obr. 5. Schéma přístroje dle Rockwella

V masivním stojanu je umístěn pohybový šroub se stolkem. Ten je ovládán ručním kolečkem. Držák indentoru s kuličkou nebo diamantovým kuželem se vkládá do tlačného břitu pákového zatěžovacího mechanismu. Tlačný břit je spojen převodovým ústrojím s ukazatelem, který přímo udává hodnotu tvrdosti podle Rockwella. Na konci pákového mechanismu je závěs, který nese závaží. Spouštěcí páka je umístěna po pravé straně a ve své klidové poloze je zajištěna zámek. Spouští se stisknutím tlačítka na zámku. Při spouštění klesá brzda se závažím, čímž se vyvozuje síla na tlačném břitu. Brzda slouží k řízení zatěžovací rychlosti a její rychlost je regulována šroubem. Černá stupnice ukazatele platí pro diamantový kužel a zatížení 1471 N, červená stupnice označená B platí pro kuličku o průměru 1,5875 mm a zatížení 981 N.

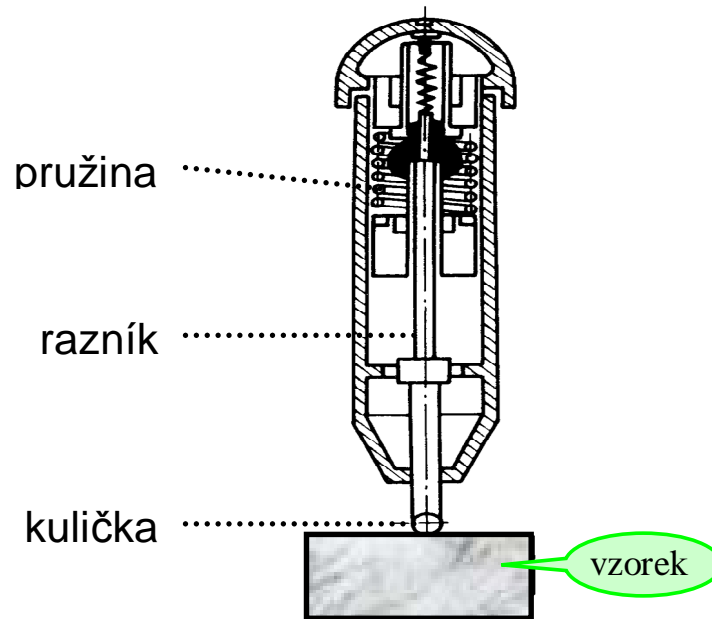
4.3 Poldi kladívko



Obr. 6. Poldi kladívko

Kladívko Poldi se skládá z pouzdra, do něhož je vkládána porovnávací tyčinka známé tvrdosti (etalon). Tyčinka je svorníkem a pružinou přitlačovaná ke kuličce o průměru 10 mm. Při vlastní zkoušce se tvrdoměr přiloží ke zkoušenému materiálu tak, aby kulička dosedla na zkoušené místo a osa tvrdoměru byla kolmá k povrchu zkoušeného předmětu. Na horní část tvrdoměru se udeří ručním kladivem, ráz se přenese na kuličku a ta vytvoří vtisky ve zkoušeném předmětu i v etalonu. Po vyjmutí porovnávací tyčinky z přístroje se lupou stanoví průměr vtisku d_1 v etalonu i průměr vtisku d_2 ve zkoušeném materiálu.

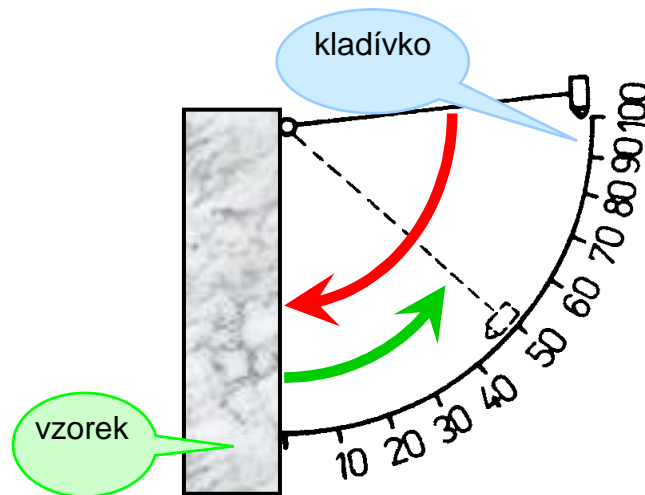
4.4 Baumannovo kladívko



Obr. 7. Baumannovo kladívko

U Baumannova kladívka se kulička o průměru 5 nebo 10 mm vtlačuje do zkoušeného předmětu úderem razníku, který je po odjištění vymrštěn stlačenou pružinou. Energie rázu je měnitelná; je možno nastavit dvě základní polohy stlačení pružiny, které jsou označeny 1/1 a 1/2. Natočením posuvného pláště kladívka se nastaví požadovaná velikost energie rázu. Pokud vzorek není dostatečně těžký, položí se na masivní podložku o hmotnosti asi 40 kg. Přístroj se přiloží kuličkou kolmo na zkoušený povrch a tlakem na zaoblený konec pláště se stlačuje pružina uvnitř pláště. Když je pružina stlačena na potřebnou délku, západka po odjištění vymrští razník, který uhodí na držák s kuličkou a ta vytvoří vtisk do zkoušeného materiálu. Lupou s měřítkem se změří průměr vtisku d a hodnota tvrdosti se vyhledá ve zvláštní tabulce, která je součástí výbavy přístroje. Při použití Baumannova kladívka není nutné používat etalon, protože síla úderu razníku je při každém měření stejně velká, vyvolaná stlačenou pružinou.

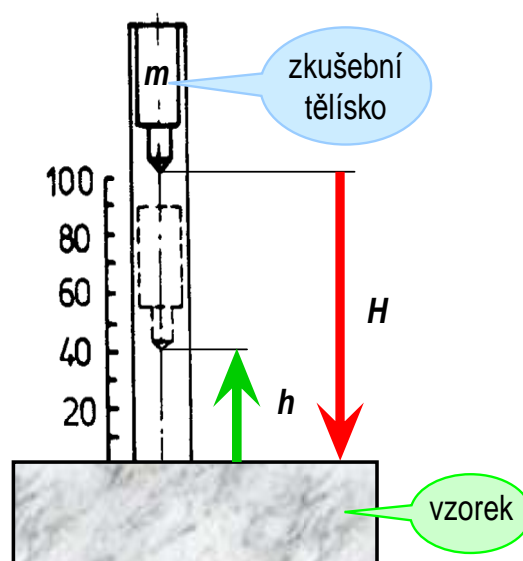
4.5 Duroskop



Obr. 8. Duroskop

Přístroj se skládá z kladívka nesoucího na jednom konci ocelovou kuličku, které je umístěno na otočném rameni. Kladívko padá z určitého úhlu na zkoušený předmět a při zpětném odrazu vezme s sebou vlečnou ručičku, která ukáže úhel odrazu kladívka. Dosažená hodnota tvrdosti se obvykle odečítá přímo na stupnici přístroje. Nepřesnost měření tvrdosti duroskopem je (podobně jako u Shoreho skleroskopu) velká.

4.6 Shoreho skleroskop



Obr. 9. Shoreho skleroskop

Skleroskop se skládá ze skleněné kalibrované trubky, ve které se pohybuje válcové tělísko o hmotnosti $m = 2,5$ g. Tělísko je na spodní části zakončeno kulovitě zabroušeným diamantem a padá volně z výšky $h = 254$ mm (10“). Za trubkou je umístěna stupnice udávající empiricky zjištěné stupně tvrdosti podle Shoreho. Dílek HSh = 100 odpovídá výšce odrazu od tvrdé kalené oceli. K měření je potřeba jisté zručnosti při odečítání výšky odrazu pomocí lupy. Zkoušený materiál musí být v místě zkoušky hladký a měřicí přístroj musí být umístěn kolmo k jeho povrchu. Zkušební těleso nesmí při zkoušce dopadnout dvakrát na stejné místo, protože v místě dopadu dochází k nepatrnému zpevnění povrchu, které by následně zkreslilo výsledek měření.

5 MODERNÍ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ TVRDOSTI

Moderní tvrdoměry se vyznačují vysokou přesností měření, snadnou obsluhou a velmi širokými možnostmi použití. Umožňují měření na těžko přístupných místech nebo na zakřivených plochách. Používají se při vstupní kontrole, ve výrobě a při výstupní kontrole s možností dokumentace naměřených hodnot.

5.1 Stolní tvrdoměry

Stolní tvrdoměry představují nejobsáhlejší skupinu tvrdoměrů. Dělí se na automatické a manuální přístroje. Automatické univerzální přístroje představují nejvyšší třídu stolních tvrdoměrů. Široká nabídka těchto přístrojů umožní výběr přístroje podle specifikací, které vyhovují i těm nejnáročnějším požadavkům. Stolní tvrdoměry jsou navrženy tak, aby odolávaly prašnému prostředí, náhlým výkyvům teplot, vibracím a jiným vnějším vlivům, které by mohly spolehlivé měření ovlivnit. Použití těchto přístrojů je vhodné jak pro provozní měření, tak pro laboratorní účely. Měření tvrdosti lze aplikovat na všechny běžné materiály: kovy, plasty, pryže, sklo, dřevo a další. [7]



Obr. 10. Stolní tvrdoměr IndentaMet 1114

5.2 Přenosné tvrdoměry

Přenosné tvrdoměry nachází své uplatnění při měření součástí velkých rozměrů, které jsou buď velmi obtížně a nebo vůbec přemístitelné ke stolnímu tvrdoměru. Tvrdoměry se vyznačují automatickým cyklem zátěže, který umožňuje měřit i tenké plechy a povrchové vrstvy. Další výhodou je možnost měření ve všech směrech nezávisle na působení gravitačních sil. Vynikají také snadnou obsluhou a malou hmotností. [7]



Obr. 11. Přenosný tvrdoměr Computest SC

5.3 Tvrdoměry pro měření tvrdosti nekovových materiálů

Velmi často používané jsou tvrdoměry typu SHORE, které mají podle oblasti použití rozsahy SHORE A, B, C, D, D0, 0, 00, E, M, 000 a 000S. Jedná se o přenosný přístroj a lze ho použít v provozních podmínkách při rychlých kontrolách. Vyznačuje se nízkou hmotností, snadnou obsluhou, jednoduchostí a dobře čitelnou stupnicí. Dodává se v analogovém nebo digitálním provedení. [7]



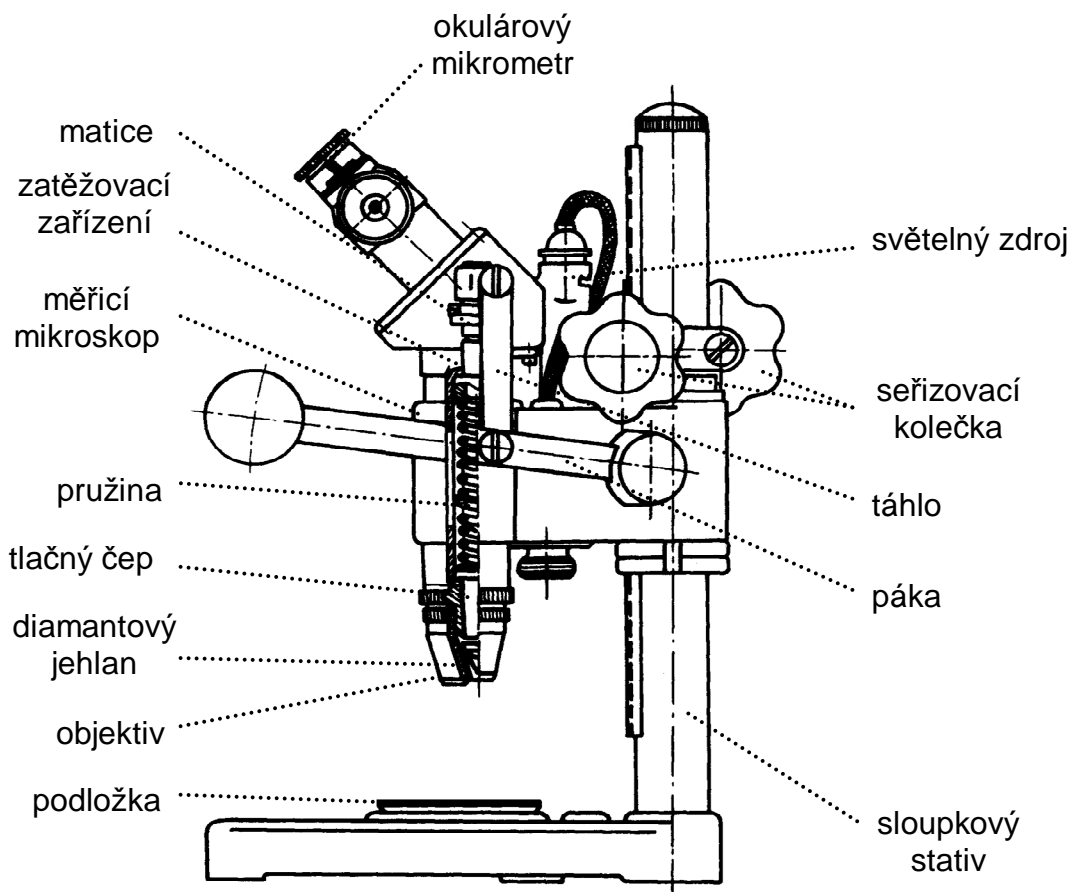
Obr. 12. Tvrdoměr SHORE

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 OVĚŘOVÁNÍ A KALIBRACE ZKUŠEBNÍCH STROJŮ

Ověřování a kalibrace zkušebních strojů se řídí podle normy ČSN EN ISO 6507 a specifikuje metodu ověřování zkušebních strojů používaných ke stanovení tvrdosti podle Vickerse ve smyslu ISO 6507-1. Předepisuje přímou metodu ověřování pro kontrolu hlavních funkcí činnosti stroje a nepřímou metodu vhodnou pro celkovou kontrolu stroje. Nepřímá metoda se může nezávisle využívat k pravidelnému běžnému přezkušování stroje v průběhu jeho používání. Pokud se má zkušební stroj rovněž používat pro jiné metody zkoušení tvrdosti, musí se nezávisle ověřit pro každou metodu. [5]

6.1 Schéma přístroje na měření tvrdosti podle Vickerse



Obr. 13. Schéma přístroje podle Vickerse

Na sloupkovém stativu přístroje je nasunuto rameno, které nese zatěžovací zařízení, měřicí mikroskop a světelný zdroj. K výškovému nastavení ramene slouží kolečko. Nastavená poloha se zajišťuje druhým kolečkem. Zatěžování se provádí pákou, táhlem a tlačným šrou-

hem, který tlačí na pružinu. Pružina působí na tlačný čep držáku diamantového jehlanu. Stlačením pružiny až k dorazu na matici je vyvozena předepsaná zatěžovací síla. Měřicí mikroskop je posuvný ve vodítku kolečkem po levé straně přístroje. Mikroskop a zatěžovací zařízení jsou vzájemně pevně spojeny a otočně umístěny na objímce stativu. Při vlastním měření tvrdosti je při natočení hlavy do jedné krajní polohy proveden vtisk, pak se celou hlavou pootočí do druhé krajní polohy a v mikroskopu se objeví vtisk. Mikrometrickým osovým křížem v okuláru mikroskopu je možno změřit velikost úhlopříček. Zkoušený předmět se pokládá na podložku nebo se přístroj postaví přímo na zkoušený předmět a měření probíhá otvorem v podstavci s vyjmutou podložkou. [3]



Obr. 14. Přístroj Poldi-Vickers

6.2 Přímé ověřování

Přímé ověřování se doporučuje provádět při teplotě $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Pokud je ověřování prováděno mimo teplotní rozsah, musí se teplota uvést v ověřovacím protokolu. Přístroje používané k ověřování a kalibraci musí navazovat na národní etalony. [5]

Přímé ověřování zahrnuje:

- a) kalibraci zkušebního zatížení,
- b) ověřování vnikacího tělesa,
- c) kalibraci měřicího systému,
- d) ověřování zkušebního cyklu.

6.3 Nepřímé ověřování

Nepřímé ověřování se doporučuje provádět při teplotě $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ pomocí referenčních destiček kalibrovaných podle ISO 6507-3. Pokud se ověřování provádí mimo toto teplotní rozmezí, musí být teplota zaznamenána v ověřovacím protokolu.

Na každé referenční destičce se musí proměřit referenční vtisk. U žádné destičky nesmí rozdíl mezi průměrnou naměřenou hodnotou a certifikovanou průměrnou délkou uhlopříčky přesáhnou maximální přípustnou chybu uvedenou v tabulce 1.

Tab. 1. Maximální přípustná chyba

Délka uhlopříčky d mm	Rozlišovací schopnost měřicího systému	Maximální přípustná chyba
$d \leq 0,040$	0,000 2 mm	0,000 4 mm
$0,040 < d \leq 0,200$	0,5 % d	1,0 % d
$d > 0,200$	0,001 mm	0,002 mm

Zkušební stroj se musí ověřit pro každé používané zkušební zatížení. Pro každé zkušební zatížení se musí vybrat dvě referenční destičky v níže předepsaných rozsazích tvrdosti. Destičky se musí volit tak, aby v každém rozsahu tvrdosti se k ověřování využila alespoň jedna referenční destička.

- ≤ 225 HV
- 400 HV až 600 HV
- > 700 HV

Pokud se ověřují zkušební stroje využívané pouze pro jedno zkušební zatížení, musí se použít tři referenční destičky, každá pro jeden rozsah.

Na každé referenční destičce se musí provést a proměřit pět vtisků.

Ve zvláštních případech se tvrdoměr může ověřit pouze pro jednu hodnotu tvrdosti, která přibližně odpovídá té úrovni, při které budou zkoušky prováděny.

U každé referenční destičky se aritmetické průměry hodnot naměřených délek dvou úhlopříček vtisků, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 seřadí vzestupně, a:

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5}{5} \quad (1)$$

Opakovatelnost zkušebního stroje pro konkrétní podmínky ověřování závisí na rozdílu

$$R = d_5 - d_1 \quad (2)$$

Chyba, E zkušebního stroje v konkrétních podmínkách ověřování je charakterizována rozdílem:

$$E = \bar{H} - H_c \quad (3)$$

kde

$$\bar{H} = \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5}{5} \quad (4)$$

kde

$H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5$ jsou hodnoty tvrdosti odpovídající $d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5$,

H_c je předepsaná tvrdost použité referenční destičky.

7 OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TVRDOMĚRU POLDI VICKERS

7.1 Zkušební těleso

Zkouška se provádí na povrchu, který je hladký a rovný, bez okujené vrstvy, cizích tělísek a zejména zcela bez mazadel. Konečná úprava povrchu musí umožnit přesné stanovení rozměrů úhlopříček vtisku.

Příprava povrchu zkušební tělesa se provádí tak, aby byla co nejvíce omezena změna jeho vlastností vyvolaná např. ohřevem nebo tvářením při řezání, broušení a leštění vzorku.

Tloušťka vzorku musí být nejméně 1,5 násobek délky úhlopříčky. Na protilehlém povrchu vzorku nesmí být patrné stopy deformace způsobené vnikacím tělesem. [4]

7.2 Provedení zkoušky

Zkouška se provádí obvykle při teplotě 10 až 35°C, v arbitrážních případech při teplotě $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

Při zkoušce musí být použito některé zatížení podle tabulky 2.

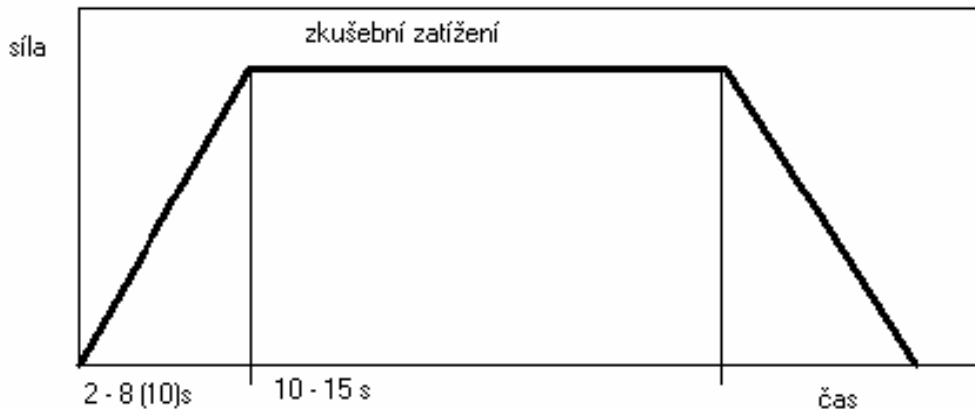
Tab. 2. Zkušební zatížení

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Hodnota zkušebního zatížení F	Symbol tvrdosti	Hodnota zkušebního zatížení F	Symbol tvrdosti	Hodnota zkušebního zatížení F
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,098 07
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,147 1
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,2	0,196 1
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,245 2
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,490 3
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,980 7

Vzorek musí být při zkoušce položen na tuhé podložce. Styčné plochy musí být čisté, a bez cizích tělísek. Je důležité, aby vzorek ležel na podložce tak, aby se při zkoušce nepohnul.

Vnikací těleso se zatačuje do povrchu vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu, bez rázů a chvění. Doba od začátku zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a delší než 8s. Při zkouškách tvrdosti při nízkém zatížení nesmí překročit 10s.

Doba působení zkušební síly je v rozmezí 10 až 15s. Pro některé materiály mohou být použity delší časy, ty však musí být dodržovány s tolerancí $\pm 2s$. [4]



Obr. 15. Graf průběhu zkušebního zatížení

7.3 Symboly a označení

Tab. 3. Symboly a označení

Symbol	Označení
α	vrcholový úhel jehlanu vnikacího tělesa mezi protilehlými stěnami (136°)
F	zkušební zatížení, v N
d	aritmetický průměr dvou délek uhlopříček d_1, d_2 v mm
HV	<p>Tvrdost podle Vickerse</p> $= \text{konstanta} \cdot \frac{\text{zkušební zatížení}}{\text{plocha povrchu vtisku}}$ $= 0,012 \cdot \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{F}{d^2}$
POZNÁMKA - Konstanta = $\frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} = 0,102$	

7.3.1 Zápis hodnoty tvrdosti

Výsledek měření tvrdosti obsahuje číslo tvrdosti a symbol HV s číslem odpovídajícím použitému zkušebnímu zatížení.

Příklad: 814 HV 5

7.4 Přehled možných chyb při měření tvrdosti metodou Vickers

a) Chyby způsobené odchylkou zatěžovací síly

Velikost chyby číselné hodnoty tvrdosti je lineárně přímo úměrná chybě zatěžovací síly, tzn. že odchylka síly + 1% vyvolá stejnou chybu hodnoty tvrdosti (+1% HV).

b) Odchylka od vrcholového úhlu stěn

Dovolená odchylka pro vrcholový úhel diamantového hrotu $\pm 0,50$ způsobí chybu v naměřené hodnotě tvrdosti $\pm 0,2$ %.

c) Chyby při měření délky úhlopříčky

Chyba měření délky úhlopříčky + 1% způsobí chybu naměřené hodnoty tvrdosti – 2 %.

Chyby vznikající při proměřování vtisku způsobují obvykle největší odchylky v hodnotě tvrdosti a relativní velikost těchto chyb se zvětšuje se zmenšováním velikosti vtisku.

Dovolená odchylka měřicího zařízení tvrdoměrů je $\pm 1\mu\text{m}$ pro úhlopříčky o délce menší než 0,2 mm a $\pm 0,5$ % délky úhlopříčky pro délky větší než 0,2 mm.

d) Chyby způsobené nedodržením předepsaných zkušebních podmínek

Do této skupiny lze zařadit chyby vznikající v důsledku:

- rozdílné rychlosti přísunu vnikacího tělesa
- rozdílné doby působení zatěžující síly
- mechanickým zpevněním povrchové vrstvy
- oduhličením povrchové vrstvy v důsledku nežádoucího ohřevu povrchové vrstvy během přípravy vzorku
- existencí povrchového napětí v místě zkoušky
- vibrací a rázů během zkoušky

- nedodržení předepsaných vzdáleností mezi jednotlivými vtisky nebo mezi vtiskem a okrajem zkoušeného vzorku
- při měření na zakřivené ploše není započítán korekční faktor

8 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření tvrdosti bylo provedeno na etalonu POLDI 3930 / 71 523 HV.

8.1 Naměřené hodnoty

Tab. 4. Hodnoty měření č. 1

Číslo měření	d_1	d_2	aritmetický \bar{d}	HV
1	0,324	0,325	0,325	527
2	0,322	0,322	0,322	537
3	0,333	0,332	0,333	502
4	0,328	0,327	0,328	517
5	0,322	0,323	0,323	533
		\bar{d}	0,3258	523,2

Tab. 5. Hodnoty měření č. 2

Číslo měření	d_1	d_2	aritmetický \bar{d}	HV
1	0,333	0,33	0,332	505
2	0,32	0,321	0,321	540
3	0,329	0,331	0,330	511
4	0,324	0,326	0,325	527
5	0,323	0,32	0,322	537
		\bar{d}	0,3257	524

Tab. 6. Hodnoty měření č. 3

Číslo měření	d_1	d_2	aritmetický \bar{d}	HV
1	0,322	0,32	0,321	540
2	0,321	0,32	0,321	540
3	0,328	0,326	0,327	520
4	0,325	0,323	0,324	530
5	0,331	0,33	0,331	508
		\bar{d}	0,3246	527,6

Tab. 7. Hodnoty měření č. 4

Číslo měření	d ₁	d ₂	aritmetický Ø	HV
1	0,326	0,327	0,327	520
2	0,331	0,328	0,330	511
3	0,328	0,327	0,328	517
4	0,326	0,327	0,327	520
5	0,322	0,319	0,321	540
		Ø	0,3261	521,6

Tab. 8. Hodnoty měření č. 5

Číslo měření	d ₁	d ₂	aritmetický Ø	HV
1	0,321	0,322	0,322	537
2	0,329	0,328	0,329	514
3	0,325	0,328	0,327	520
4	0,328	0,326	0,327	520
5	0,319	0,321	0,320	543
		Ø	0,3247	526,8

Tab. 9. Hodnoty měření č. 6

Číslo měření	d ₁	d ₂	aritmetický Ø	HV
1	0,322	0,321	0,322	537
2	0,323	0,32	0,322	537
3	0,326	0,328	0,327	520
4	0,328	0,327	0,328	517
5	0,328	0,324	0,326	523
		Ø	0,3247	526,8

8.2 Statistické vyhodnocení zkoušky

Výsledky zkoušek jednotlivých měření jsou statisticky vyhodnocovány. U každé sady vzorku je určena: [6,8]

1. Průměrná hodnota sady

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

kde:

- x_i hodnota zpracovávané veličiny
- n počet zpracovávaných vzorků

2. Směrodatná odchylka

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

kde:

x_i hodnota zpracovávané veličiny

n počet zpracovávaných vzorků

\bar{X} průměrná hodnota zpracovávaných vzorků

Tab. 10. Střední úhlopříčky vtisku

d	Střední úhlopříčka vtisku d mm
d ₁₁	0,325
d ₁₂	0,322
d ₁₃	0,333
d ₁₄	0,328
d ₁₅	0,323
d ₂₁	0,332
d ₂₂	0,321
d ₂₃	0,330
d ₂₄	0,325
d ₂₅	0,322
d ₃₁	0,321
d ₃₂	0,321
d ₃₃	0,327
d ₃₄	0,324
d ₃₅	0,331
d ₄₁	0,327
d ₄₂	0,330
d ₄₃	0,328
d ₄₄	0,327
d ₄₅	0,321
d ₅₁	0,322
d ₅₂	0,329
d ₅₃	0,327
d ₅₄	0,327
d ₅₅	0,320
d ₆₁	0,322
d ₆₂	0,322
d ₆₃	0,327
d ₆₄	0,328
d ₆₅	0,326

Výpočet:

$$X = \frac{9,768}{30} = 0,326mm$$

$$S = \sqrt{0,00001317} = 0,0036$$

8.3 Grafické zobrazení statistického souboru

Statistický soubor, v němž jsou data seskupena do tříd, se graficky znázorňuje histogramem četností. Je to sloupcový diagram se sloupci stejné šířky rovné šířce třídy h ; počet sloupců se rovná počtu tříd, sloupce a třídy následují ve stejném pořadí. Výška i -tého sloupce ($i = 1, 2, \dots, m$) je rovna absolutní četnosti n_i i -té třídy. [6,8]

Tab. 11. Tabulka četnosti

Třídy	Četnost
0,322	10
0,324	2
0,327	3
0,329	9
0,331	4
0,333	2

Výpočty pro tvorbu histogramů:

Variační rozpětí:

$$R = \max - \min \quad (7)$$

Počet sloupců:

$$k = [1 + 1,4426 \cdot \ln(n)] \quad (8)$$

Šířka sloupce:

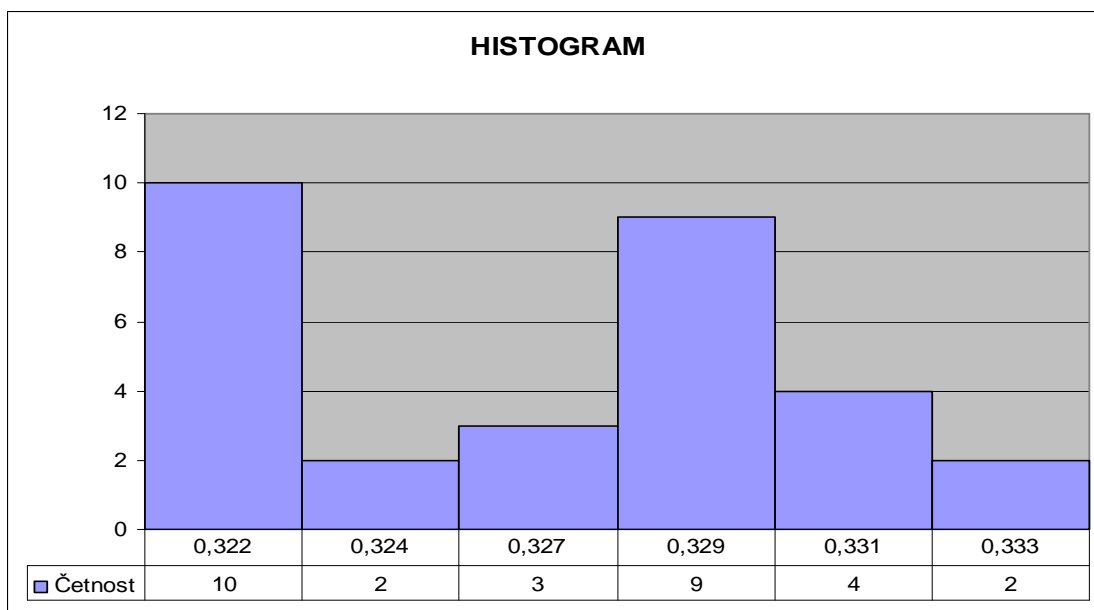
$$h = 0,08 \cdot R \quad (9)$$

Výpočet:

$$R = 0,333 - 0,320 = \underline{0,013}$$

$$k = [1 + 1,4426 \cdot \ln(30)] = 5,907 \Rightarrow 6 \text{ tříd}$$

$$h = \frac{0,013}{6} = 0,0022$$



Obr. 16. Graf histogramu četnosti

8.4 Porovnání hodnot

Tab. 12. Hodnoty etalonu

Délka úhlopříčky mm	Tvrdomost podle Vickerse HV
0,326	523

Tab. 13. Naměřené hodnoty

Průměrná délka naměřených úhlopříček mm	Tvrdomost podle Vickerse HV
0,326	523

ZÁVĚR

V teoretické části jsem se zabýval rozdělením zkoušek pro stanovení základních mechanických vlastností. Zaměřil jsem se hlavně na zkoušky tvrdosti, které mají v praxi velký význam a patří mezi často používané zkoušky.

V praktické části jsem se zabýval ověřením vlastností školního tvrdoměru. Dobře jsem se seznámil s hlavními částmi přístroje i s principem provedení zkoušky. Před samotným měřením došlo k ověření a kalibraci přístroje a k jeho seřízení. Zkouška byla prováděna na zkušebním tělese, jímž byl etalon POLDI 3930 / 71 523 HV. Poté následovalo vyhodnocení naměřených hodnot a srovnání se skutečnými hodnotami.

Hodnoty výsledků měření jsou zcela shodné z hodnotami etalonu, proto lze tvrdoměr nazvat velmi přesným. Jako výhody tohoto tvrdoměru uvádím jeho přesnost, nenáročnost, snadné seřízení a malé rozměry. Jeho nevýhodou je však nízká zatěžovací síla, vznik nepřesností vlivem ručního zatěžování a tím nestálost působící zatěžovací síly. Tento přístroj je v současnosti nahrazen moderními elektronickými tvrdoměry, které se vyznačují velkou přesností měření, snadnou obsluhou a možností měření na těžko přístupných místech. Proto je tvrdoměr Poldi-Vickers vhodný hlavně jako učební pomůcka, pro demonstraci zkoušky tvrdosti ve výuce a pro měření rozměrově nenáročných součástí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ptáček, L. a kolektiv: *Nauka o materiálu I*, Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2001, ISBN 80-7204-193-2.
- [2] Lukovics, I. *Konstrukční materiály a technologie*: 1. vyd. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0399-3.
- [3] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2006-11-15]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/>>.
- [4] ČSN EN ISO 6507-1 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti dle Vickerse Část 1: Zkušební metoda, Praha, ČNI, 1999.
- [5] ČSN EN ISO 6507-2 Kovové materiály – Zkouška tvrdosti dle Vickerse Část 2: Ověření tvrdoměrů Vickers, Praha, ČNI, 1999.
- [6] Tošenovský, J. a kolektiv: *Statistické zpracování dat*, Ostrava, 1999
- [7] TSI System [online]. [cit. 2007-03-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.tsisystem.cz/>>.
- [8] ČSN 010250 – Statistické metody v průmyslové praxi, Praha, ČNI, 1999.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

D	Průměr ocelové kuličky
d	Délka úhlopříčky
R	Variační rozpětí
E	Chyba zkušebního stroje
F	Zatěžující síla
α	Vrcholový úhel vnikacího tělesa
HV	Tvrдость podle Vickerse
n	Počet zpracovávaných vzorků
x_i	Hodnota zpracovávané veličiny
X	Průměrná hodnota zpracovávaných vzorků
S	Směrodatná odchylka
k	Počet sloupců
h	Šířka sloupce

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma zkoušky tvrdosti dle Brinella</i>	15
<i>Obr. 2. Schéma zkoušky tvrdosti dle Rockwella</i>	16
<i>Obr. 3. Schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse</i>	17
<i>Obr. 4. Schéma přístroje dle Brinella</i>	19
<i>Obr. 5. Schéma přístroje dle Rockwella</i>	20
<i>Obr. 6. Poldi kladívko</i>	22
<i>Obr. 7. Bumannovo kladívko</i>	23
<i>Obr. 8. Duroskop</i>	24
<i>Obr. 9. Shoreho skleroskop</i>	24
<i>Obr. 10. Stolní tvrdoměr IndentaMet 1114</i>	26
<i>Obr. 11. Přenosný tvrdoměr Computest SC</i>	27
<i>Obr. 12. Tvrdoměr SHORE</i>	28
<i>Obr. 13. Schéma přístroje podle Vickerse</i>	30
<i>Obr. 14. Přístroj Poldi-Vickers</i>	31
<i>Obr. 15. Graf průběhu zkušebního zatížení</i>	36
<i>Obr. 16. Graf histogramu četnosti</i>	43

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Maximální přípustná chyba</i>	31
<i>Tab. 2. Zkušební zatížení.....</i>	33
<i>Tab. 3. Symboly a označení</i>	34
<i>Tab. 4. Hodnoty měření č. 1.....</i>	37
<i>Tab. 5. Hodnoty měření č. 2.....</i>	37
<i>Tab. 6. Hodnoty měření č. 3.....</i>	37
<i>Tab. 7. Hodnoty měření č. 4.....</i>	38
<i>Tab. 8. Hodnoty měření č. 5.....</i>	38
<i>Tab. 9. Hodnoty měření č. 6.....</i>	38
<i>Tab. 10. Střední úhlopříčky vtisku</i>	39
<i>Tab. 11. Tabulka četnosti.....</i>	40
<i>Tab. 12. Hodnoty etalonu</i>	41
<i>Tab. 13. Naměřené hodnoty</i>	41