

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav materiálových věd a inženýrství

Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů

Ing. Pavel Doležal
Doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc.

Obsah:

Mikrotvrdost

Úvod

Mikrotvrdost dle Vickerse

Mikrotvrdost dle Knoopu

Měření mikrotvrdosti

Manuální

Poloautomatické

Automatické

Aplikační možnosti

Fáze a s strukturní složky

Svary kovových materiálů

Svary odporové, výstupkové a švové

Kovové a jiné anorganické povlaky

Chemicko - tepelné zpracování

Praktické aplikace

Studium difúze

Chemicko - tepelné zpracování

Archeometalurgie

Literatura a odkazy

Pozn. V tomto souboru není uložena kapitola „Praktické aplikace“.

Mikrotvrдость

Úvod

Tvrдость patří mezi významné mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů a je velmi často využívána v technické praxi. Hlavní předností zkoušek tvrlosti 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.

Tvrдость lze definovat jako odolnost materiálu (povrchu materiálu v měřené lokalitě) proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (vnikajícím tělesem - indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. Mírou tvrlosti je konkrétní velikost trvalé plastické deformace.

Jeden z nejstarších způsobů zkušeni tvrlosti realizoval v roce 1722 Reamur pomocí tyče s proměnlivou tvrlostí od jednoho konce k druhému, přičemž hodnota tvrlosti byla určována podle polohy vrypu, kterou zkoušený materiál na měrné tyči zanechal. Dalším stupínkem ve vývoji měření tvrlosti byla známá Mohsova stupnice (v roce 1822) relativní povrchové tvrlosti, 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 zkušebního vzorku a měření šířky výsledného vrypu. Číslem tvrlosti bylo aplikované zatížení, které na povrchu vzorku vytvořilo vryp široký 0,1 mm. Výhodou byla možnost využít jediného záznamu k měření relativní tvrlosti různých fází a složek obsažených v mikrostruktuře včetně změn tvrlosti na hranicích zrn. Kvantitativní měření tvrlosti bylo postupně rozvíjeno až do dnešní doby, kdy jsme schopni hodnotit tvrlost pomocí přesně daných podmínkách měření, což umožňuje řadu aplikací.

Zkoušky tvrlosti lze dělit podle různých hledisek: Podle principu rozeznáváme zkoušky vrypové, vnikací, nárazové a odrazové, podle rychlosti působení zátěžné síly dělíme zkoušky tvrlosti na statické a dynamické, rozeznáváme zkoušky makro i mikrotvrlosti.

Nejpoužívanější , tj. statické zkoušky tvrlosti jsou charakteristické tím, že vnikající těleso tvrdoměru je vtlačováno do povrchu zkušebního vzorku monotónně se zvyšující silou do dosažení předepsaného zatížení, které je pak udržováno na konstantní úrovni po určité

stanovenou dobu. Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoop. V současné technické praxi u kovových materiálů převládají zkoušky vnikací měřením tvrdosti podle Vickerse (název pochází od anglické firmy Vickers, výrobce tvrdoměrů, autory zkoušky byli G.E.Sanland a L. Smith v r.1925). Základním a společným znakem těchto metod je vtlačování vnikajícího tělesa (indentoru) přesně definovaného tvaru přesně definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu ([obr. 1](#)). Porovnání několika uvedených stupnic tvrdostí je uvedeno na [obr. 2](#).

V průběhu zkoušky vznikne na povrchu tělesa trvalý vtisk v důsledku rozvoje plastických deformací v okolí vnikajícího tělesa. Po odlehčení se geometrie vtisku proměňuje a jeho velikost je mírou odporu materiálu proti vnikání cizího tělesa. Hodnota tvrdosti se vypočte jako velikost trvalé deformace (plochy nebo hloubky vtisku) v relaci k působící zátěžné síle. Vnikající těleso přitom nesmí podléhat plastickým deformacím a musí proto vykazovat co nejvyšší tvrdost, modul a mez pružnosti.

Tvrdost není možné charakterizovat jako jednoznačně definovanou fyzikální veličinu, protože výsledek měření tvrdosti závisí na celé řadě vlivů, např. na:

- elastických vlastnostech měřeného materiálu, zejména na modulu pružnosti v tahu a ve smyku
- plastických vlastnostech zkušného materiálu, zejména na mezi kluzu a charakteru deformačního zpevnování
- velikost zátěžné síly působící na vnikající těleso

Tvrdost stejného kovu může mít různou tvrdost v závislosti na:

- velikosti zrna (jemnozrnné materiály vykazují vyšší hodnoty tvrdosti v důsledku vyššího odporu hranic zrn vůči vnikání cizího tělesa)
- teplotě (v důsledku vyšší teploty se vlivem roztažnosti stávají vazby mezi atomy méně pevné)
- množství cizích příměsí (veškeré příměsi, zejména heterogenně, snižují schopnost materiálu se plasticky deformovat a zvyšují tak tvrdost
- vnitřním pnutím (způsobené např. tvářením za studena, nerovnoměrným ochlazováním součástí atd. zvyšují tvrdost)

Mikrotvrdost

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 mikrotvrdosti již není Vickersova tvrdost (jako je tomu na základě geometrické podobnosti vtisků u hodnot makrotvrdosti) nezávislá na velikosti aplikovaného zatížení.

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

- malé nebo tenké součásti;
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušebního vzorku;
- měření mikrotvrdosti strukturních složek a fází;
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování;
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků;
- hodnocení svarových spojů;
- pro hodnocení oduhličujících procesů;
- studium difúzních pochodů;
- měření křehkých materiálů;
- atd.

Nanotvrlost

Při dalším snižování zátěžných sil se dostáváme do oblasti tzv. nanotvrlosti, 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.

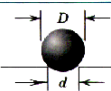



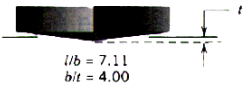

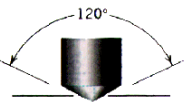


Záznam závislosti zatížení a hloubky vtisku je využíván při měření velmi tenkých vrstev, povlaků, filmů, a také strukturních složek ve slitinách. V řadě případů je získaný záznam využíván k měření dalších mechanických veličin, např. základních mechanických vlastností včetně modulu pružnosti v tahu, lomové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

Při měření nanotvrlosti se používá řada vnikajících tělísek vyrobených z různých materiálů, nejčastějším materiálem je diamant vzhledem k jeho tvrdosti a vysokému modulu

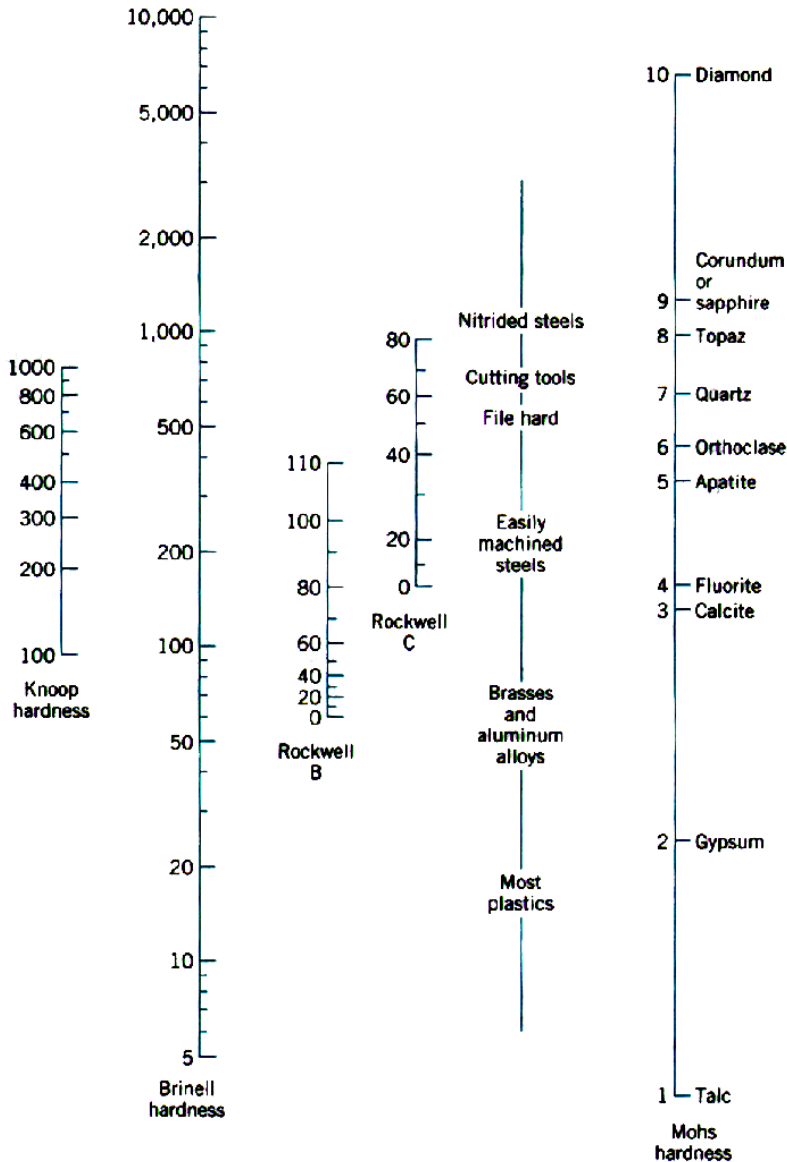
pružnosti, což významně snižuje vliv deformace indentoru na výsledky měření. Jako vnikající těleso se v oblasti nanotvrdomosti přednostně používá trojboký jehlan podle Berkoviche, který zachovává stejný poměr hloubky a plochy vtisku jako Vickersův jehlan, ale oproti jehlanu podle Vickerse (který je zakončen 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 zpevnování materiálu. Problémy s výrobou kulových indentorů pro měření nanotvrdomosti z tvrdých materiálů jsou příčinou, proč je v oblasti nanotvrdomosti přednostně používána Berkovichova metoda. Někdy se jako vnikající těleso používá také hrot ve tvaru rohu krychle, což je ostřejší hrot v porovnání s hrotem podle Berkoviche, tím tento hrot vyvolává větší napětí a deformace v okolí vtisku, čímž v okolí vtisku u křehkých materiálů vznikají dobře definovatelné trhlinky. To je mnohdy s výhodou využíváno při měření lomové houževnatosti v mikroobjemech. Nanoindentory ve tvaru kužele mají výhodu vyplývající ze skutečnosti, že u tohoto tvaru nevzniká koncentrace napětí na ostrých hranách jako u ostatních indentorů. Malý rozsah použití konických tvarů indentorů je způsoben potížemi při výrobě diamantového hrotu s bodovým zakončením.

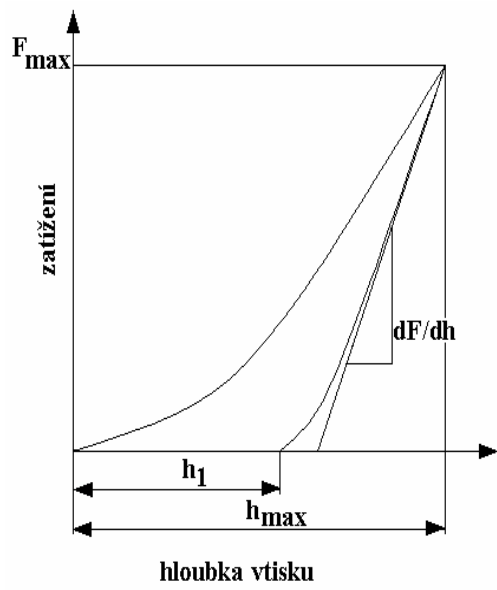
Vlastní proces zkoušení probíhá pro všechny tvary vnikajících těles následovně: Při vtlačování vnikajícího tělesa do materiálu vznikají jak elastické, tak plastické deformace a tvar vtisku je dán tvarem vnikajícího tělíska. Po odlehčení zůstanou jen nevratné plastické deformace, což umožňuje rozlišit velikost elastických a plastických deformací. Závislost velikosti síly a deformace při instrumentované zkoušce nanotvrdomosti je schematicky uvedena na obr.3.

Obr.1

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ Diamond cone { 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres	  	{ 60 kg } { 100 kg } Rockwell { 150 kg } { 15 kg } { 30 kg } Superficial Rockwell { 45 kg }		

Obr. 2





Obr.3 Schematické zobrazení závislosti velikosti síly a deformace při zkoušce nanotvrdosti

Mikrotvrдость dle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti dle Vickerse je předepsána evropskou normou ČSN EN ISO 6507-1, a to pro tři rozdílné oblasti zkušebního zatížení (viz následující tabulka).

Tabulka 1 Tvrđost dle Vickerse - oblasti zkušebního zatížení pro kovové materiály

Oblast zkušebního zatížení, F N	Symbol tvrdosti	Předchozí označení (ISO 6507-1:1982)
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až $< HV 5$	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	HV 0,01 až $< HV 0,2$	Zkouška mikrotvrđosti dle Vickerse

Poznámka:

Hodnoty zkušebního zatížení uváděné v evropské normě jsou počítány ze zkušebního zatížení v kilogramech (tato jednotka zatížení byla pro tvrdost stanovena dříve, než byl přijat systém SI). V současné době jsou tedy v normě ponechány tyto jednotky (kilogramy), avšak při následující revizi se bude uvažovat o výhodnosti zaokrouhlených hodnot zkušebního zatížení a následných důsledků na stupnici tvrdosti.

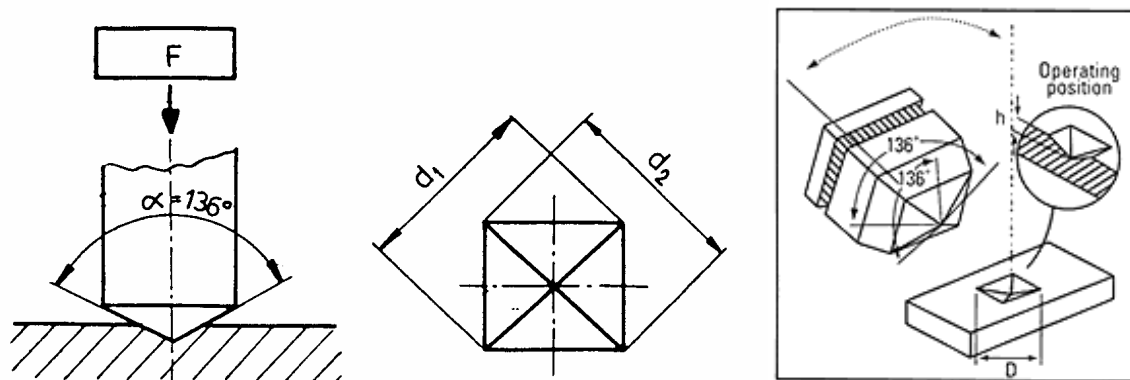
Co to znamená???

Při měření tvrdosti dle Vickerse používáme zkušební zatížení v kilogramech, ale zátěžnou sílu použitou při měření uvádíme v Newtonech.

Např. tvrdost HV 1 znamená, že působící zatížení na indentor je 1 kilogram, ale zátěžná síla se udává jako 9,807 N – viz. tabulka 2.

Podstata zkoušky

Diamantové vnikající těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a daným vrcholovým úhlem (136°) mezi protilehlými stěnami je vlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního tělesa (obr. 1).



Obr. 1 Podstata zkoušky tvrdosti dle Vickerse

Tvrdość dle Vickerse je následně vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenž se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem rovnajícím se úhlu vnikajícího tělesa (136°):

HV ... tvrdość dle Vickerse

$HV = \text{konstanta} \cdot \text{zkušební zatížení} / \text{plocha povrchu vtisku}$

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

d ... aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2 v mm (obr.1)

F ... zkušební zatížení, v N

konstanta ... $\frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} = 0,102$

Označování tvrdosti

Tvrdość dle Vickerse se označuje symbolem HV za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od předepsané doby (10-15 s):

Př.1: 640 HV 30 = tvrdość dle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2 N působícím po dobu od 10 do 15 s

Př.2: 640 HV 30/20 = tvrdost dle Vickerse 640 stanovená při zkušebním zatížení 294,2 N působícím po dobu 20 s

Zkušební těleso

Zejména při měření tvrdosti při nízkém zatížení a při mikrotvrdosti musí být umožněno přesné měření úhlopříček vtisku. Hodnocený zkušební vzorek musí mít hladký a rovný povrch, bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se tedy připravuje jako metalografický výbrus, tzn. nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Běžně se příprava provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. Přesná metodika přípravy vzorku se volí dle příslušného materiálu.

Tloušťka zkušebního tělesa nebo vrstvy musí být nejméně 1,5násobek délky úhlopříčky vtisku. Grafické znázornění nejmenší tloušťky zkušebního tělesa s ohledem na zkušební zatížení a hodnotu tvrdosti udává **obr. 2**.

Monogram uvedený na **obr. 3** znázorňuje nejmenší tloušťku zkušebního tělesa za předpokladu, že je 1,5násobkem délky úhlopříčky vtisku. Požadovaná nejmenší tloušťka je dána průsečíkem na její stupnici (stupnice 2) s přímkou spojující hodnotu zkušebního zatížení (pravá stupnice) a hodnotu tvrdosti (levá stupnice).

Provedení zkoušky

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

Jednotlivé vtisky musí být umístěny tak aby byla splněna podmínka, že vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenosti středů každého vtisku od okraje zkušebního vzorku musí být

nejméně 2,5násobek průměrné hodnoty úhlopříček vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.

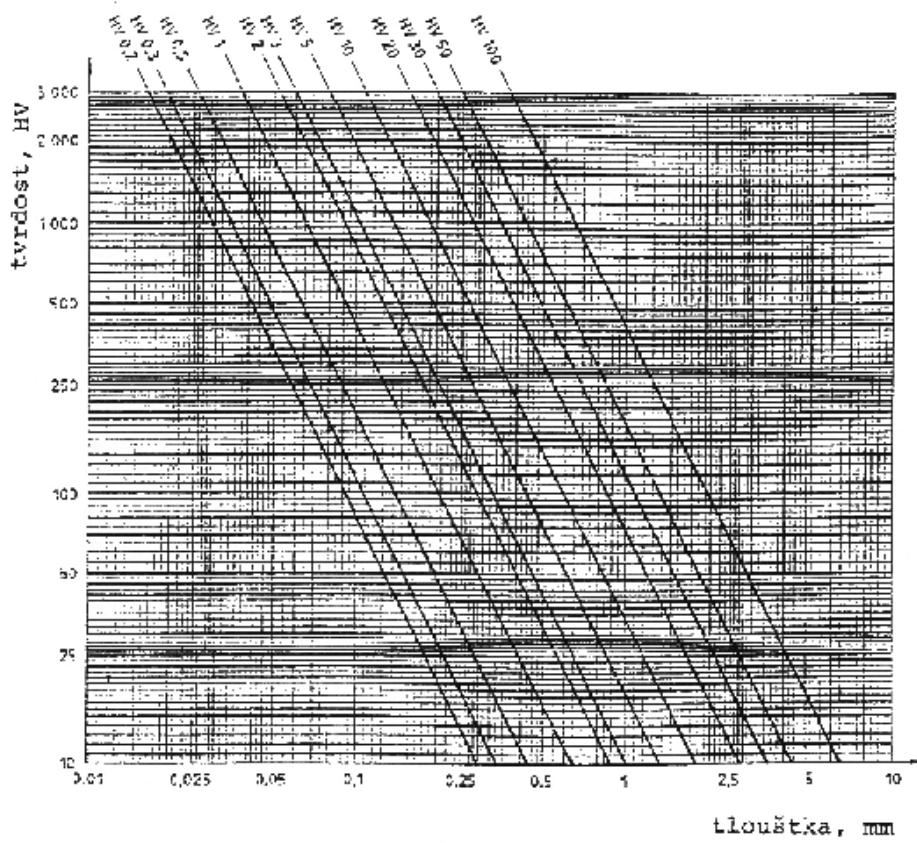
Tabulka 2 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení 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 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
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

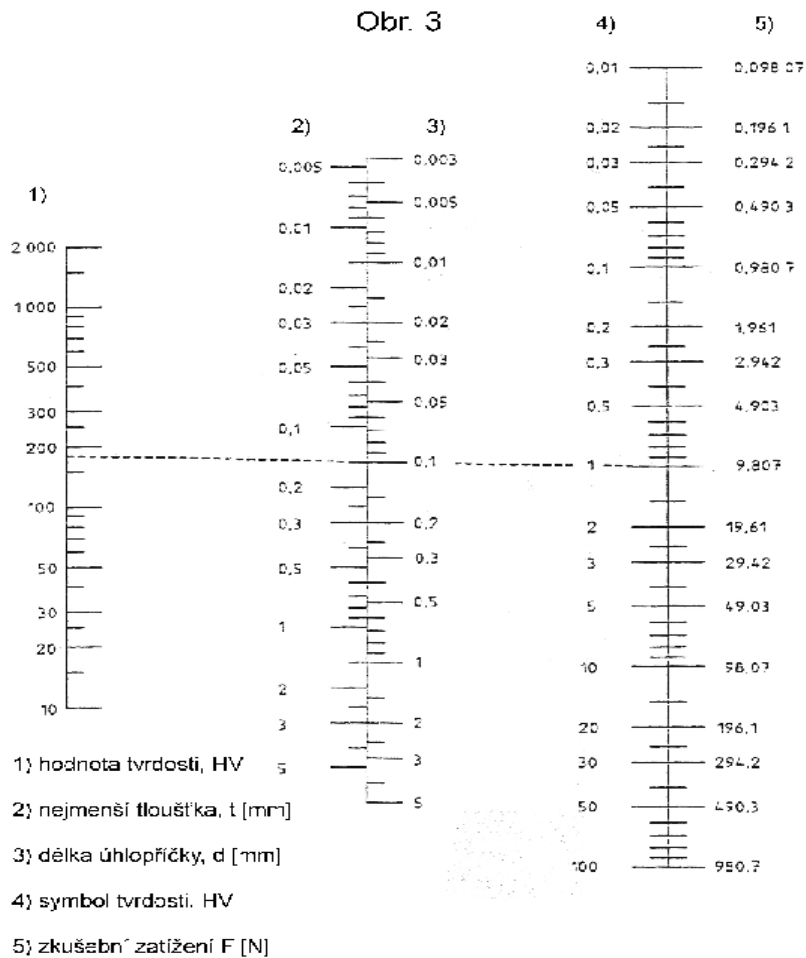
Zajímavost:

Vzhledem k nutnosti velmi přesného měření úhlopříček vtisku musí být zajištěn přesný tvar vnikajícího tělesa (indentoru). Jak již bylo uvedeno vnikajícím tělesem podle Vickerse je diamant pravidelného čtyřbokého jehlanu. Vrcholový úhel mezi protilehlými stěnami musí být $(136 \pm 0,5)^\circ$. Tento úhel se ověřuje dvoukruhovým goniometrem o přiměřené přesnosti. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být vzhledem k ose vnikajícího tělesa skloněny pod stejným úhlem (úhly se mohou lišit nejvýše o $0,5^\circ$) a musí se protínat v jednom bodě; délka společné hrany mezi dvěma protilehlými stěnami nesmí přesáhnout $0,5 \mu\text{m}$. Na [obrázku 4](#) je znázorněn obvyklý tvar vrcholu vnikajícího tělesa, jak se jeví při velkém zvětšení.

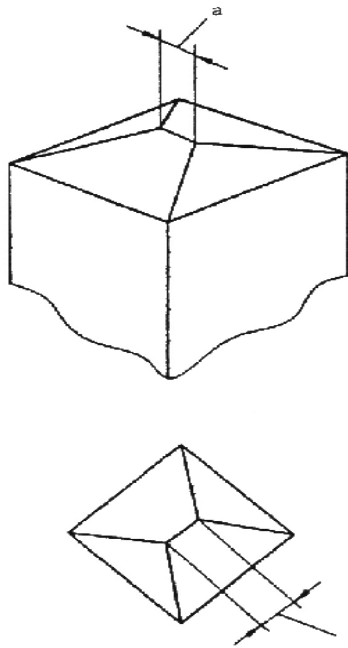
Obr. 2



Obr. 3



Obr. 4



a společná hrana o délce max. 0,5 μ m

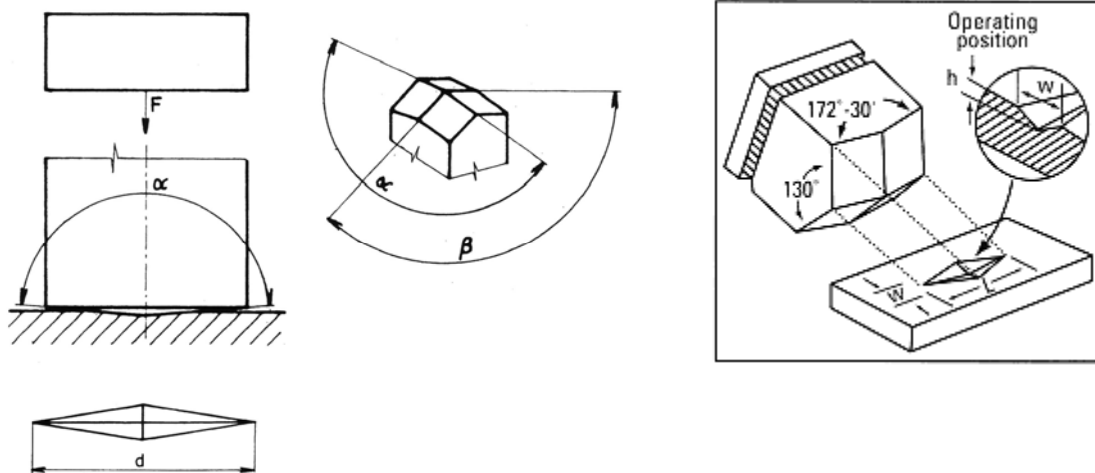
Mikrotvrdost dle Knoopa

Zkouška tvrdosti dle Knoopa

Zkouška tvrdosti dle Knoopa pro kovové materiály je předepsána mezinárodní normou ČSN ISO 4545, a zahrnuje zkušební zatížení do 9,807 N včetně.

Podstata zkoušky

Diamantové vnikající těleso ve tvaru jehlanu s kosočtverečnou základnou s předepsanými úhly protilehlých stran vtlačováno do povrchu zkušebního tělesa. Následně je měřena delší úhlopříčka vtisku, která zůstane po odlehčení zkušebního zatížení F (obr. 1).



Obr. 1 Podstata zkoušky tvrdosti dle Knoopa

Tvrdot dle Knoopa je následně vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku, jenž se uvažuje jako jehlan s kosočtverečnou základnou a s vrcholovými úhly rovnající se úhlům vnikajícího tělesa:

HK ... tvrdost dle Knoopa

$HK = \text{konstanta} \cdot \text{zkušební zatížení} / \text{plocha povrchu vtisku}$

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{d^2 \cdot c} = 0,102 \cdot \frac{F}{0,07028 \cdot d^2} = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2}$$

d ... délka delší úhlopříčky, v mm (obr.1)

F ... zkušební zatížení, v N

Konstanta ... $\frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} = 0,102$

Konstanta vnikajícího tělesa ... $c = \frac{\tan \beta / 2}{2 \cdot \tan \alpha / 2} = 0,07028$

Označování tvrdosti

Tvrdot dle Knoopa se označuje symbolem HK za nímž následuje číslice charakterizující velikost zkušebního zatížení a doba působení zkušebního zatížení v sekundách, liší-li se od předepsané doby (10-15 s):

Př.1: 640 HV 0,1 = tvrdost dle Knoopu 640 stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působícím po dobu od 10 do 15 s

Př.2: 640 HV 0,1/20 = tvrdost dle Knoopu 640 stanovená při zkušebním zatížení 0,9807 N působícím po dobu 20 s

Zkušební těleso

Obdobně jako při měření tvrdosti dle Vickerse musí být umožněno přesné měření delší úhlopříčky vtisku. Hodnocený zkušební vzorek musí mít hladký a rovný povrch, bez okují, mazadel a cizích tělísek. Hodnocený vzorek se tedy připravuje jako metalografický výbrus, tzn. nesmí dojít k deformačnímu nebo tepelnému ovlivnění povrchu. Běžně se příprava provádí broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. Přesná metodika přípravy vzorku se volí dle příslušného materiálu.

Provedení zkoušky

Zkušební těleso musí být uloženo na tuhé podložce, tak aby se během zkoušky nepohnulo. Vnikající těleso (indenter) se zatlačuje do zkušebního tělesa zkušebním zatížením (tab. 1) směřujícím kolmo k jeho povrchu. Doba od začátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s. Rychlost přibližování vnikajícího tělesa musí být v rozmezí od 15 $\mu\text{m/s}$ do 70 μm . Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s.

Jednotlivé vtisky musí být umístěné tak aby byla splněna podmínka, že vzdálenost středů dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3násobek kratší úhlopříčky vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 6násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin. Vzdálenosti středů každého vtisku od okraje zkušebního vzorku musí být nejméně 2,5násobek kratší úhlopříčky vtisku (pro ocel, měď a slitiny mědi) a nejméně 3násobek v případě lehkých kovů, olova, cínu a jejich slitin.

Zajímavost:

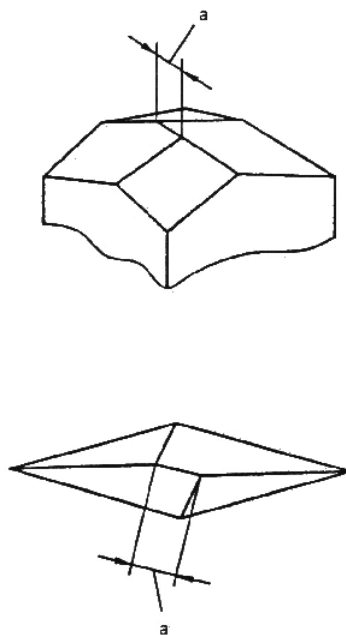
Stejně jako v případě tvrdosti dle Vickerse i u tvrdosti dle Knoopu musí být zajištěn přesný tvar vnikajícího tělesa (indentoru). Jak již bylo uvedeno vnikajícím tělesem podle Knoopu kolmý diamantový jehlan s kosočtvercovou podstavou. Vrcholové úhly mezi protilehlými stěnami musí být $(172,5 \pm 0,3)^\circ$ a $(130 \pm 0,3)^\circ$. Tyto úhly se ověřuje dvoukruhovým goniometrem o přiměřené přesnosti. Všechny čtyři stěny jehlanu musí být vzhledem k ose vnikajícího tělesa skloněny pod

stejným úhlem (úhly se mohou lišit nejvýše o $0,5^\circ$) a musí se protínat v jednom bodě; délka společné hrany mezi dvěma protilehlými stěnami nesmí přesáhnout $1,0 \mu\text{m}$. Na [obrázku 2](#) je znázorněn obvyklý tvar vrcholu vnikajícího tělesa, jak se jeví při velkém zvětšení.

Tabulka 1 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Knoop

Zkouška tvrdosti dle Knoop	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

Obr. 2



a společná hrana o délce max. $0,5 \mu\text{m}$

Měření mikrotvrdosti

Manuální

Manuální měření mikrotvrdosti dle Vickerse

Nejstarší používanou metodou (cca od 60 let minulého století) pro hodnocení mikrotvrdosti struktury kovů je manuální zkouška dle Hanemanna. Ta se provádí na metalografických mikroskopech Neophot ([obr. 1](#)) nebo Epityp ([obr. 2](#)). Zařízení ([obr. 3](#) – schéma + foto) se skládá ze dvou částí, které se instalují na metalografické mikroskopy:

- a) z mikrotvrdoměru D32 (princip dle Hanemanna) – [obr. 4](#) (schéma + foto)
- b) z měřicího okuláru ([obr. 5](#) – schéma + foto)

Popis mikrotvrdoměru D32

Konstrukce mikrotvrdoměru je patrná z obr.4. Do čelní čočky 2 je v ose vsazen diamantový jehlan 1 o vrcholovém úhlu 136° tak, že zůstává volný prostor ve tvaru mezikruží pro cestu světelných paprsků na osvětlení vzorku. Typ objektivu je Apochromát s použitým zvětšením 32x a číselnou aperturou 0,65. Objektiv není uchycen pevně, nýbrž je zavěšen mezi dvěma talířovými pružinami 3, které zajišťují jeho vedení paralelně s optickou osou. Působíme-li na diamantový hrot zátěžnou silou vzniká při tomto zavěšení pohyb. Zdvih představuje míru velikosti zátěžné síly. K měření velikosti pohybu slouží druhý optický systém tvořený pomocným objektivem 6, který je umístěn za hlavním zobrazovacím objektivem 4 v jeho opticky nevyužitém prostoru. Světlo do něj přichází ze světelného zdroje mikroskopu stejně jako do hlavního objektivu. Zrcadlem 5 je světlo odraženo na zatěžovací stupnici 12, která se zobrazí v okuláru. Pomocný a hlavní objektiv jsou pevně spojeny a spolu se pohybují, zatímco stupnice je pevně uchycena v pouzdru. Její obraz se přenáší do okuláru a ukazuje působení zatěžovací síly.

Výchylku na zatěžovací stupnici je možné zcejchovat a přesně definovat a změřit velikost zátěžné síly. Zařízení pro optické měření síly je vybaveno dvěma stavitelnými posuvy. Jeden slouží k výškovému přestavování zatěžovací stupnice a druhý k zaostření jejího obrazu. Posuvy se uvádějí do pohybu dvěma kroužky 7,8 se stavitelnými otvory na obvodu tvrdoměru. Spodní kroužek 8 ovlivní přes matici výškové přestavení držáku stupnice a tím nastavení počátku stupnice (nulového bodu). Horní kroužek 7 je spojený s excentrem 11, který působí na příčný pohyb stupnice a to změnou vzdálenosti mezi stupnicí a objektivem. Tímto pohybem dojde k zaostření stupnice.

Z důvodu zamezení rušivého chvění, které nastává při otřesech pružně zavěšeného objektivu, je prostor mezi dvěma talířovými pružinami vyplněn přesným množstvím umělého hedvábí. Tím se dosáhne účinného útlumu chvění. Přístroj je na spodní straně uzavřen proti vniknutí prachu korekční čočkou 9.

Popis měřicího okuláru

Základem je běžný měřicí mikrometrický okulár. Liší se od něj centrováním okuláru na tubusu a v provedení měřících destiček s ryskami. V měřícím okuláru jsou umístěny dvě destičky (pevná a pohyblivá). Na každé z nich je zobrazen přerušovanými ryskami pravý úhel.

Ve své nulové poloze vytvoří oba obrazce nitkový kříž ([obr.6a](#)) a v každé jiné měřicí poloze vytvoří čtverec ([obr. 6b](#)). Poslouží tedy k proměření vtisků čtvercového tvaru. Jedno celé otočení bubínku 3 se 100 dílky na číselné stupnici odpovídá 1 dílku na stupnici v zorném poli okuláru. Mikrometr je vybaven kompenzačním okulárem o zvětšení 15x. Proti normálním okulárům se liší umístěním clon.

Rozsah měření mikrotvrdoměru je výrazně omezen z důvodů citlivosti nastavení zátěžné síly, jejímu odečtení, přesnému odměření velikosti vtisku a zručnosti obsluhy. Dále ovlivňuje měření rozlišovací schopnost objektivu, kterým se snímá obraz vtisku. Velikost krystalů hraje rovněž rozhodující roli. Nejmenší zatěžovací síla, kterou je možno na mikrotvrdoměru vyvodit je asi $2 \cdot 10^{-3}$ N. Avšak takové malé silové působení nelze bezchybně změřit.

Postup měření mikrotvrdomosti:

- 1) zapnout osvětlení metalografického mikroskopu (Neophot nebo Epityp)
- 2) vycentrovat stolek mikroskopu a vsadit do něj sklíčko pro vzorky z příslušenství
- 3) vsadit mikrotvrdoměr a vycentrovat stolek vzhledem k jeho ose ([obr. 7](#))
- 4) vyjmout binokulární hlavici mikroskopu a nahradit ji tubusem
- 5) nasunout na tubus měřicí okulár s měřícím bubínkem vpravo a upevnit jej upínacím šroubem ([obr. 8](#))
- 6) pomocí závaží z příslušenství lze provést cejchování zatěžovací stupnice ([obr. 9](#))
- 7) zkontrolovat v zorném poli zatěžovací stupnici v mikrotvrdoměru a posunout ji do svislé pozice

- 8) otáčením bubínku nastavit v zorném poli okuláru měřící obrazec tvořený přerušovanými ryskami do polohy nitkového kříže([obr. 6b](#))
- 9) středícími šrouby na okuláru přesunout měřící obrazec do středové (nulové) polohy
- 10) přivřít a vycentrovat polní clonu mikroskopu
- 11) položit vzorek na stolek mikroskopu a upevnit jej ([obr. 10](#))
- 12) otevřít zcela aperturní clonu
- 13) otočit kolečko jemného ostření mikroskopu Neophot do středové polohy (u Epitypu do horní polohy)
- 14) zaostřit pozorovanou plochu vzorku a pohybem stolku najít měřené místo, na které přesuneme nitkový kříž měřícího okuláru
- 15) spustit opatrně stolek se vzorkem otáčením kolečka hrubého ostření až se objeví obrazec zatěžovací stupnice. Postavení průsečíku měřících rysek musí souhlasit s nulovou ryskou zatěžovací stupnice ([obr. 11](#))
- 16) zhotovit opatrně vtisk otáčením kolečka hrubého ostření požadovanou zátěžnou silou
- 17) velikost působící síly je dána počtem dílků na zatěžovací stupnici. Jejich přesný počet se stanoví podle cejchovací křivky, která je součástí vybavení mikroskopu
- 18) po výdrži 10s odlehčit zpětným otáčením kolečka hrubého ostření a zaostřit měřené místo na vzorku
- 19) nastavit pomocí středících šroubů okuláru nitkový kříž na střed vtisku
- 20) změřit velikost úhlopříčky vtisku pomocí středících šroubů i bubínku dle schéma na a to zjištěním počtu dílků na bubínku ([obr. 12](#))
- 21) pro přesné měření úhlopříčky vtisku se používá samostatný objektiv Apochromát se zvětšením 60x a číselnou aperturou 0,95.

Schématický postup celého měření mikrotvrdosti dle Hanemanna je uveden na [obr. 13](#).

Stanovení mikrotvrdosti dle Hanemanna

Mikrotvrdost HV se stanoví podle vztahu:

$$HV = 1854,4 \cdot \frac{F}{d^2}$$

F	...	zkušební zatížení, v N * 1,02 10 ²
d	...	aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2 v μm

$d_{1,2} = m \cdot \delta$... velikost úhlopříčky v μm
 m ... počet dílků na bubínku okuláru
 δ ... jmenovitá hodnota dílku

Zkušební zatížení

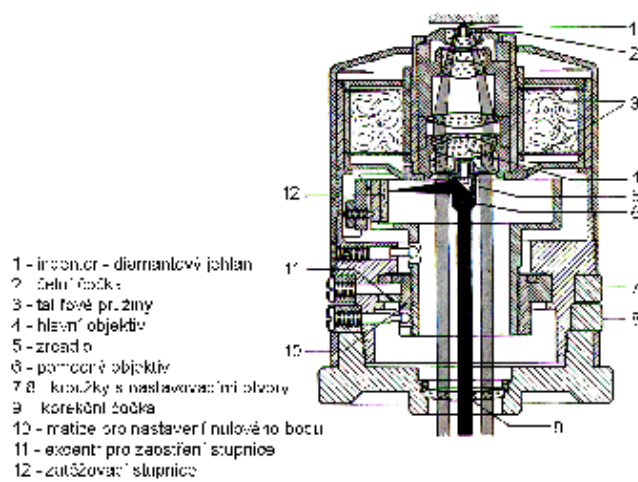
Zkušební zatížení pro zkoušku mikrotvrdomosti dle Vickerse na mikrotvrdoměru dle Hanemanna uvádí tab. 1. V porovnání s normovanou metodou lze měřit na tomto typu mikrotvrdoměru velmi nízké hodnoty (HV 0,005), ale chybí zde možnost měřit mikrotvrdomost HV 0,015 a HV 0,025.

Tabulka 2 Zkušební zatížení na mikrotvrdoměru dle Hanemanna

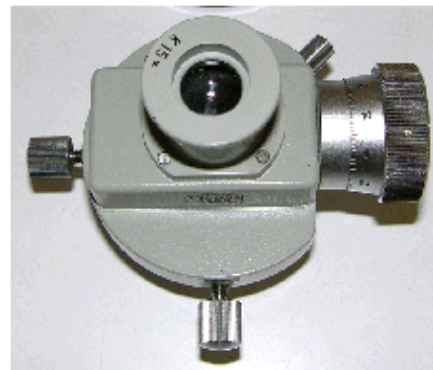
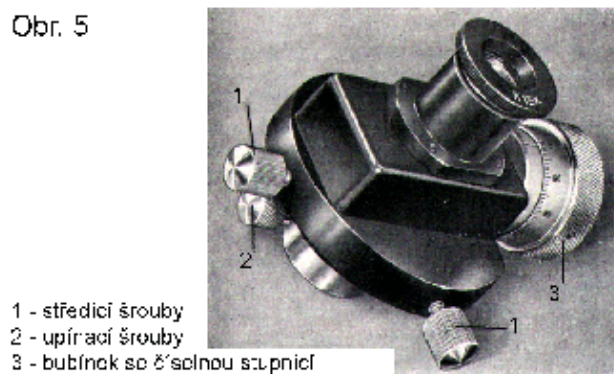
Zkouška mikrotvrdomosti		
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Hmotnost závaží [g] = zatížení [p]
HV 0,005	0,04903	5
HV 0,01	0,09807	10
HV 0,02	0,1961	20
HV 0,05	0,4903	50
HV 0,1	0,9807	100



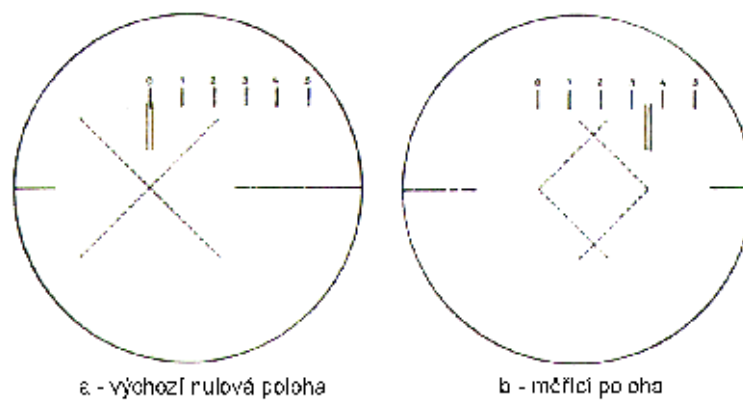
Obr. 4

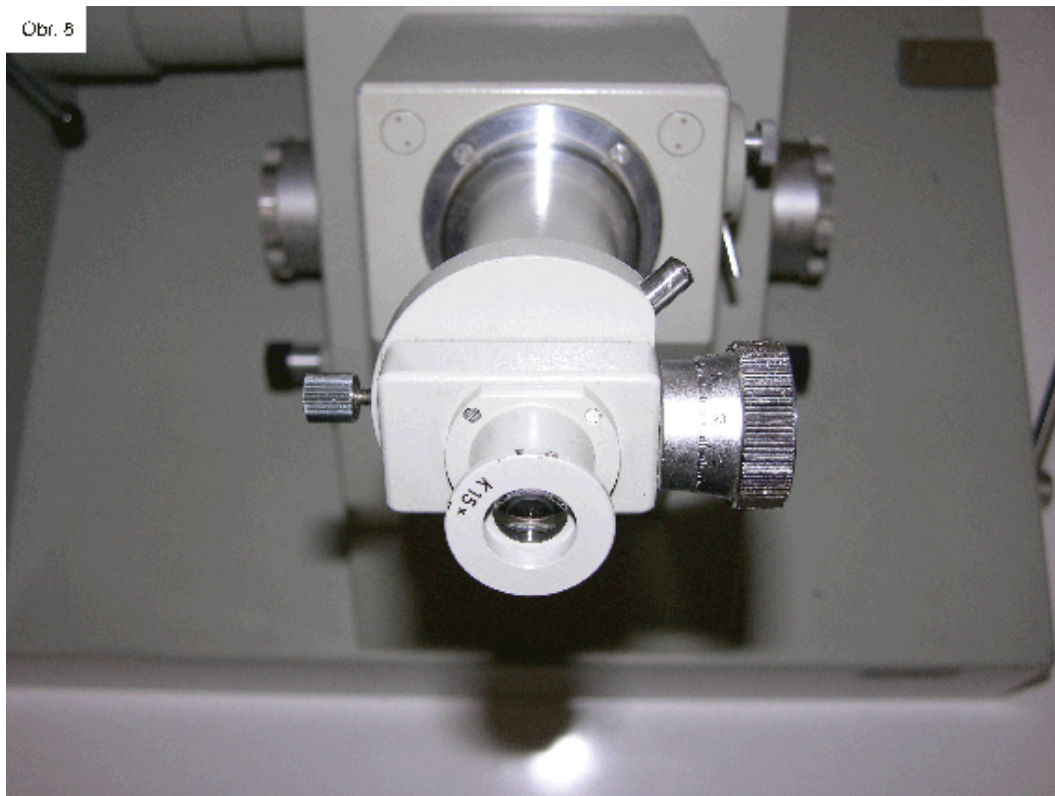
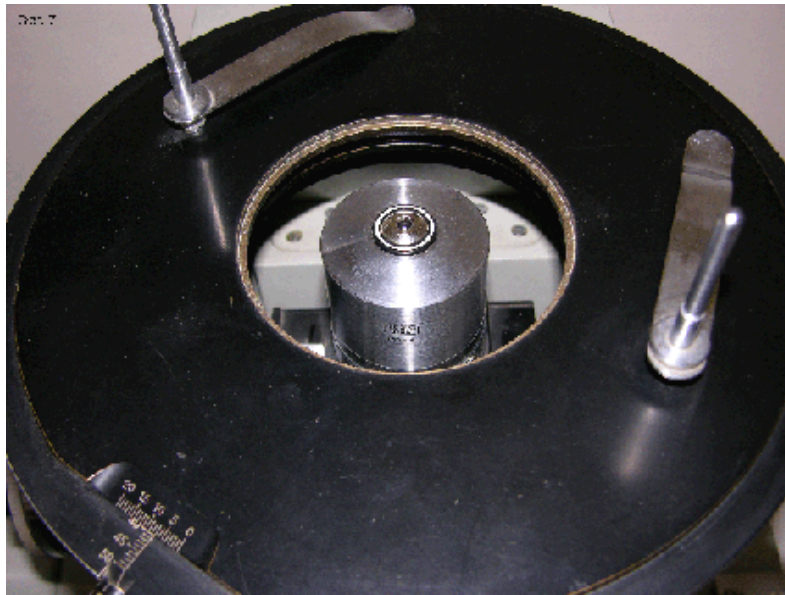


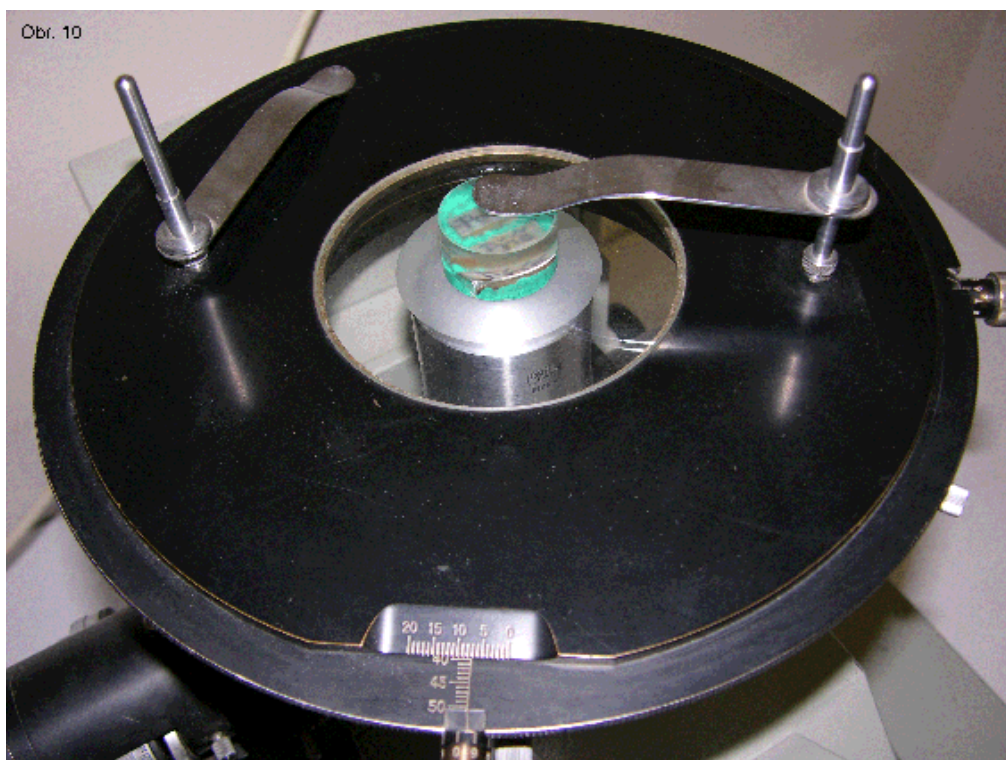
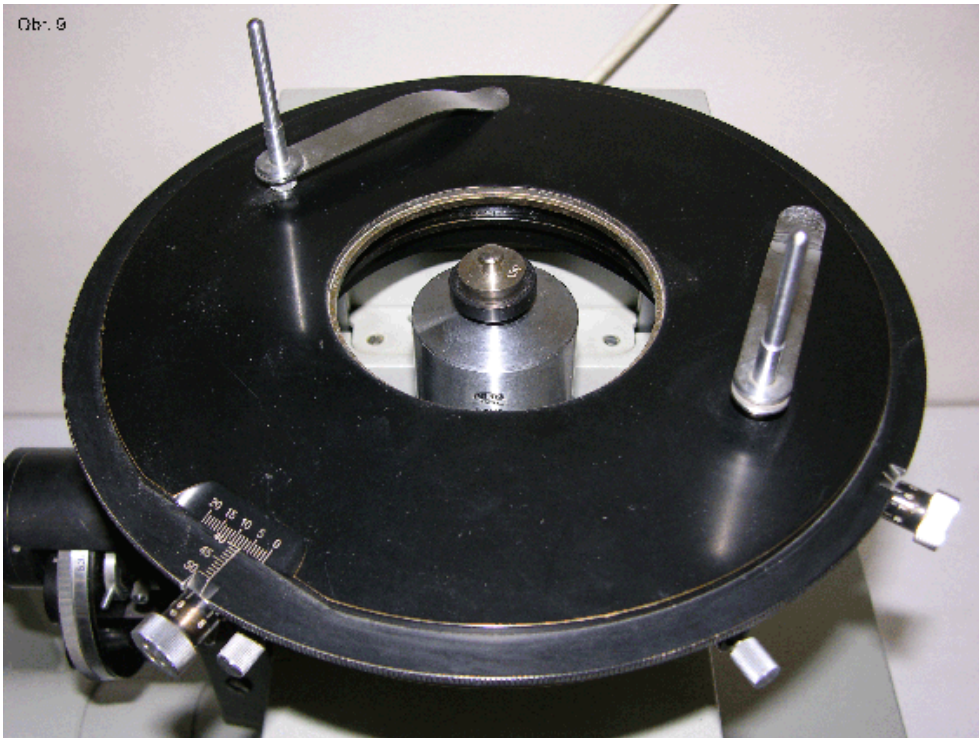
Obr. 5



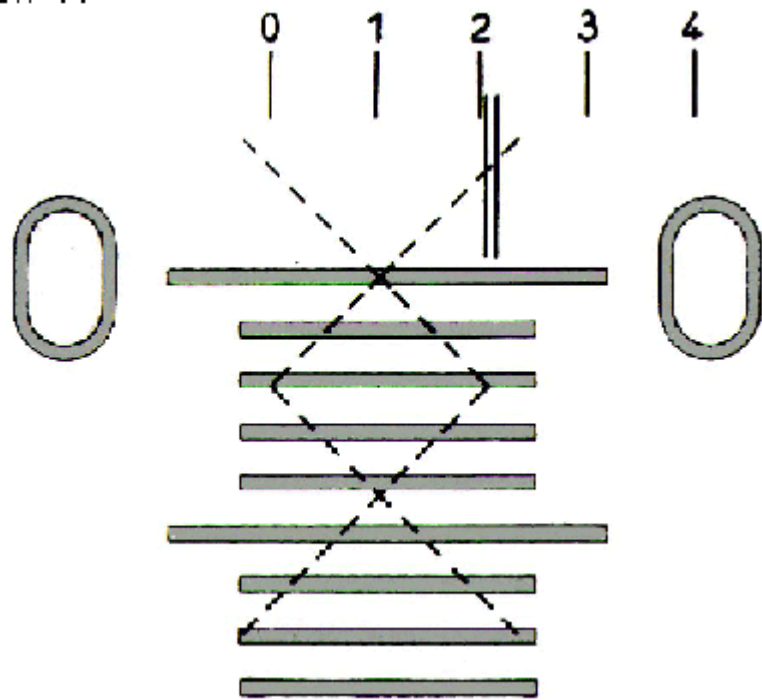
Obr. 6



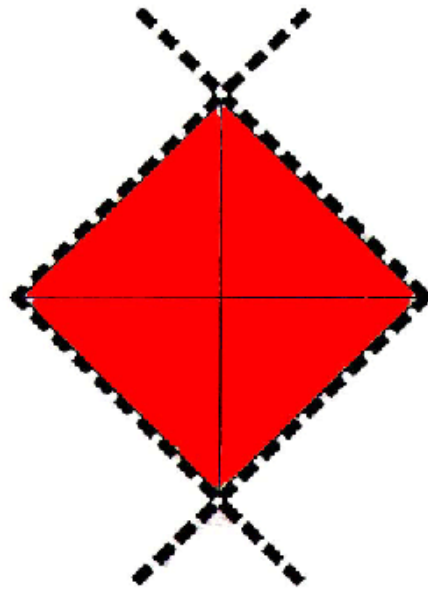




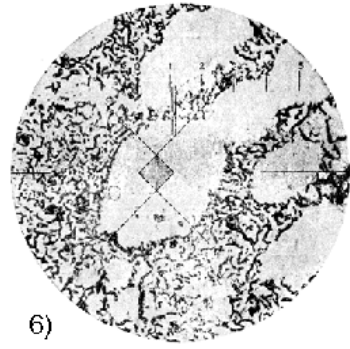
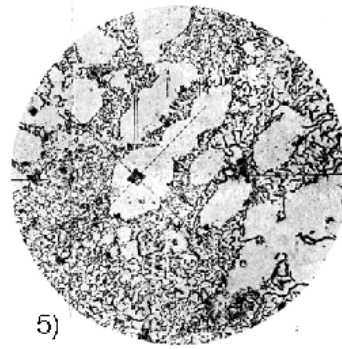
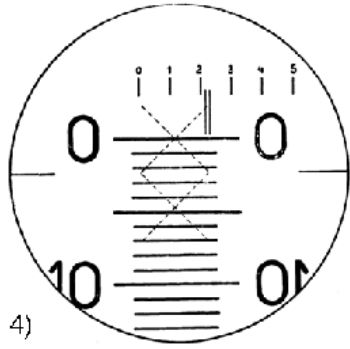
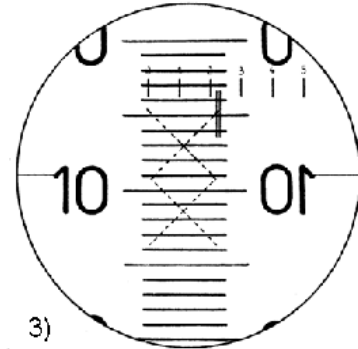
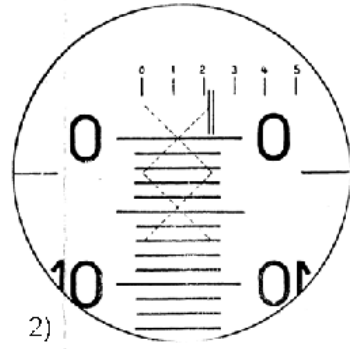
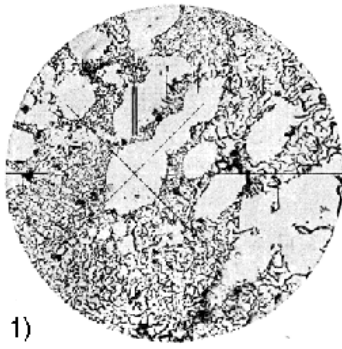
Obr. 11



Obr. 12



Obr. 13



Aplikační možnosti

Fáze a s strukturní složky

Mikrotvrdot strukturních složek a fází

Měření mikrotvrdoti strukturních složek a fází je jedním z důležitých nástrojů pro metalografii. Pomocí mikrotvrdoti lze poměrně přesně identifikovat a rozlišit jednotlivé strukturní součásti, jako např. dolní a horní bainit, nízko a vysokouhlíkový martenzit atd. [Tabulka 1](#) uvádí rozsah tvrdostí jednotlivých strukturních složek a fází ve slitinách Fe - Fe₃C.

[Tabulka 2](#) obsahuje typy karbidů, včetně prvků které jednotlivé karbidy tvoří a rozsah tvrdostí. Kapitola je doplněná o [tabulku 3](#), kde jsou uvedeny tvrdosti používaných brousících materiálů (ostřiva), včetně teplot tání.

Tabulka 1 Tvrdot strukturních složek a fází

Fáze a strukturní složky	Tvrdot dle Vickerse
Fe	85
Ferit	85 - 130
Austenit	120 - 180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200 - 250
Perlit jemný	250 - 300
Bainit horní	300 - 400
Bainit dolní	400 - 550
Martenzit nízkouhlíkový	600 - 700
Martenzit vysokouhlíkový	700 - 850

Tabulka 2 Tvrdot karbidů

Typ karbidu	Prvek	Tvrdot dle Vickerse, HV0,3
M ₃ C	Fe, Mn	950 - 1300
M ₂₃ C ₆	Cr	1000 - 1100
M ₇ C ₃	Cr	1600 - 1800
M ₆ C	W, V	1200 - 1300
MC	V	2100 - 2800
M ₂ C	Mo	1700 - 1900

Tabulka 3 Tvrdost brusiva a teplota tání

Brusivo	Mikrotvrdost dle Vickerse, HV 0,05	Teplota tání [K]
Diamant	8000	3 970
Karbid boru	3700	2 720
Karbid křemíku	3500	2 450
Karbid titanu	3200	3 400
Karbid zirkonu	2600	3 800
Karbid vanadu	2800	3 100
Karbid niobu	2400	3 730
Karbid tantalu	1800	4 150
Karbid chrómu	1300	2 170
Karbid molybdenu	1500	2 960
Karbid wolframu	2400	3 140

Svary kovových materiálů

Zkouška mikrotvrdosti svarových spojů kovových materiálů

Jednou z aplikačních možností posouzení vlastností svarových spojů kovových materiálů je hodnocení mikrotvrdosti. Tato metoda je předepsána normou ČSN EN 1043-2. Touto normou jsou specifikovány zkoušky mikrotvrdosti na příčných řezech svarových spojů kovových materiálů s vysokými gradienty tvrdosti. Zkoušky se provádějí pro stanovení nejvyšší a (nebo) nejnižší hodnoty tvrdosti jak základního materiálu tak i svarového kovu.

Pro hodnocení mikrotvrdosti svarových spojů kovových materiálů musí být zkušební vzorky odebírány způsobem zaručujícím, že nedojde k deformačnímu a tepelnému ovlivnění vzorku. Odběr zkušební vzorku je vhodné provést např. mechanickým řezáním s intenzivním chlazením a to zpravidla příčně na svarový spoj. Zkušební vzorek se dále připravuje obdobně jako klasický metalografický výbrus - broušením za mokra a leštěním diamantovými pastami. Pro přesné změření úhlopříček a jednotlivých oblastí svarového spoje je třeba zkušební vorek ve formě metalografického výbrusu vhodně upravit, např. naleptat. Leptání zkušební vzorku se provádí vhodnými činidly (leptadly v závislosti na materiálu základního a svarového kovu. Zkoušky mikrotvrdosti mohou být poté prováděny následujícími způsoby.

a) Zkoušení mikrotvrdomí řadou vtisků

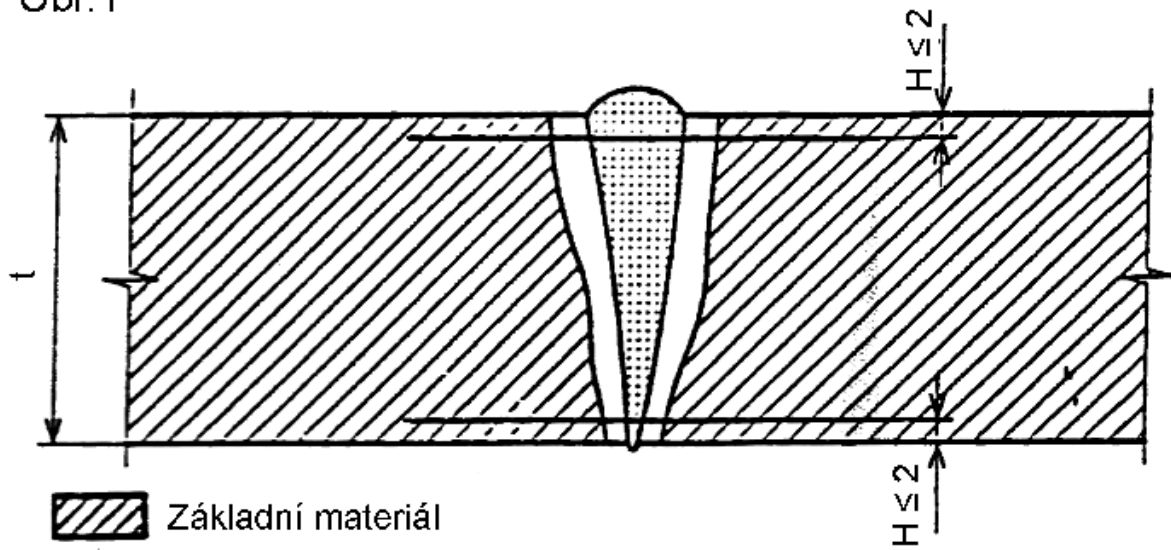
Tento způsob hodnocení využívá vtisky uskutečněné v řadách umístěných v dané vzdálenosti od povrchu ([obr. 1](#)). Dle požadavků lze také provést doplňkové řady vtisků a (nebo) měnit jejich umístění. Počet a rozmístění vtisků musí být voleno tak, aby bylo možno určit oblasti se zvýšenou nebo sníženou tvrdostí vzniklé v důsledku svařování. Řada vtisků musí být tedy umístěna tak, aby měření mikrotvrdomí bylo provedeno v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a svarovém kovu. Doporučená vzdálenost jednotlivých vtisků je v případě kovů na bázi železa 0,2 mm (pro tvrdost HV0,1), v případě hliníku, mědi a jejich slitin 0,6 ÷ 2,0 mm (opět pro HV0,1). Doporučené vzdálenosti pro jiné stupnice tvrdosti (HV1, HV5) jsou specifikovány v citované normě.


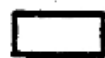

V případě kovů, které v důsledku svařování zvyšují tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) je nutné provést v této oblasti dva dodatečné vtisky ve vzdálenosti menší než 0,5 mm mezi středem vtisku a tavným rozhraním ([obr. 2](#)).

b) Zkoušení mikrotvrdomí jednotlivými vtisky

V případě tohoto hodnocení svarového spoje se umisťují jednotlivé vtisky do jednotlivých oblastí ([obr. 3](#)). Skupina vtisků 1÷4 informuje o tvrdosti v tepelně neovlivněné oblasti základního materiálu, skupina 5÷8 v oblasti tepelně ovlivněné (TOO) a skupina 9÷11 ve svarovém kovu. V případě kovů zvyšující tvrdost v TOO se opět provádí nejméně jeden vtisk ve vzdálenosti menší než 0,5 mm mezi středem vtisku a tavným rozhraním. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky nesmí být menší než 2,5násobek střední úhlopříčky nejbližšího vtisku, aby nedošlo k ovlivnění tvrdosti zkušebního vzorku deformací provedeným vtiskem.

Obr. 1

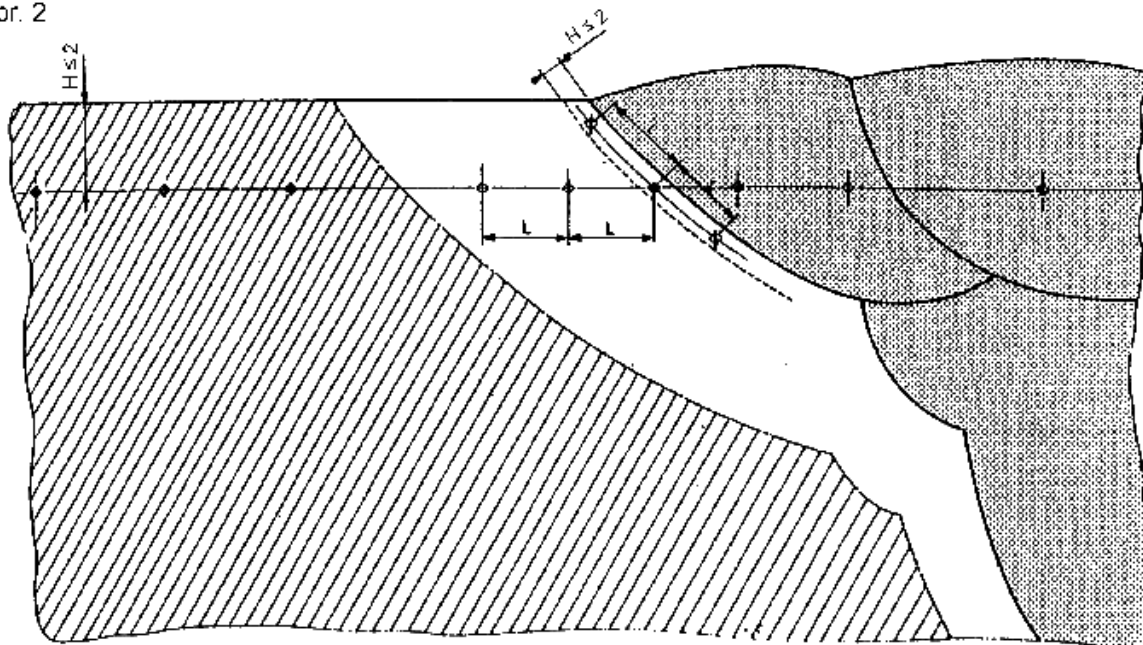





-  Základní materiál
-  Tepelně ovlivněná oblast
-  Svarový kov

t - Tloušťka zkušebního vzorku, mm

H - Vzdálenost středů vtisků od povrchu, mm

Obr. 2

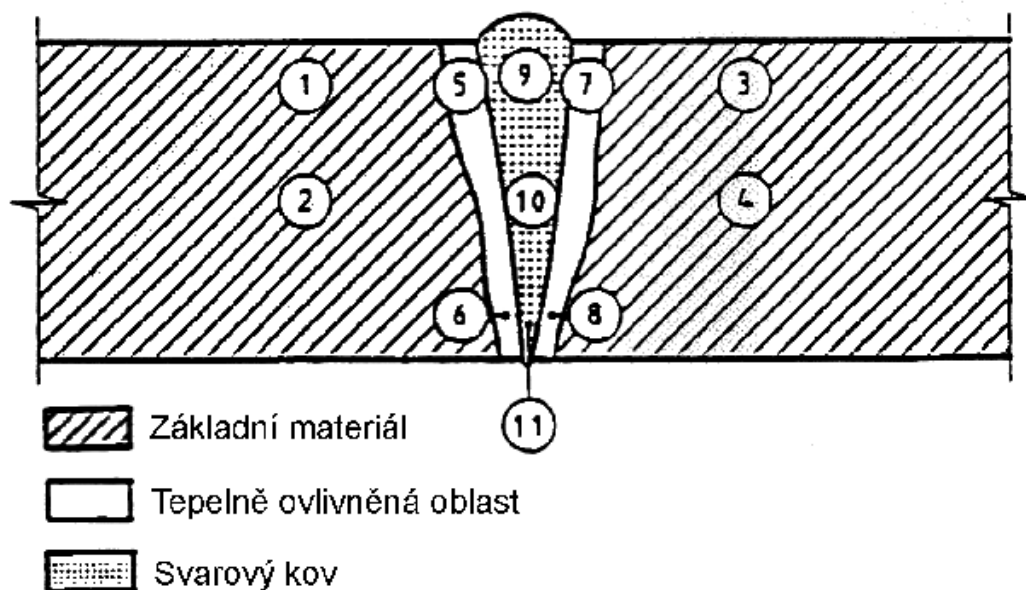


-  Základní materiál
-  Tepelně ovlivněná oblast
-  Svarový kov

L - Vzdálenost středů vtisků v TOO, mm

H - Vzdálenost středů vtisků od povrchu, mm

Obr. 3



Svary odporové, výstupkové a švové

Zkoušení tvrdosti podle Vickerse odporových bodových, výstupkových a švových svarů (nízké zatížení a mikrotvrdost)

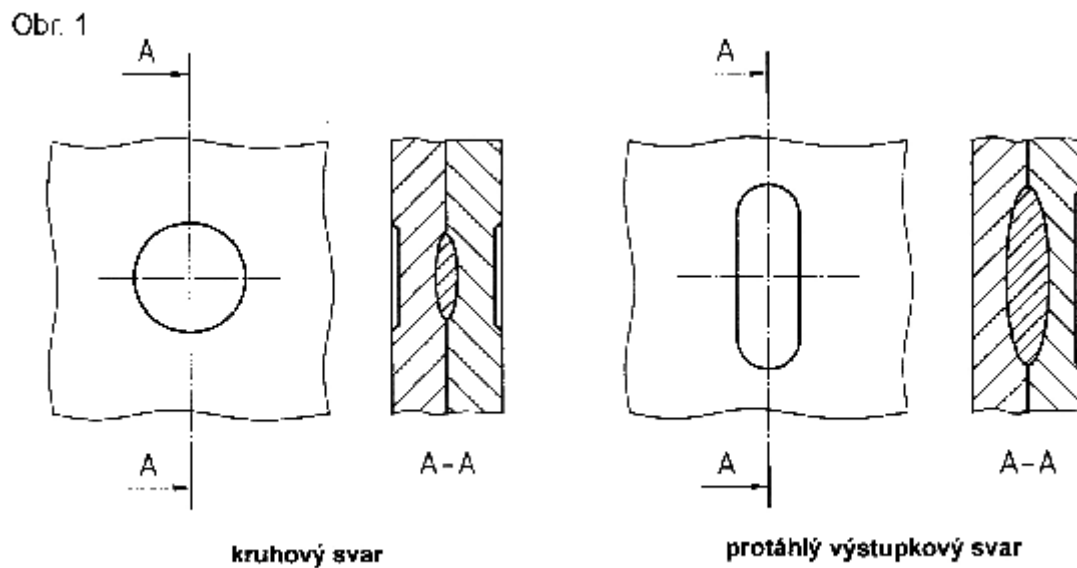
Hodnocení mikrotvrdosti lze využít i při hodnocení vlastností odporových bodových, výstupkových a švových svarů. Toto hodnocení mikrotvrdosti předepisuje norma EN ISO 14271. Uvedená evropská norma stanovuje postupy pro zkoušení tvrdosti naleptaných řezů svarových spojů s cílem stanovení tvrdosti dle Vickerse (při nízkém zatížení nebo v rozsahu mikrotvrdosti) ve svarové čočce, tepelně ovlivněné oblasti a základním materiálu u svarů provedených na plechách tloušťky $\geq 0,5$ mm. V případě zkoušky s nízkým zatížením se musí použít zátěžná síla 1,961N nebo 1,96N (HV0,2 nebo HV1), v případě zkoušky mikrotvrdosti musí být použita síla 0,98N (HV0,1)

Zkoušky tvrdosti a mikrotvrdosti musí být prováděny na zkušebních tělesech s příčným řezem přes svar, přičemž řez musí být veden v rovině jdoucí přes střed roztavené čočky ([obr. 1](#)). V případě protáhlé svarové čočky (švové svary) musí být řez veden kolmo k povrchu plechu ve směru podélné osy svarů ([obr. 2](#)). Zkušební tělesa musí být opět připravena do forma metalografického výbrusu a naleptána pro zvýraznění struktury jednotlivých oblastí svarového spoje.

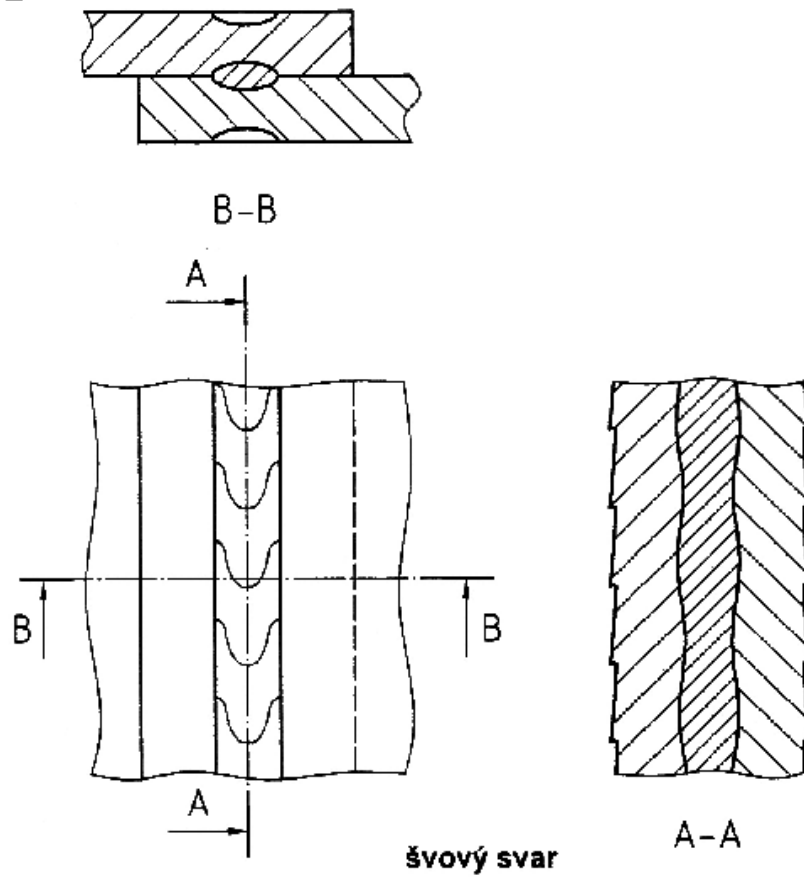
Při zkoušce tvrdosti podle Vickerse (rozsah nízkého zatížení – HV0,1 a HV1) jsou zásady pro umístění vtisků pro hodnocení jednotlivých oblastí svarového spoje (základní

materiál, TOO a svarová čočka) patrné z [obr. 3](#). Mimo základní měření může být hodnocení doplněno měřením na zvláštních místech. Vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků musí být nejméně 3násobek střední úhlopříčky (v případě oceli, mědi a jejich slitin) a 6násobek v případě lehkých kovů (olova, cínu a jejich slitin). Vzdálenost mezi středem vtisku a hranou zkušebního kusu musí být nejméně 2,5násobek střední úhlopříčky (v případě oceli, mědi a jejich slitin) a 5násobek v případě lehkých kovů (olova, cínu a jejich slitin).

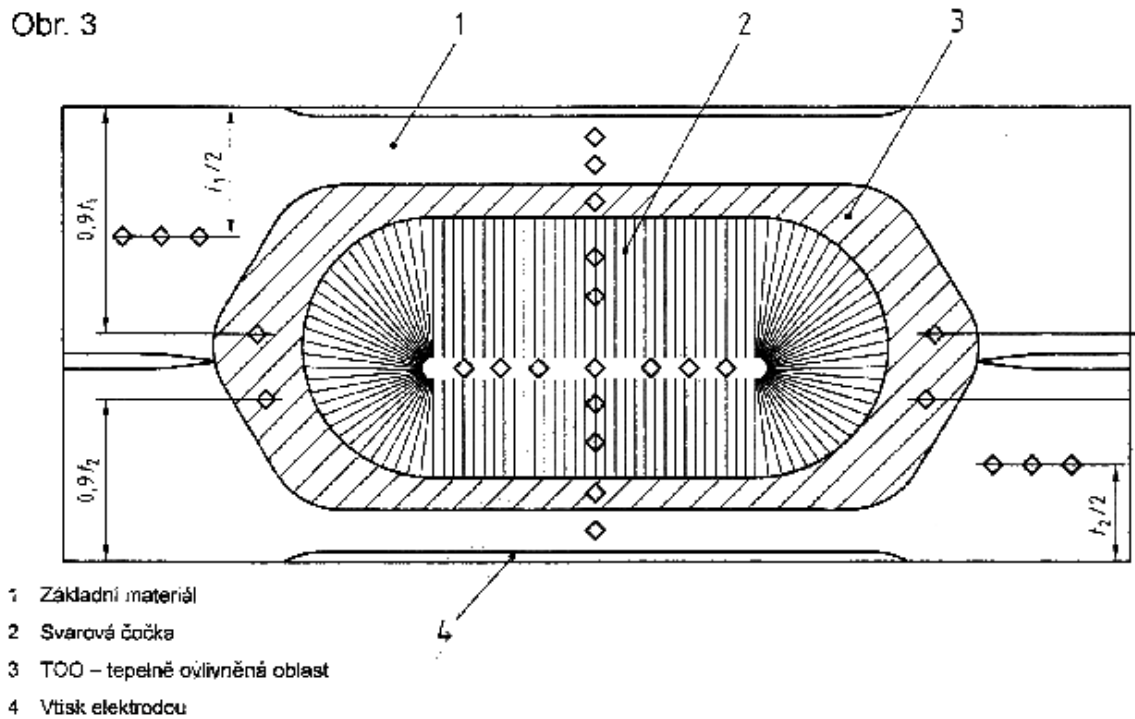
Při zkoušce mikrotvrdoti (HV0,1) se vtisky umísťují v závislosti na zkoušených oblastech a dle schválené dohody zúčastněných stran.



Obr. 2



Obr. 3



Kovové a jiné anorganické povlaky

Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky mikrotvrdomosti podle Vickerse a podle Knoopu

Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse a Knoopu je jednou z nejzákladnějších metodou pro hodnocení kovových a jiných anorganických povlaků. Použití zkoušky mikrotvrdomosti těchto povlaků předepisuje mezinárodní norma ČSN ISO 4516. Uvedenou metodu lze všeobecně použít, jestliže je třeba snížit zkušební zatížení pod hodnotu 10N, např. u elektrolyticky vyloučených povlaků, autokatalytických povlaků, stříkaných povlaků a anodicky oxidovaných povlaků na hliníku. Měření lze provádět dvěma způsoby:

- a) kolmo k povrchu povlaku
- b) na příčném řezu

Hodnocení mikrotvrdomosti závisí na použitém zatížení více než je tomu při měření tvrdosti (tzn. při zatížení nad 10N). Pro získání co nejpřesnějších hodnot mikrotvrdomosti povlaku se musí použít **nejvyšší** zatížení přípustná pro danou zkoušku povlaku ([obr. 1](#)). V následující tabulce je uveden všeobecný návod pro volbu zkušebních zatížení v závislosti na materiálu a tvrdosti povlaku. V důsledku řady činitelů včetně anizotropie se na zkušebních vzorcích musí označit místo provedení měření.

Tabulka 1 Všeobecný návod pro výběr zkušebních zatížení

Materiál	Zkušební zatížení (F)	
	N	Podmínky zkoušky
Povlaky o tvrdosti větší než 300 HV (HK)	0,981	HV 1 nebo HK 1
Tvrde anodické oxidové povlaky na hliníku	0,490	HV 0,05 nebo HK 0,05
Materiály o tvrdosti menší než 300 HV (HK), např. drahé kovy a jejich slitiny, a tenké povlaky obecně	0,245	HV 0,025 nebo HK 0,025

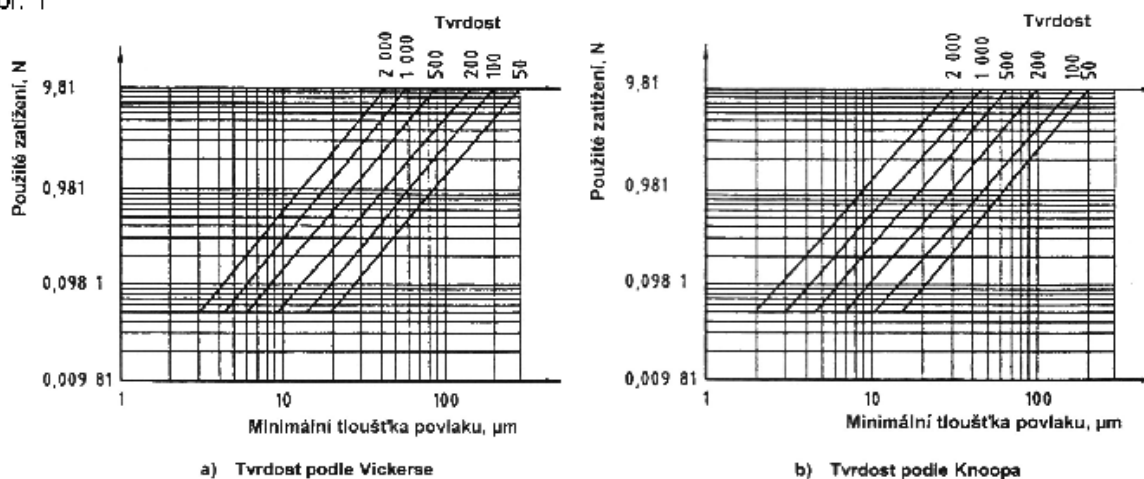
Vzhledem k povaze zkoušky mikrotvrdomosti povlaků je třeba klást velký důraz na drsnost zkoušeného povrchu. V případě, že zkoušený povrch je drsný, může být problematické přesné změření úhlopříček vtisku. To je také jeden z důvodů proč je mikrotvrdomost nejčastěji měřena na příčném řezu povlakem. Vzorek s drsným povrchem lze před měřením vyleštit (chemicky, elektrochemicky nebo mechanicky). Při mechanickém leštění je nutné zabránit tepelnému nebo deformačnímu zpevnění, což by významnou měrou ovlivnilo naměřenou mikrotvrdomost u povlaků náchylných k mechanickému zpevnění.

Jak již bylo v úvodu zmíněno, zkouška tvrdosti (mikrotvrdosti) lze provádět na příčném řezu povlakem, nebo na samotném povrchu, pokud charakteristiky povlaku (drsnost, tloušťka atd.) dovolují přesné změření úhlopříček (úhlopříčky) vtisku.

Měření na příčném řezu podle Vickerse musí být tloušťka povlaku dostatečně velká, tedy u měkkých povlaků nejméně 100 μm (pro HV 0,025) a u tvrdých povlaků nejméně 80 μm (pro HV 0,1). Při použití vnikajícího tělesa podle Knoopa musí být tloušťka u měkkých povlaků nejméně 40 μm (pro tvrdost < 300 HK) a u tvrdých povlaků nejméně 25 μm (pro tvrdost >HV 0,1). Tento předpis odpovídá přibližně 0,6násobku délky delší úhlopříčky.

U metody měření kolmo k povrchu povlaku musíme znát tloušťku povlaku, aby výsledná tvrdost nebyla ovlivněna materiálem pod hodnoceným povlakem. Tloušťku povlaku je tedy nutné změřit v souladu s metodou popsanou v normě ČSN EN ISO 1463 (Kovové a oxidové povlaky - Měření tloušťky povlaku - Mikroskopická metoda). Působící zatížení při měření kolmo k povrchu musí být tedy menší než 1/10 tloušťky povlaku (obr. 1). V případě měření dle Vickerse to odpovídá nejméně 1,4 násobek průměru délek obou úhlopříček a při zkoušce dle Knoopa nejméně 0,35násobek délky delší úhlopříčky vtisku. Minimální tloušťka povlaku musí být pro oba způsoby hodnocení 15 μm ..

Obr. 1



Chemicko - tepelné zpracování

Stanovení a ověření hloubky cementace

Stanovení hloubky cementace měřením průběhu tvrdosti je nejpřesnější a zároveň nejpoužívanější metodou. Hloubku cementace a specifikace metody stanovení této hloubky je uvedena v mezinárodní normě ČSN EN ISO 2639 (Ocel-Stanovení a ověření hloubky cementace). Norma platí pro:

- a) cementované a nitrocementované vrstvy;
- b) části, které po tepelném zpracování na konečnou tvrdost nedosahují ve vzdálenosti od povrchu rovné trojnásobku trojnásobku hloubky cementace tvrdost 450 HV1

Pokud tyto podmínky nejsou splněny, je hloubka cementace definována zvláštní dohodou. U ocelí, které ve zkoušené části a nevzdálenosti od povrchu rovné trojnásobku hloubky cementace vykazují tvrdost převyšující 450 HV1, se toto kritérium může použít za předpokladu, že pro hloubku cementace se zvolí mezní hodnota tvrdosti převyšující 550 HV1.

Poznámka:

Ve srovnání s předchozí normou tato platná norma podrobněji popisuje nejpřesnější metodu založenou na přímém měření průběhu tvrdosti na kolmém příčném výbrusu k povrchu součásti. Norma je doplněna kromě metody dle Vickerse, též metodu dle Knoopu.

Hloubka cementace (nauhličená a kalená vrstva) je kolmá vzdálenost mezi povrchem a vrstvou, ve které je tvrdost 550 HV1 nebo ekvivalentní tvrdost dle Knoopu. Hloubka cementace se označuje písmeny CHD a vyjadřuje se v milimetrech:

Př.1: CHD = 0,8 mm

Na základě dohody se může použít měření tvrdosti podle Vickerse v rozsahu od HV 0,5 (4,903 N) do HV 1 (9,807N). Též se může použít i jiná mezní hodnota než 550 HV1. Při použití jiného zatížení nebo jiné mezní tvrdosti se musí vyznačit za písmeny CHD:

Př.2: CHD 515 HV5

Stanovení hloubky cementace

Hloubka cementace se stanoví z gradientu tvrdosti na příčném výbrusu kolmém k povrchu. Lze ji odvodit graficky z křivky znázorňující změnu tvrdosti jako funkci vzdálenosti od povrchu součásti. Měření se provádí na příčném výbrusu součásti v předepsaných podmínkách. Při přípravě vzorku nesmí dojít k deformačnímu a tepelnému ovlivnění hodnocené části. Vzorek se běžně připravuje broušením za mokra a leštěním na diamantových pastách, případně elektroleštěním. Při přípravě je třeba dbát na to, aby nedošlo k zaoblení hran povrchu.

Při měření průběhu mikrotvrdosti se vtisky provádí podél jedné nebo několika rovnoběžných přímek kolmých k povrchu, ležících v pásu o šířce $W = 1,5 \text{ mm}$ ([obr. 1](#)). Vzdálenost, S , mezi sousedními vtisky musí být nejméně 2,5 násobek jejich úhlopříčky. Rozdíl mezi vzdálenostmi jednotlivých vtisků od povrchu (např. $a_2 - a_1$) nesmí přesáhnout 0,1 mm.

Zkušební vtisky se provádí se zatížením od HV 0,1 (0,9807 N) do HV 1 (9,807 N) nebo vtisky dle Knoopu, u kterých se poté proměří úhlopříčka vtisku a to nejméně při 400násobném zvětšení.

Měření se provádí ve dvou nebo více pásech a výsledky pro každý pás se zpracovávají graficky tak, aby se získaly křivky vyjadřující změny tvrdosti jako funkci vzdálenosti od povrchu.

Ze dvou sestavených křivek se pro každý pás stanoví vzdálenost od povrchu součásti, ve které je tvrdost rovna 550 HV nebo ekvivalentní hodnotě tvrdosti dle Knoopu. Tato vzdálenost reprezentuje hloubku cementace v pásu. Jestliže rozdíl mezi těmito dvěma hodnotami nepřevýší 0,1 mm, vyjádří se hloubka cementace jako průměr těchto dvou vzdáleností. Jestliže rozdíl zmíněných dvou hodnot překročí 0,1 mm, zkouška se opakuje.

Ověření hloubky cementace

Pokud je hloubka cementace předepsaná, může se k jejímu ověření použít následující interpolační metoda. V přechodové oblasti, kde se nachází konečná pozice hloubky cementace ve smyslu definice této mezinárodní normy, lze gradient tvrdosti přibližně vyjádřit přímkou.

Na kolmém příčném výbrusu zkoušené části se v každé vzdálenosti d_1 a d_2 od povrchu, která se nachází pod a nad hodnotou předepsané hloubky cementace ([obr. 2](#)), provede nejméně pět vtisků. Hodnota d_1 a d_2 nesmí převýšit 0,3 mm.

Hloubka cementace je následně vyjádřena rovnicí:

$$CHD = d_1 + \frac{(d_2 - d_1) \cdot (\overline{H_1} - H_S)}{\overline{H_1} - H_2}$$

H_S ... předeepsaná tvrdost

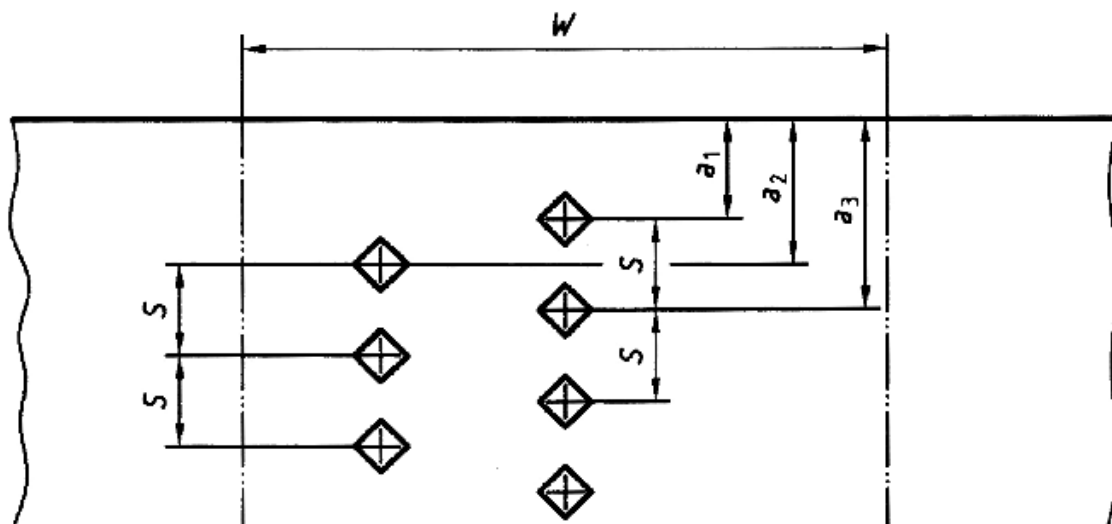
$\overline{H_1}, \overline{H_2}$... aritmetické průměry hodnot tvrdosti měřených ve vzdálenostech d_1 a d_2

Schématický popis interpolační metody je uveden na [obrázku 3](#).

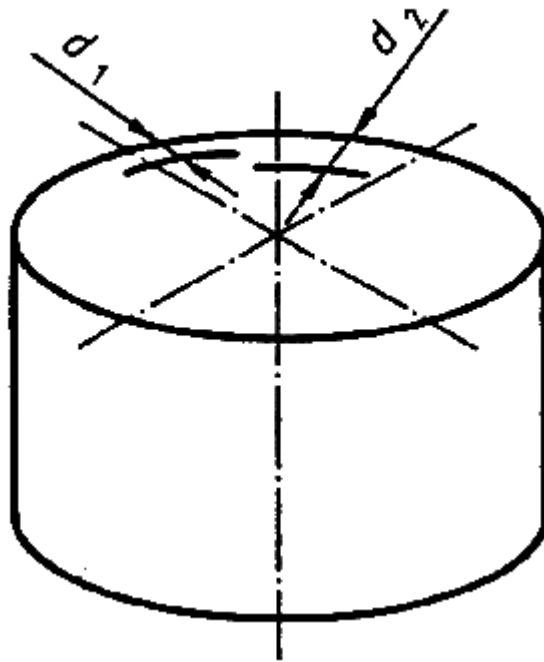
Poznámka:

V případě použití této interpolační metody se doporučuje měřit tvrdost bezprostředně pod povrchem. Jestliže bude v podpovrchové vrstvě nadměrné množství zbytkového austenitu, může tvrdost v této oblasti ležet pod kritickou úrovní 550 HV.

Obr. 1

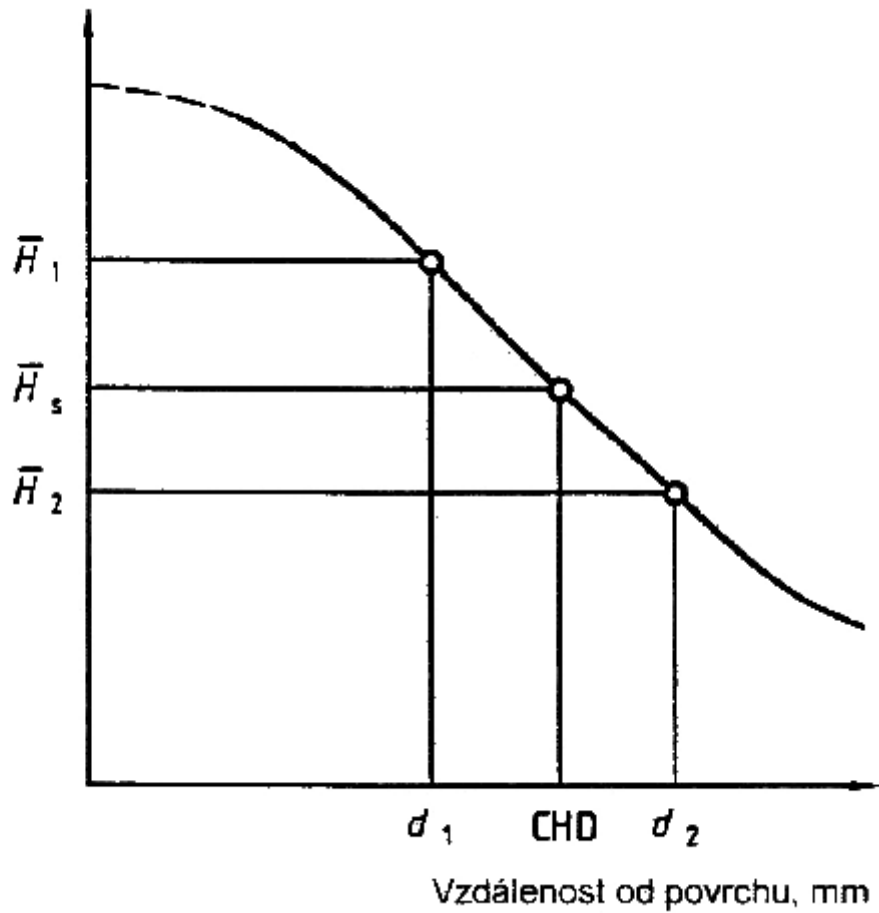


Obr. 2



Obr. 3

Tvrđost podle Vickerse nebo
ekvivalentní tvrđost podle Knoopa



Literatura a odkazy

Literatura a odkazy

Callister, W.D.Jr., *Material Science and Engineering an Introduction*, Sixth Edition, John Willey & Sons, New York, 2003, pp. 111 - 163. ISBN 0-471-13576-3.

Zeisswerk Jenna: Mikrohärte - Prüfeinrichtung D 32

Seznam norem

ČSN EN ISO 4516: 2003. Kovové a jiné anorganické povlaky - Zkoušky dle mikrotvrdoti podle Vickerse a podle Knoopu. Praha: Český normalizační institut, 2003. 17 s.

ČSN EN ISO 2639: 2003. Ocel - Stanovení a ověření hloubky cementace. Praha: Český normalizační institut, 2003. 9 s.

ČSN EN ISO 14271: 2003. Zkoušení tvrdosti podle Vickerse odporových bodových, výstupkových a švových svarů (nízké zatížení a mikrotvrdot). Praha: Český normalizační institut, 2003. 11 s.

ČSN EN ISO 898-1: 2000. Mechanické vlastnosti spojovacích součástí z uhlíkové a legované oceli - Část 1: Šrouby. Praha: Český normalizační institut, 2000. 32 s.

ČSN EN ISO 6507-1: 1999. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 1999. 111 s.

ČSN EN ISO 1043: 1998. Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška tvrdosti - Část 2: Zkouška mikrotvrdoti svarových spojů. Praha: Český normalizační institut, 1998. 11 s.

ČSN EN ISO 4545: 1995. Zkouška tvrdosti podle Knoopu. Praha: Český normalizační institut, 1995. 8 s.