



Zjištění změny tvrdosti (mikrotvrdosti) v závislosti na deformaci materiálu

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jan Čechlovský**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Čechlovský**

Osobní číslo: **S13000038**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojní inženýrství**

Název tématu: **Zjištění změny tvrdosti (mikrotvrdosti) v závislosti na deformaci materiálu**

Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Mechanismy plastické deformace, vliv poruch krystalové mřížky na plastickou deformaci materiálu, zpevnění a odpevnění materiálu.
2. Rozdělení a popis zkoušek tvrdosti a mikrotvrdosti (zkouška tvrdosti podle Brinella, Rockwella, Vickerse atd.).
3. Experimentální zjištění plošného rozložení hodnot tvrdosti testovaného materiálu v závislosti na jeho deformaci.
4. Vyhodnocení výsledků měření a doporučení pro další výzkum.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran textu**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

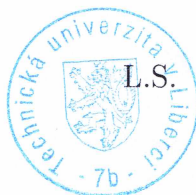
Seznam odborné literatury:

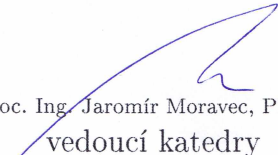
- [1] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademickénakladatelství CERM, 2003. s. 516. ISBN 80-7204-283-1.
[2] PTÁČEK, L. et al. *Nauka o materiálu II.* Brno: Akademickénakladatelství CERM, 1999. s. 350. ISBN 80-7204-130-4.
[3] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation.* 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
[4] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 20 s. Třídící znak 42 0359.
[5] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006. 22 s. Třídící znak 42 0374.
[6] ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 24 s. Třídící znak 42 0360.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval při tvorbě této bakalářské práce. Poděkování patří také mé rodině za podporu při studiu.

Název bakalářské práce:

Zjištění změny tvrdosti (mikrotvrdosti) v závislosti na deformaci materiálu

Anotace

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jak velký vliv má deformační zpevnění materiálu na hodnoty tvrdosti. Zejména bylo sledováno plošné rozložení tvrdosti na měřeném vzorku. V teoretické části jsou uvedeny základní mechanické zkoušky, základy o deformačním chování materiálu a poruchách krystalové mřížky. V experimentální části byly měřeny hodnoty tvrdosti a její plošné rozložení u předdeformovaných vzorků. Naměřené hodnoty byly následně zobrazeny v 3D grafech a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Mechanické zkoušky, zkoušky tvrdosti, deformace, deformační zpevnění materiálu, 3D graf

Title of the Bachelor's thesis:

Determination of the hardness (micro-hardness) change in dependence on the material deformation

Annotation

The aim of this bachelor thesis was to determine the influence of the material strain hardening on the hardness magnitudes. Mostly there was monitored the hardness surface distribution on the measured sample.

In the theoretical part are summarized the basic mechanical tests, deformation behavior of material and crystal lattice defects. In the experimental part were measured magnitudes of hardness and their surface distribution for undeformed and pre-deformed values. Measured values were subsequently displayed in the form of 3D surface color maps and evaluated.

Key words

Mechanical Tests, Hardness Tests, Deformation, Strain Hardening of Material, 3D Graph

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	7
1. Úvod	8
2. Teoretická část	9
2.1 Poruchy mřížek kovů	9
2.2 Deformace materiálu.....	10
2.3 Deformační zpevnění materiálu	11
2.4 Mechanické statické zkoušky materiálů.....	12
2.4.1 Statická zkouška tahem	12
2.4.2 Zkouška tlakem	16
2.4.3 Zkouška ohybem	16
2.4.4 Zkouška krutem	17
2.4.5 Zkouška stříhem (smykem).....	17
2.5 Měření tvrdosti	18
2.5.1 Vrypové zkoušky	18
2.5.2 Zkoušky vnikací	19
2.5.3 Zkoušky dynamické.....	23
3 Experimentální část	25
3.1 Materiál vzorků.....	25
3.2 Příprava vzorků pro měření tvrdosti.....	26
3.3 Měření tvrdosti	28
3.4 Výsledné hodnoty HV2	29
4 Vyhodnocení naměřených hodnot.....	36
5. Závěr	40
Seznam použité literatury	41
Přílohy	42

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Jednotky	Význam
\vec{b}	[1]	Burgersův vektor
A_{80mm}	[%]	Maximální tažnost
A_g	[%]	Homogenní tažnost
A_x	[%]	Tažnost
d	[mm]	Průměr vtisku
D	[mm]	Průměr vnikací kuličky
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
F	[N]	Zatěžující síla
F_{max}	[N]	Maximální zatěžující síla
l	[mm]	Délka po zkoušce
l_0	[mm]	Původní délka
M_k	[N.mm]	Krouticí moment
M_{omax}	[N.mm]	Maximální ohybový moment
R	[MPa]	Smluvní napětí
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
S	[mm ²]	Zatěžovaný průřez
S_0	[mm ²]	Počáteční plocha průřezu
S_u	[mm ²]	Plocha průřezu po přetržení
u	[mm]	Střední délka úhlopříčky
W_k	[mm ³]	Modul průřezu v krutu
W_0	[mm ³]	Modul průřezu v ohybu
Z	[%]	Kontrakce
Δl	[mm]	Prodloužení
Δl_F	[mm]	Maximální prodloužení po přetržení
ε	[1]	Poměrné prodloužení
σ	[MPa]	Napětí
σ_0	[MPa]	Napětí v ohybu
τ_k	[MPa]	Napětí v krutu
τ_s	[MPa]	Napětí ve smyku
φ	[1]	Skutečná (logaritmická) deformace

1. Úvod

Ve strojírenské praxi patří tvrdost mezi základní mechanické vlastnosti materiálů a bývá definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa. Z hodnot tvrdosti lze usuzovat u některých materiálů i na další mechanické vlastnosti jako je např. pevnost materiálu. I z tohoto důvodu je znalost hodnot tvrdosti a její změny v průběhu životnosti součástí velmi důležitá. Mezi velké výhody měření tvrdosti patří, že ji lze měřit přímo na hotových výrobcích a to bez jejich vážnějšího poškození. Metody pro měření tvrdosti jsou navíc metody nedestruktivní.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jak velký vliv má deformační zpevnění materiálu na hodnoty tvrdosti. Zejména bylo sledováno plošné rozložení tvrdosti na měřeném vzorku. Z hodnot tvrdosti a souřadnic bodů měření byly sestrojeny plošné 3D grafy.

Metod pro měření tvrdosti je mnoho, proto je velmi důležité zvolit vhodný způsob měření tvrdosti s ohledem na měřený materiál, požadovanou přesnost měření a kvalitu povrchu měřeného vzorku. Způsobů rozdělení metod pro měření tvrdosti je hodně. Lze je dělit podle toho, jak je vyvozována zatěžující síla na statické a dynamické nebo na vrypové, vnikací a odrazové. Nejčastěji se užívá druhé uvedené rozdělení. V dnešní době patří mezi nejpoužívanější metody pro měření tvrdosti metody vnikací, jako jsou např. měření tvrdosti podle Brinella, Rockwella, Vickerse atd. Příklad tvrdoměru pro vnikací zkoušky je na obr. 1.1. Způsoby měření tvrdosti lze také rozdělit podle účelu měření na měření makrotvrdosti a mikrotvrdosti. [1]



Obr. 1.1 Tvrdoměr Qness [2]

2. Teoretická část

V této části bakalářské práce jsou uvedeny základní mechanické zkoušky, kde velká část se věnuje zkouškám tvrdosti a jejich rozdělení. Jsou zde uvedeny také základy o deformačním chování materiálu a poruchách krystalové mřížky.

2.1 Poruchy mřížek kovů

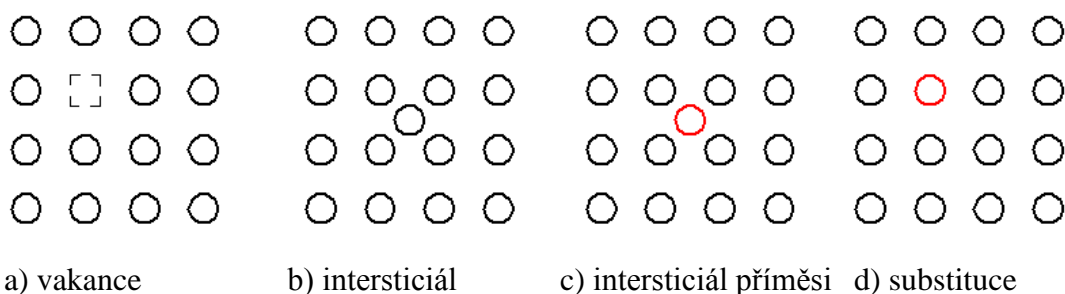
Kovy jsou charakteristické svou krystalovou stavbou (pravidelné uspořádání v prostoru). Kovy nemají ideální krystalovou stavbu, jejich mřížka obsahuje řadu poruch, které vznikají v mřížce během krystalizace, při jejich chladnutí a v průběhu technologického zpracování. Poruchy krystalické stavby kovů lze rozdělit na poruchy strukturní, chemické a elektrické. Pro technickou praxi mají největší význam poruchy strukturní.

Strukturní poruchy mřížek

Strukturní poruchy jsou odchylky v uspořádání částic v uzlových bodech krystalové mřížky. Mřížkovými poruchami se vysvětlují některé vlastnosti kovů jako je např. difuze nebo podstatně menší hodnota pevnosti, než by měl kov bez mřížkových poruch. Strukturní poruchy lze podle geometrického tvaru rozdělit na poruchy bodové, čarové (dislokace), plošné (rovinné) a objemové. [3]

Bodové poruchy

Bodové poruchy jsou nejjednodušší poruchy, které se týkají pouze uzlového bodu krystalické mřížky. Mezi základní bodové poruchy patří vakance, intersticiál, intersticiál příměsi a substituce (obr. 2.1). Vakance je prázdný, neobsazený uzlový bod struktury. Intersticiál je atom vlastního kovu, který leží uvnitř struktury (v neuzlové poloze). Intersticiál příměsi je cizí atom, který leží v neuzlové poloze. Substituce je atom příměsi, který leží v uzlové poloze kovu. Bodové poruchy umožňují zejména pohyb atomů mřížkou (difuzi). [1]



Obr. 2.1 Bodové poruchy

Čárové poruchy (dislokace)

Dislokace je řada atomů, která vykazuje jiné uspořádání než jiné části v krystalické mřížce. Dislokace představují porušení pravidelného uspořádání částic. Dislokace mají zásadní význam při deformaci materiálu, zejména jeho zpevnění při tváření. Dislokace lze definovat pomocí Burgersova vektoru \vec{b} , dislokační čáry a roviny kluzu. Burgersova smyčka je v neporušené části krystalové mřížky uzavřena a v porušené části otevřená. Burgersův vektor \vec{b} , je vektor potřebný k uzavření Burgersovy smyčky, která je vedena okolo dislokace z mřížkových vektorů. Dislokace se rozdělují na dislokace šroubové a dislokace hranové. U hranové dislokace je Burgersův vektor kolmý na dislokační čáru. U šroubové dislokace je Burgersův vektor rovnoběžný s dislokační čárou. [1, 4]

Plošné (rovinné) poruchy

Mezi plošné poruchy patří vrstvené chyby, hranice podzrn a hranice zrn. Vrstvená chyba je chybou v pravidelném uspořádání krystalografických rovin. Hranice podzrn se objevuje u masivních monokrystalů, které jsou složeny z bloků (subzrn) s nepatrně odlišnou orientací krystalové mřížky. Hranice zrn je pásmo několika atomových průměrů, ve kterém poloha alespoň některých atomů neodpovídá uzlům ani jednoho ze sousedních zrn. [4]

Objemové poruchy

Objemové poruchy jsou poruchy, které zaujímají v krystalu určitý objem. Obecně se jedná o dutiny, které mohou vznikat v materiálu při tuhnutí taveniny a vznikají také například z důvodu přítomnosti plynů. Tyto dutiny pak mají kulový tvar a jejich povrch bývá hladký. V materiálu můžeme také pozorovat mikrodutiny, které vznikají shlukováním vakancí. [3]

2.2 Deformace materiálu

Deformace je reakce tuhých těles na vnější zatížení a je tedy důsledkem vzájemného působení vnějších zatěžujících sil a vnitřních sil v tělese. Deformaci lze rozdělit na pružnou (elastickou) a trvalou (plastickou). Mezi základní mechanismy trvalé deformace patří skluz dislokací a dvojčatění. Převládající mechanismus je vždy ten, který za daných podmínek potřebuje pro svoji realizaci menší energii (za běžných podmínek skluz).

Elastická (pružná) deformace

Při elastické deformaci dochází působením vnějších sil k vychýlení atomů z rovnovážné pozice. Po odlehčení dojde vlivem působení vnitřních sil k vrácení atomů zpět do rovnovážné pozice. Těleso získá opět původní tvar. Mezi pružnou deformací a napětím je přímá úměrnost, kterou popisuje Hookeův zákon.

Plastická (trvalá) deformace

Pokud dále roste zatěžující síla a deformace se dostane mimo oblast platnosti Hookeova zákona, dochází k trvalé deformaci. Tato deformace po odlehčení zůstává. K trvalé deformaci dochází pohybem dislokací, které se pohybují, dokud nenarazí na překážku. Touto překážkou může být například hranice zrn, další dislokace nebo nečistota. Vlivem plastické deformace se navíc hustota dislokací zvětšuje a dochází ke zpevnění materiálu. Nejčastějším způsobem pohybu dislokací je skluz. Doplnkový mechanismus plastické deformace je dvojčatění. Plastická deformace má zásadní význam při tváření kovů. [1]

Skluz dislokací

Skluz dislokací se nejvíce podílí na deformaci materiálu. V deformovaném kovovém materiálu je i po velké deformaci zachováno pravidelné uspořádání atomů v mřížce. Deformační posuvy se následně uskutečňují podél určitých krystalografických rovin. Posuvy jsou o celé násobky vzdálenosti atomů. Plastická deformace se neuskutečňuje posuvem všech atomů v aktivní skluzové rovině. Dochází k porušování vazeb atomů pouze v těsném okolí. Skluz nastává v rovinách, které jsou nejvíce obsazeny atomy, a ve směrech, ve kterých jsou atomy nejbližší u sebe. Pokud se dislokace vlivem vnějšího napětí dostanou na povrch krystalu, dojde k posunu o mřížkový parametr. Pokud se na povrch dostane velké množství dislokací, dojde k makroskopické deformaci. [4]

Dvojčatění

Dvojčatění je druhý nejvýznamnější mechanismus plastické deformace. K dvojčatění dochází při vyšších rychlostech deformace a nízkých teplotách. Tyto podmínky nastávají např. při tváření výbuchem. Dvě části krystalu se posunou tak, že jsou vůči sobě v určité rovině v zrcadlové symetrii. Rovinu symetrie nazýváme rovinou dvojčatění.

2.3 Deformační zpevnění materiálu

Deformační zpevnění materiálu nastává, pokud kovový materiál podrobíme plastické deformaci. Tento stav nastává například při tváření za studena. Tváření za studena se uskutečňuje pod teplotou rekrystalizace. Při plastické deformaci roste hustota dislokací a zhoršuje se tedy jejich pohyb. Dislokace si začnou vzájemně bránit v pohybu a dojde k deformačnímu zpevnění materiálu. Deformačně zpevněný materiál je charakteristický zvýšením meze kluzu, pevnosti a tvrdosti. Zároveň dojde ke snížení tažnosti, kontrakce a houževnatosti. Při tváření za tepla dochází také ke zpevnění materiálu, ale současně vlivem teploty dochází i k jeho odpevnění, které převládá. [1]

Odpeňovací pochody v kovech

Pokud je deformační zpevnění materiálu nežádoucí, například pokud chceme dále tvářet za studena, je nutné provést odpevnění. Odpevnění se provádí vyžiháním deformačně zpevněného kovu při dostatečně vysoké teplotě. Odpeňovací pochody mají dvě fáze a to zotavení a rekrystalizaci

Při zotavení začne docházet ke zmenšování hustoty čárových poruch. Vlivem anihilace (vyrušení) dislokací dojde ke snížení hustoty dislokací a dislokace začnou také zaujímat energeticky výhodnější pozice. Tento jev se nazývá polygonizace.

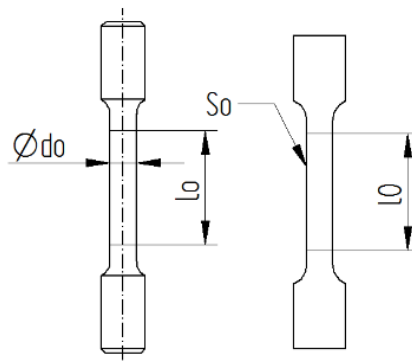
Při dalším zvýšení teploty nastává po zotavení primární rekrystalizace. Průběh primární rekrystalizace lze rozdělit na nukleaci zárodků a růst nových zrn. Růstem nových zrn dojde k nahrazení původní deformační struktury novou nedeformovanou. Důležitým parametrem rekrystalizovaného kovu je velikost zrna. Pokud byl kov před rekrystalizací dostatečně tvářen, vzniká v jejím průběhu velké množství zárodků a vyžiháný kov má jemnozrnnou strukturu. Po malé deformaci nevznikne tolik zárodků zrn a výsledná struktura hrubne. [1,5]

2.4 Mechanické statické zkoušky materiálů

Statickou zkouškou se rozumí zkouška, při které zkoušený materiál (vzorek) je zatěžován stálým nebo pomalu spojitě se měnícím zatížením. Nejčastěji se zatěžuje zkoušený vzorek jednou až do porušení. Bývá měřena zatěžující síla a odpovídající deformace. Statické zkoušky bývají rozdělovány nejčastěji podle druhu namáhání zkušební vzorku na zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem.

2.4.1 Statická zkouška tahem

Tato zkouška patří mezi základní mechanické zkoušky. Pomocí tahové zkoušky zjišťujeme základní mechanické vlastnosti materiálu. Z tohoto důvodu se provádí téměř u všech technických materiálů. Zkouška se převážně neprovádí na hotových výrobcích, ale na zkušební vzorku. Zkušební vzorek bývá jednoduchého tvaru, který je normalizován. Vzorky bývají kruhové nebo ploché. Nejčastěji používané délky plochých tyčí jsou 50, 80, 100 a 120 mm. V průběhu zkoušky je tyč zatěžována plynule rostoucí silou, která narůstá do té doby, než dojde k úplnému porušení vzorku. V průběhu zkoušky jsou zaznamenávány hodnoty síly a prodloužení zkušební tyče. Pomocí trhací zkoušky jsou zjišťovány zejména hodnoty meze pevnosti v tahu R_m [MPa], poměrného prodloužení ϵ [%], absolutního prodloužení Δl [mm], tažnosti A_x [%] a kontrakce Z [%]. Lze také odečíst meze úměrnosti a kluzu. V průběhu tahové zkoušky v průřezu zkušební tyče vzniká napětí, které je definováno jako podíl zatěžující síly a plochy průřezu. Průřez trhací tyče se v průběhu zkoušky mění. Podíl zatěžující síly a skutečné plochy průřezu se nazývá skutečným napětím. Obvykle se pracuje s hodnotami smluvního napětí, které je dáno jako podíl zatěžující síly F [N] a původní plochy průřezu S_0 [mm²].



Obr. 2.2 Zkušební tyče pro zkoušku tahem

Trhací stroje v průběhu zkoušky zaznamenávají závislost absolutního prodloužení Δl [mm] na zatěžující síle F [N]. Závislost absolutního prodloužení na zatěžující síle se nazývá pracovní diagram. Závislost poměrného prodloužení na smluvním napětí se nazývá smluvní diagram. [1, 6]

Poměrné prodloužení ϵ [%], tažnost A_x [%] a kontrakce Z [%]

Poměrné prodloužení ϵ [%] je dáno podílem přírůstku délky a původní délky viz vzorec 1. Podobně je definována tažnost. Tažnost je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech ve

specifických bodech, jedná se o mez pevnosti a okamžik porušení vzorku. Obecně tažnost udává, jak je daný materiál tvárný. Na výslednou hodnotu tažnosti má vliv délka zkušební tyče. U kratších vzorků se jeví tažnost jako větší a proto u hodnot tažnosti bývá index x, který udává, jestli byla získána na krátké nebo dlouhé zkušební tyči.

Kontrakce Z [%] neboli zúžení profilu je dána rozdílem ploch průřezu před a po zkoušce děleného původní plochou průřezu. U křehkých materiálů dojde k porušení téměř bez kontrakce. Kontrakce je ukazatelem tvárnosti a houževnatosti materiálu při prostorové napjatosti. Houževnatost lze popsat jako práci spotřebovanou k plastickému přetvoření. K hrubému posouzení houževnatosti a chování materiálu při plastické deformaci lze použít plochu pod křivkou v pracovním diagramu. [1, 7]

Poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l-l_0}{l_0} \quad [1] \quad (1)$$

Kde:

Δl - prodloužení [mm]

l_0 - původní délka [mm]

l - délka po zkoušce [mm]

Tažnost

$$A_x = \frac{\Delta l_F}{l_0} \cdot 100 = \frac{l-l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Kde:

Δl_F - maximální prodloužení po přetržení [mm]

U tažnosti index x značí, na jaké zkušební tyči byla získána.

Kontrakce

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Kde:

S_0 - počáteční plocha průřezu [mm²]

S_u - plocha průřezu po přetržení [mm²]

Mez pevnosti v tahu R_m , smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ a mez úměrnosti

Pevnost v tahu R_m , neboli mez pevnosti v tahu je dána hodnotou smluvního napětí, které je dáno podílem maximální zatěžující síly způsobující porušení a původní plochy průřezu.

Mezí kluzu se rozumí smluvní napětí, při kterém se zkušební tyč začne výrazně prodlužovat bez nárůstu zatěžující síly. Tato hodnota u některých materiálů bývá v grafu

velmi špatně čitelná. U takových materiálů je stanovena takzvaná smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Smluvní mez kluzu je napětí, které vyvolá trvalé prodloužení zkušební tyče, nejčastěji to je 0,2%.

Mez úměrnosti ohraničuje oblast pružných (elastických) deformací materiálu. Do této hodnoty smluvního napětí platí Hookeův zákon, tedy platí přímá úměrnost mezi napětím a prodloužením. V dalším průběhu zkoušky tato úměrnost přestává platit. [1, 7, 8]

Mez pevnosti

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Kde:

F_{max} - maximální zatěžující síla [N]

S_0 - původní průřez zkušební tyče [mm²]

Hookeův zákon

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Kde:

σ - napětí v tahu [MPa]

E - modul pružnosti v tahu [MPa]

ε - poměrné prodloužení [1]

Skutečná deformace a skutečné napětí

U velkých deformací dochází k značné odlišnosti okamžitého stavu zatěženého tělesa a výchozího stavu, proto vyjádření poměrnou deformací a smluvním napětím není dostatečně výstižné a přesné. Proto se používá skutečná deformace a skutečné napětí. [1]

Skutečná deformace

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad [1] \quad (6)$$

φ - skutečná (logaritmická) deformace [1]

ε - poměrné prodloužení [1]

Skutečné napětí

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

σ - skutečné napětí [MPa]

R - smluvní napětí [MPa]

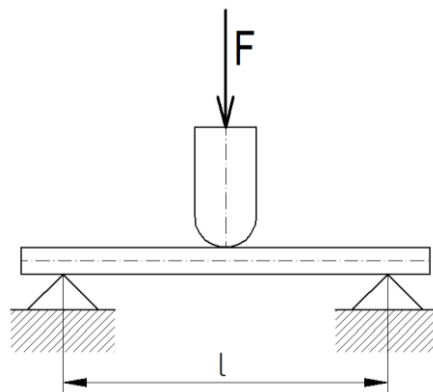
ε - poměrné prodloužení [1]

2.4.2 Zkouška tlakem

Tato zkouška se provádí zejména pro křehké materiály a materiály namáhané na tlak např. stavební hmoty, ložiskové kovy, litiny apod. U ocelí tato zkouška nebývá nutná, protože hodnoty meze kluzu a úměrnosti jsou přibližně stejné. Zkušební tělesa bývají nejčastěji válečky, které se postupně zatěžují. Zatěžování pokračuje do té doby, než se zkušební vzorky stlačí o stanovenou hodnotu nebo se rozdrťí. U velmi křehkých materiálů dochází k porušení téměř bez deformace. Naopak u velmi houževnatých materiálů se přetvoření stále zvětšuje a k porušení prakticky ani nedojde.

2.4.3 Zkouška ohybem

Tato zkouška se používá nejčastěji pro křehké materiály, jelikož u houževnatých materiálů k porušení prakticky nedojde. Zkouškou se zjišťují zejména hodnoty pevnosti v ohybu. Zkušební tyč je uložena na podpěrách a uprostřed je zatížena silou. Hodnoty napětí jsou v průřezu nerovnoměrné. V neutrální ose je napětí nulové, které však ve směru tloušťky roste až k maximální hodnotě v krajních vláknech. Ve vláknech s větším poloměrem nežli je neutrální osa jsou tahová napětí a ve vláknech s menším poloměrem jsou napětí tlaková. Při postupně narůstajícím zatížení je měřen průhyb zkušební tyče. Toto měření je prováděno do okamžiku, než dojde ke zlomení tyče nebo jejímu trvalému prohnutí. [1, 7, 9]



Obr. 2.3 Třibodový ohyb

Napětí v ohybu

$$\sigma_o = \frac{M_{o\max}}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

Kde:

σ_o	-	napětí v ohybu	[MPa]
$M_{o\max}$	-	maximální ohybový moment	[N·mm]
W_o	-	modul průřezu v ohybu	[mm ³]

2.4.4 Zkouška krutem

Namáhání krutem se v technické praxi vyskytuje velmi často. Zkouška se provádí převážně na tyčích kruhového průřezu, které jsou zatěžovány krouticím momentem. Vzorek bývá jedním koncem pevně uchycen a druhý konec je namáhán daným krouticím momentem. U křehkých materiálů dojde k porušení při malém zkroucení. Houževnaté materiály vydrží až několik otáček. [1, 7]

Napětí v krutu:

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \quad [\text{MPa}] \quad (9)$$

Kde:

τ_k	-	napětí v krutu	[MPa]
M_k	-	krouticí moment	[N·mm]
W_k	-	modul průřezu v krutu	[mm ³]

2.4.5 Zkouška stříhem (smykem)

K namáhání prostým smykem dochází, pokud dojde k posunu dvou nekonečně blízkých průřezů vůči sobě. Ideálního smykového napětí prakticky nelze docílit. Při reálném namáhání je smykové napětí doprovázeno ohybovým. Zkouška stříhem se neprovádí tak často, protože pevnost ve stříhu lze odvodit u tažných materiálů z pevnosti v tahu.

Napětí ve smyku:

$$\tau_s = \frac{F}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

Kde:

τ_s	-	napětí ve smyku	[MPa]
F	-	zatěžující síla	[N]
S	-	namáhaný průřez	[mm ²]

2.5 Měření tvrdosti

Tvrdot patří mezi základní mechanické vlastnosti materiálu. Zejména u kovových materiálů má tvrdost zásadní význam. Z hodnot tvrdosti lze také odvodit i další vlastnosti materiálu jako je například mez pevnosti, obrobiteľnosť. Tvrdot lze navíc zjištit velmi rychle a levně. Bývá měřena jak na zkušebních vzorcích, tak na hotových výrobcích a to i o velkých rozměrech zejména pomocí přenosných tvrdoměrů jako je např. kladívko Poldi.

Jak již bylo zmíněno, tvrdost je odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Na tomto principu je založena většina způsobů měření tvrdosti. Hodnoty tvrdosti se udávají bez jednotek. Pouze u některých způsobů měření, kde je hodnota odvozena ze vztahu mezi zatěžující silou a plochou vtisku, má tvrdost jednotky N/mm^2 . Z důvodu, aby nedocházelo k záměně za pevnost, udává se tvrdost pouze s uvedením způsobu měření a podmínek měření (např. HV2). Pokud se jedná o základní normované podmínky, tak nemusí být tyto uvedeny.

Rozdělení zkoušek tvrdosti

Způsoby měření tvrdosti lze rozdělit podle několika hledisek. Podle podstaty zkoušky na vrypové, vnikací a odrazové. Lze je rozdělit také podle zatěžující síly na statické a dynamické. Podle účelu měření se dělí na zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti. Mezi nejčastěji používané zkoušky patří zkoušky vnikací. [1]

2.5.1 Vrypové zkoušky

Vrypové zkoušky jsou založeny na principu Mohsovy stupnice tvrdosti minerálů. Vrypová zkouška se používá pouze pro tvrdé a křehké materiály - zejména sklo nebo porcelán. Používá se zkouška podle Martense, označuje se HMa. Tvrdot je zjišřována přitlačováním kuželového diamantového hrotu měnitelnou silou na lešřený povrch zkušebního vzorku, kterým je pohybováno. Mírou tvrdosti je síla, která vytvoří vryp široký 0,01 mm. Další možností je použití stejné přitlačné síly a následně se porovnává šířku vrypů u měřených vzorků. Tento postup měření tvrdosti je však značně nepřesný. [1, 7]

2.5.2 Zkoušky vnikací

Zkoušky vnikací jsou nejrozšířenější. Pracují na principu zatlačování dostatečně tvrdého tělesa vhodného tvaru do zkoušeného materiálu. Tělesa bývají nejčastěji z kalené oceli, slinutého karbidu nebo diamantu. Nejčastějšími tvary vnikacích těles jsou jehlan, kulička a kužel. Způsoby měření se liší tvarem vnikacích těles a způsoby vyhodnocování. Měřítkem tvrdosti bývá velikost vzniklého vtisku. U některých metod se vyhodnocuje podíl zatěžující síly a vzniklé plochy vtisku.

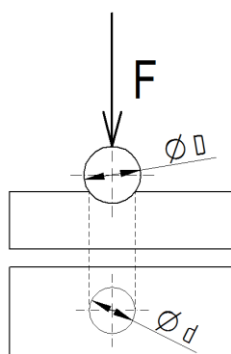
Zkouška vnikací podle Brinella

Při zkoušce tvrdosti podle Brinella se používá jako vnikací tělísko kulička, která se vtiskne určitou silou do zkoušeného materiálu. Tvrdost podle Brinella se označuje zkratkou HB. Za zkratku se připojují podmínky měření v pořadí: průměr kuličky, velikost zatížení a doba zatížení. Běžně se používá ocelová kulička o průměru 10 mm. Lze však použít i jiné rozměry - nejčastěji {5; 2,5; 1,25; 1} mm. Pro měkké materiály do 450 HB se používá ocelová kalená kulička, pro materiály s předpokládanou vyšší tvrdostí se používá kulička ze slinutého karbidu. Tvrdost podle Brinella je do značné míry závislá na podmínkách zkoušky. Na výsledek zkoušky má totiž vliv velikost zatížení pro daný průměr kuličky, doba zatížení a velikost vtisku s ohledem na rozměry zkoušeného předmětu. Pro srovnatelnost jednotlivých měření je nutné dodržovat podmínky uvedené v normách. Zatěžující síla se volí tak, aby průměr vtisku byl v rozmezí 0,25x až 0,6x násobku průměru vnikací kuličky. Síla je volena jako násobek čtverce průměru kuličky. Běžně volené násobky jsou 30 pro ocel, 10 pro neželezné kovy a 2,5 pro měkké neželezné kovy. Nárůst zatěžující síly je rovnoměrný. Doba, po kterou je vzorek zatížen maximální silou, je dána normou. Pro oceli a litiny je to 10 s. U měkkých materiálů jako je olovo, zinek apod. se doba zatížení prodlouží do té doby, až není možné pozorovat u materiálu kluz. Měření je prováděno na čistém rovném povrchu. Tloušťka měřeného vzorku musí být minimálně osminásobkem vtisku, jinak dojde k ovlivnění měření tvrdostí podložky. Také je předepsána minimální vzdálenost měření od kraje vzorku a vzdálenost jednotlivých vtisků mezi sebou.

Zkouška tvrdosti podle Brinella je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů. Používá se u odlitků, a pro výrobky s texturou po tváření. Při těchto zkouškách se používá velkého zatížení a velkého vtisku. [1, 7, 10]

Vyhodnocení zkoušky HB:

Průměr vtisku je měřen ve dvou navzájem kolmých směrech. Vhodným měřicím přístrojem je například mikroskop nebo Brinellova lupa. Pro výpočet tvrdosti je použit aritmetický průměr obou naměřených hodnot průměru vtisku. Tvrdost pak udává poměr síly a plochy vtisku. Nevýhodou měření tvrdosti podle Brinella je velmi obtížné proměření průměru vtisku, který může být nezřetelný. Vtisk může být také ovlivněn vtažením materiálu po jeho okraji, což nastává hlavně u nezpevněného materiálu. U zpevněného materiálu může nastat naopak vytlačení valu po obvodu vtisku. Plochu vtisku lze také vypočítat z hloubky vtisku, ale přesné změření hloubky je obtížnější nežli změření průměru. [1, 9, 10]



Obr. 2.4 Zkouška tvrdosti podle Brinella (HB)

Tvrdost podle Brinella lze vypočíst ze vzorce:

$$HB = \frac{0,102F}{\frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [1] \quad (11)$$

Kde:

F	- zatěžující síla	[N]
S	- plocha vtisku	[mm ²]
D	- průměr vnikací kuličky	[mm]
d	- průměr vtisku	[mm]

Zkouška vnikací podle Rockwella

Při Rockwellově zkoušce tvrdosti se používá jako vnikací tělísko diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 120° nebo ocelová kulička. Obecné označení je HR, je však nutné uvést stupnici. Dle použitého vnikacího tělesa a maximálního zatížení rozlišujeme různé stupnice Rockwellovy tvrdosti. Mezi nejčastěji používané patří HRA, HRB, HRC. Při HRA je vnikacím tělesem diamantový kužel, maximální zatížení je 600 N. Používá se pro křehké

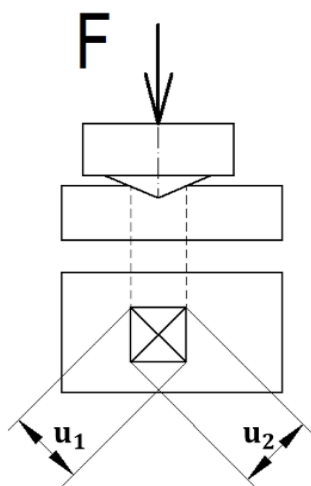
materiály a tenké povrchové vrstvy. Při HRB se používá ocelová kulička, maximální zatížení je 1000 N a používá se pro měkké kovy. Při HRC se používá diamantový kužel, maximální zatížení je 1500N a používá se pro materiály s tvrdostí v rozsahu 20 až 67 HRC.

K vyhodnocení výsledné tvrdosti slouží hloubka vtisku. Průběh zatížení má dvě fáze. První fáze takzvaného základního zatížení slouží k vyřazení nepřesností povrchu z měření hloubky vtisku. Poloha vnikacího tělesa po základním zatížení je výchozí polohou pro měření hloubky vtisku. Z tohoto důvodu nevyžaduje Rockwellova zkouška upravený povrch.

Po základním zatížení následuje plynulý nárůst síly až na zatížení udávané normou. Pak je zatěžující síla postupně snižována až na úroveň základního zatížení. V této poloze je měřen přírůstek hloubky vtisku. Pokud by byla měřena hloubka vtisku při maximálním zatížení, jevila by se výsledná tvrdost menší o pružné deformace materiálu, stroje, podložky apod. Maximální hloubka vtisku je pro HRA a HRC 0,2 mm. V této hloubce se Rockwellova tvrdost HRA a HRC rovná nule. Maximální hodnota tvrdosti HRC a HRA je 100. Z uvedených hodnot vyplývá, že 0,002 mm odpovídá jedné jednotce tvrdosti podle Rockwella. Zkouška podle Rockwella je velmi rychlá a snadná. Z těchto důvodů je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií. [1, 7, 9, 11]

Zkouška vnikací podle Vickerse

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je založena na stejném principu jako zkouška podle Brinella. Vnikací tělísko je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou. Vrcholový úhel jehlanu je 136°. Tento úhel byl zvolen proto, aby tření mezi vnikacím tělesem a zkoušeným vzorkem co nejméně ovlivňovalo výsledek zkoušky. Tato metoda je velmi přesná a není téměř závislá na zatížení. Výhodou Vickersovy metody také je, že pomocí ní lze měřit tvrdé i měkké materiály a má pro ně jednotnou stupnici. Tvrdost dle Vickerse se označuje zkratkou HV. Po zkoušce je měřena délka úhlopříček (u_1 a u_2) a pro výpočet je užit jejich aritmetický průměr. Hodnota tvrdosti může být odečtena z tabulek pro danou délku úhlopříčky a zatížení nebo vypočtena ze vzorce. Hodnota tvrdosti je stejně jako u Brinellovy metody dána podílem zatěžující síly a plochy vtisku. Vzhledem k malým rozměrům vtisku vyžaduje metoda pečlivou úpravu povrchu měřeného vzorku. Metoda není vhodná pro měření materiálů s hrubou strukturou, kde by vzhledem k malým rozměrům vtisku mohlo dojít pouze k vytvoření vtisku v jedné struktuře. [1, 9, 12]



Obr. 2.5 Zkouška tvrdosti podle Vickerse (HV)

Tvrdość podle Vickerse je vypočtena ze vzorce:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad [1] \quad (12)$$

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

Kde:

F - zatěžující síla [N]

u - střední hodnota úhlopříčky [mm]

Zkouška vnikací podle Knoop

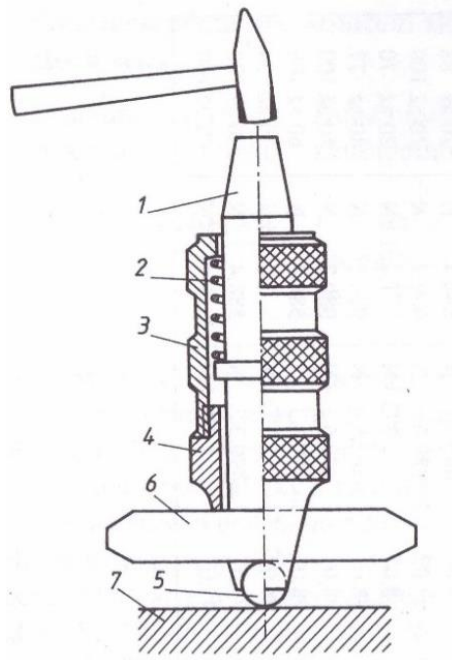
Je podobná zkoušce podle Vickerse. Tvar vnikacího tělesa je čtyřboký jehlan s vrcholovými úhly $172,5^\circ$ a 130° , tudíž poměrem úhlopříček je přibližně 7:1. K vyhodnocení tvrdosti se měří delší z obou úhlopříček. Výhodou metody je, že u delší úhlopříčky je vliv odpružení materiálu zanedbatelný. Vzhledem k malé hloubce vtisku lze tuto metodu použít pro materiály s povrchovou úpravou. Mezi další výhody patří, že měření lze provádět vzhledem k úzkému vtisku také na tenkých vzorcích, jako jsou třeba dráty. Vzhledem k malé hloubce vtisku je nutná pečlivá úprava povrchu zkoušeného vzorku. [1]

2.5.3 Zkoušky dynamické

U dynamických zkoušek se potřebné zatížení vyvozuje dynamicky (rázem). Přesnost těchto zkoušek bývá menší oproti statickým vnikacím zkouškám. Dynamické zkoušky mohou být podle principu měření plastické a elastické. U plastických zkoušek se tvrdost určuje ze vzniklých trvalých vtisků. U zkoušek elastických se tvrdost měří z pružných vlastností materiálu. Přístroje pro dynamické zkoušky tvrdosti bývají obvykle přenosné a menších rozměrů. Mezi nejběžněji používané pro plastické zkoušky patří kladívko Poldi a Baumannovo kladívko. Při elastických zkouškách tvrdosti se nejčastěji používá metoda odrazu. Nejčastěji používané přístroje pro elastické měření tvrdosti jsou Shoreho skleroskop a duroskop (viz obr. 2.7).

Kladívko Poldi

Měření pomocí kladívka Poldi je založeno na principu porovnávání vzorku se známými mechanickými vlastnostmi a měřeného vzorku. Úderem kladívka na úderník vzniknou vtisky a to jak ve známém materiálu (porovnávací tyč), tak ve zkoumaném vzorku. Jako vnikací těleso je použita kulička. Schéma tvrdoměru viz obr. 2.6. Podle velikosti vtisku se z tabulek odečte hodnota tvrdosti. Tento způsob měření tvrdosti je vhodný zejména pro velké odlitky.



Obr. 2.6 Ruční tvrdoměr Poldi [6]

1- úderník, 2- pružina, 3- těleso, 4- nástavec, 5- kulička, 6- porovnávací tyč, 7- zkoušený materiál

Baumannovo kladívko

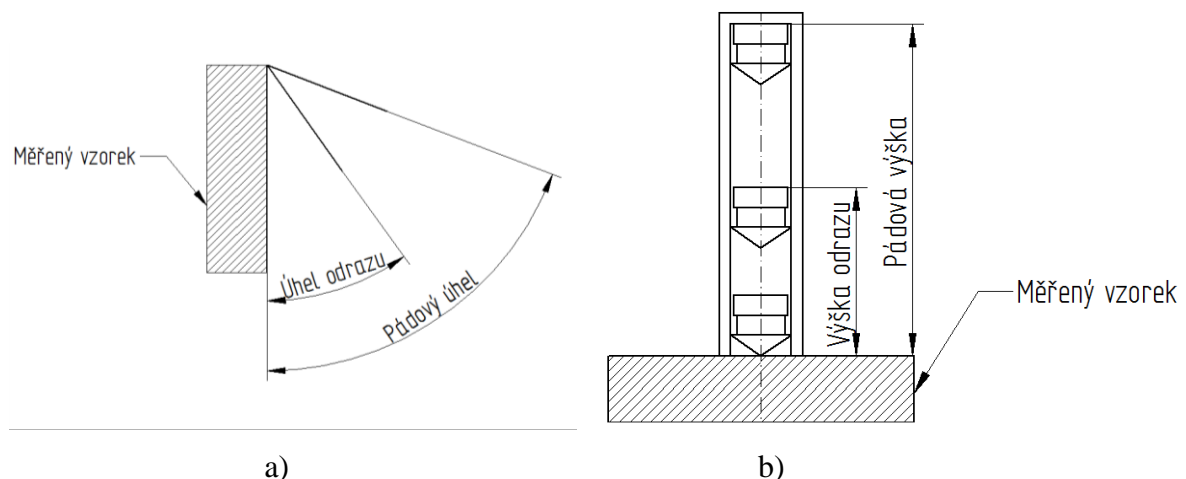
Baumannovo kladívko používá k vytvoření vtisku energii vyvozenou stlačenou pružinou. Síla vytvořená pružinou je vždy stejná, proto není nutné použití porovnávací tyče jako u kladívka Poldi. Jako vnikací těleso je užito kuličky. Měření tvrdosti pomocí Baumannova kladívka je vhodné zejména pro velké odlitky.

Duroskop

Těleso definovaného tvaru necháme padat z určitého úhlu kolmo na měřený povrch. Po odrazu měříme úhel, do kterého se zkušební tělísko odrazí. Schéma duroskopu viz obr. 2.7 a. Povrch musí být hladký, rovný a bez okují. Po zkoušce by neměl být znatelný vpich od zkušebního tělíska.

Shoreho skleroskop

Metoda měření tvrdosti na základě pružného odrazu je založena na odrazu tělesa padajícího z určité výšky na povrch zkoumaného materiálu. Výška odrazu tohoto tělesa udává tvrdost zkoumaného vzorku. K tomuto měření se využívá Shoreho skleroskop (viz obr. 2.7 b), který se skládá z kalibrované trubky, ve které se pohybuje malé těleso zakončené na spodní části kulovitě zabroušeným diamantem. Těleso necháváme volně padat z určité výšky. Podle odrazové výšky se odečte na stupnici příslušná tvrdost. Tento způsob měření je vhodný pro velké výrobky s velkou povrchovou tvrdostí a také se využívá pro měření tvrdosti plastů.



Obr. 2.7 Tvrdoměry pro dynamické zkoušky: a) duroskop, b) Shoreho skleroskop

3 Experimentální část

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit změnu tvrdosti materiálu a její plošné rozložení v závislosti na deformaci. Vzorky byly ploché zkušební tyčky, které byly na trhacím stroji nadeformovány o určitou hodnotu prodloužení (viz tab. 3), aby splňovaly předem určené procento deformace. U těchto vzorků byla následně měřena tvrdost a její plošné rozložení na povrchu vzorku.

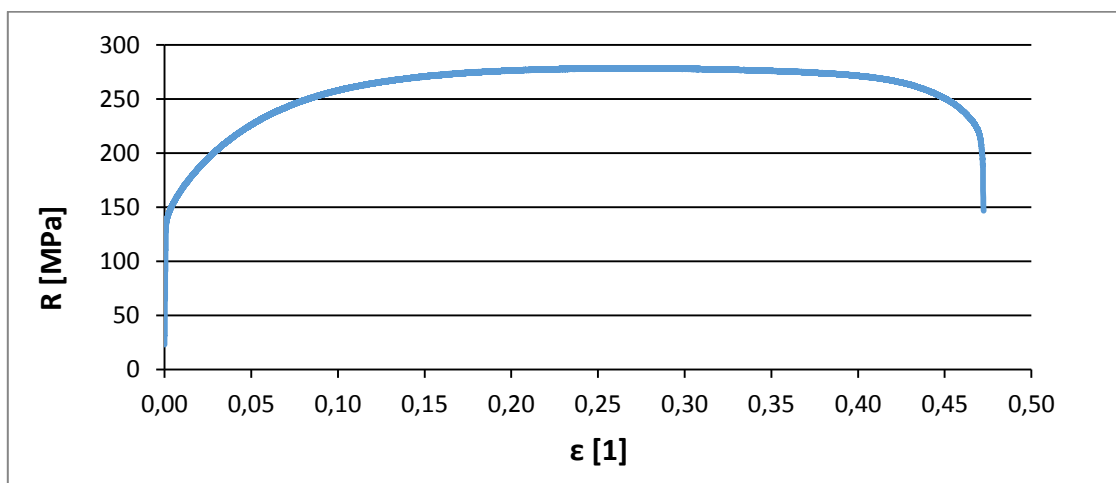
3.1 Materiál vzorků

Pro experiment byl zvolen hlubokotažný plech označovaný jako DC05, který je používán v automobilovém průmyslu pro vnější pohledové díly karoserie. Zkušební vzorky pro experiment byly připraveny ve dvou směrech s ohledem na směr válcování plechu (0° a 90°). Pro zjištění mechanických vlastností materiálu byla provedena statická zkouška tahem pro oba směry a to vždy pro 3 vzorky u každého směru. Zkouška tahem byla prováděna na stroji TIRA test 2300.

Ze statistické zkoušky tahem byly zjištěny základní mechanické vlastnosti materiálu. V tab. 1 jsou uvedeny výsledné mechanické vlastnosti pro směr 0° a odpovídající smluvní diagram je na obr. 3.1.

Tab. 1 DC05 - 0° ; základní mechanické vlastnosti

Číslo vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
1	146,4	278,5	26,2	47,2
2	141,3	270,5	25,9	46,3
3	142,7	270,6	26,9	45,3
\bar{x}	143,5	273,2	26,3	46,2

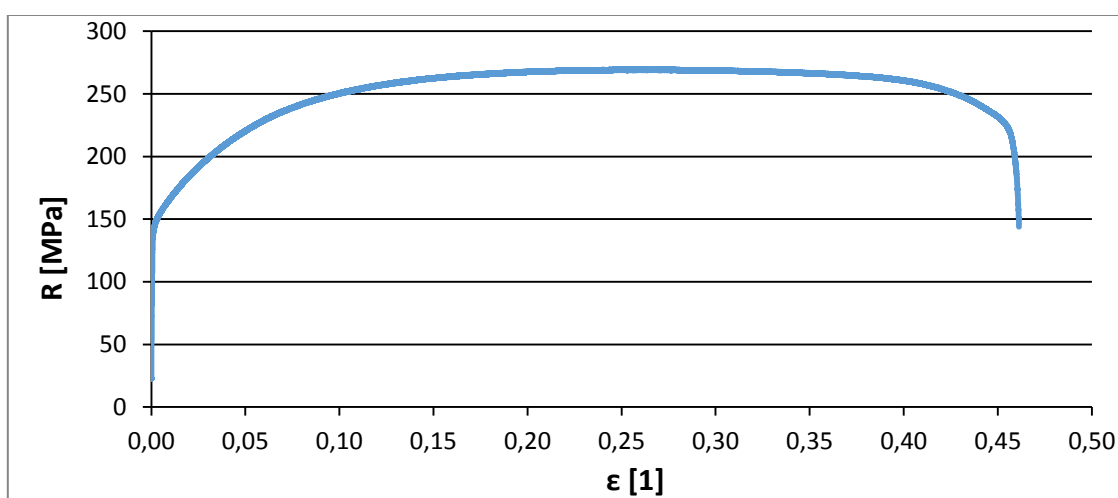


Obr. 3.1 DC05 - 0° ; smluvní diagram ze zkoušky tahem

Základní mechanické vlastnosti materiálu DC05 pro směr 90° jsou velmi podobné jako u směru 0° a jsou uvedeny v tab. 2. Odpovídající smluvní diagram je na obr. 3.2.

Tab. 2 DC05 - 90°; základní mechanické vlastnosti

Číslo vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_{80mm} [%]
1	149,0	269,5	25,7	46,1
2	149,2	269,9	26,3	46,8
3	148,8	268,8	25,9	46,2
\bar{x}	149,0	269,4	25,9	46,4

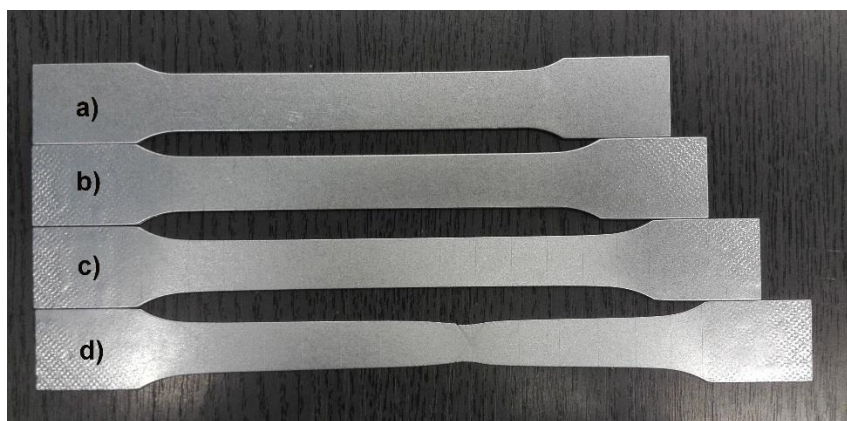


Obr. 3.2 DC05- 90°; smluvní diagram ze zkoušky tahem

3.2 Příprava vzorků pro měření tvrdosti

Deformace materiálu před měřením tvrdosti byla prováděna na trhacím stroji TIRA test 2300. Detail pracovního prostoru je na obr. 3.4 a.

Vzorky byly dle výsledků statické tahové zkoušky nataženy o určitou vzdálenost. Zvolené hodnoty deformace byly 10%, A_g (25%) a A_{80mm} (45%). Jeden vzorek byl měřen bez deformace. Hodnota 25% byla zvolena, protože odpovídala homogenní tažnosti (A_g). U vzorku s 45% deformace začíná být patrný krček, nejedná se tedy už o homogenní deformaci. Připravené vzorky jsou zobrazeny na obr. 3.3. Výchozí délka vzorků byla 80 mm (L_0).



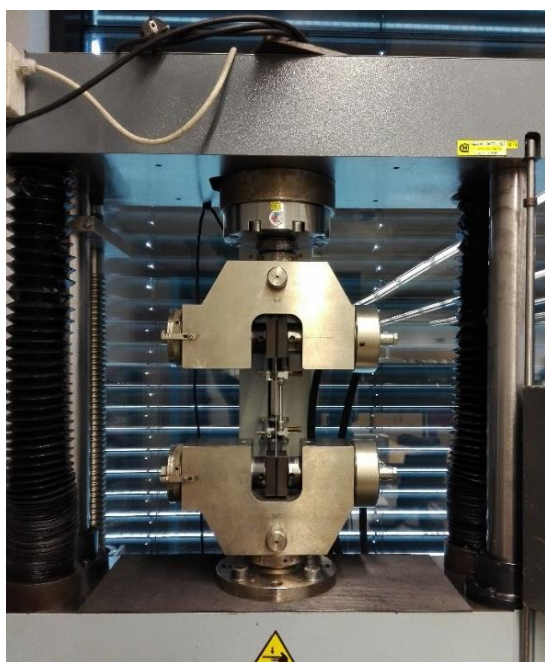
Obr. 3.3 Připravené vzorky pro měření tvrdosti:

a) 0% deformace, **b)** 10% deformace, **c)** 25% deformace (A_g), **d)** 45% deformace (A_{80mm})

V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty prodloužení jednotlivých vzorků. Stejně hodnoty prodloužení byly připraveny pro oba směry.

Tab. 3 Prodloužení vzorků

Vzorek	Deformace [%]	ΔL [mm]
a	0	0
b	10	8
c	25	20
d	45	36



a)



b)

Obr. 3.4 a) Detail pracovního prostoru stroje TIRA test 2300, **b)** tvrdoměr Qness [1]

3.4 Výsledné hodnoty HV2

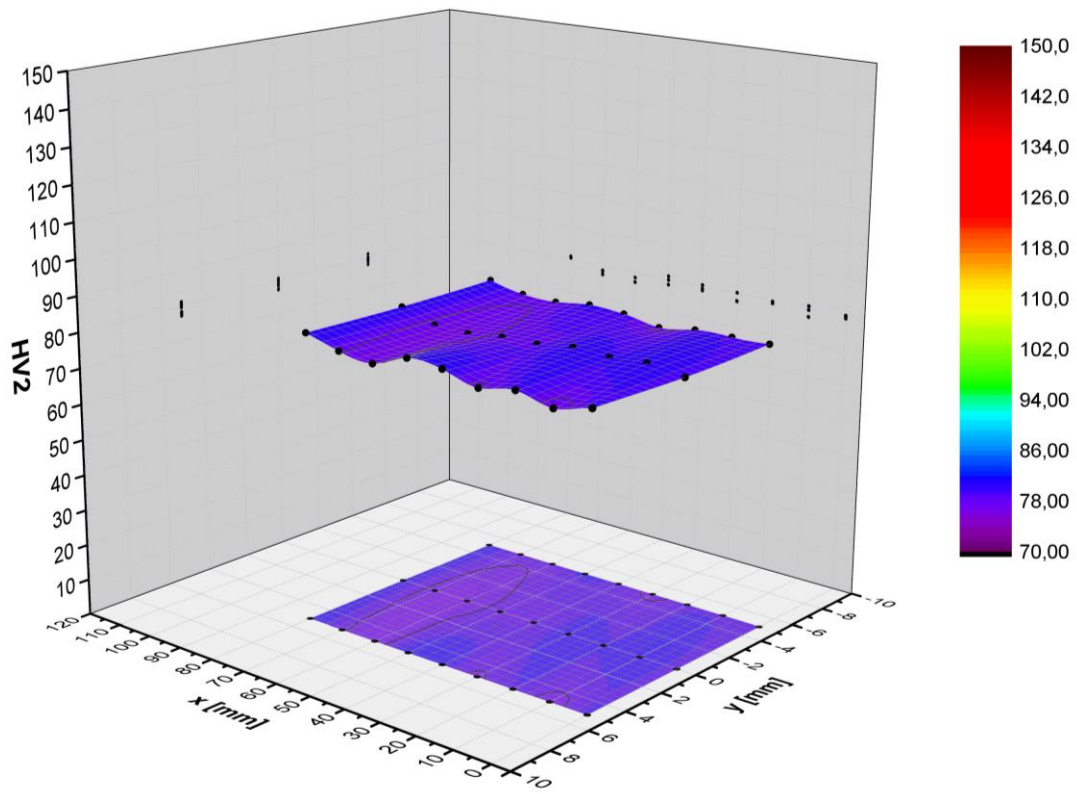
Z naměřených hodnot bylo pomocí programu OriginPro 9 sestrojeno grafické prostorové rozložení tvrdosti pomocí 3D grafů. V grafech jsou černými body vyznačeny naměřené hodnoty tvrdosti, tyto body mají také zobrazeny průměty v rovinách xy, yz a zx. V rovině xy je také zobrazen 2D graf hodnot tvrdosti pro lepší názornost. Tento způsob vyobrazení naměřených hodnot byl použit pro všechny vzorky.

Naměřené hodnoty tvrdosti HV2 a jejich rozložení v ploše vzorku bylo uvedeno i v tabulkách, kde byly uvedeny také souřadnice bodu měření. Jako příklad je uvedena tab. 4, ve které jsou naměřené hodnoty pro směr 0° a vzorek bez deformace. Ostatní tabulky byly přidány do přílohy. V další části jsou tak uvedeny pouze výsledné 3D grafy.

Tab. 4 DC05 - 0°; 0% deformace

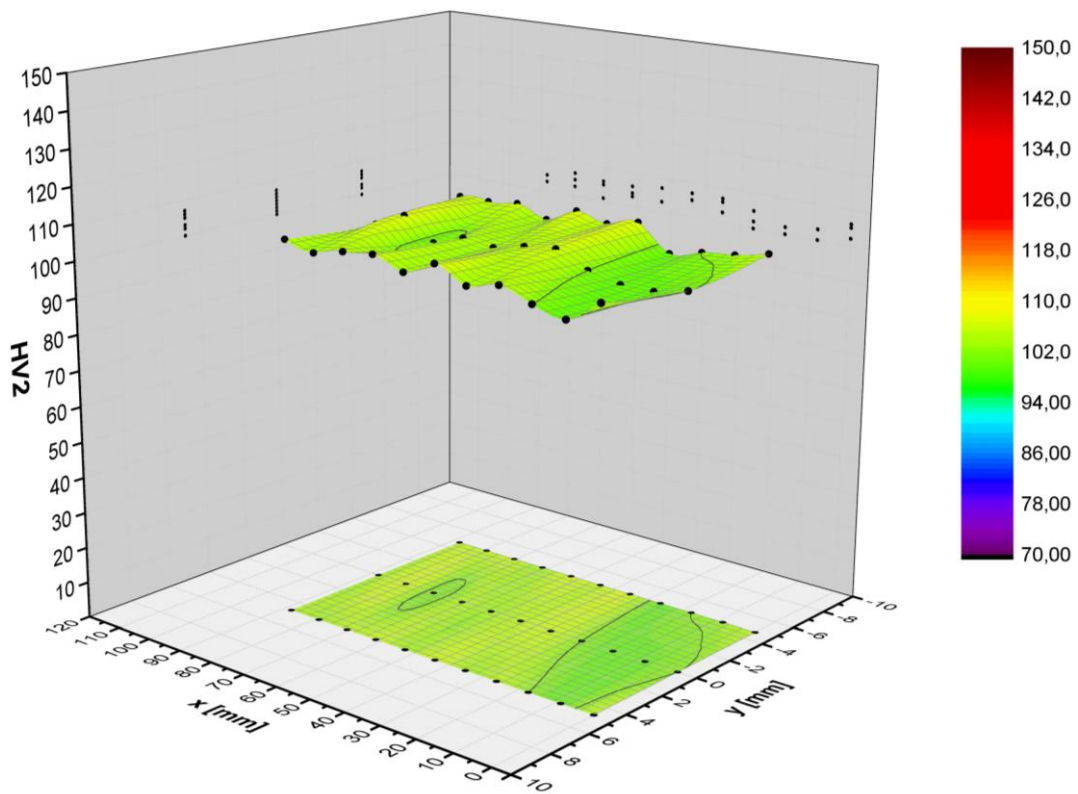
číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-5,05	79,6
2	0	0,00	79,0
3	0	5,05	79,8
4	10	-5,05	79,3
5	10	0,00	80,4
6	10	5,05	77,3
7	20	-5,05	79,1
8	20	0,00	79,6
9	20	5,05	79,5
10	30	-5,05	77,6
11	30	0,00	80,1
12	30	5,05	77,7
13	40	-5,05	79,3
14	40	0,00	78,7
15	40	5,05	80,3
16	50	-5,05	79,8
17	50	0,00	78,4
18	50	5,05	80,9
19	60	-5,05	78,5
20	60	0,00	77,2
21	60	5,05	77,1
22	70	-5,05	78,7
23	70	0,00	77,4
24	70	5,05	78,2
25	80	-5,05	80,8
26	80	0,00	80,5
27	80	5,05	81,0

DC05 - 0°; 0% deforme



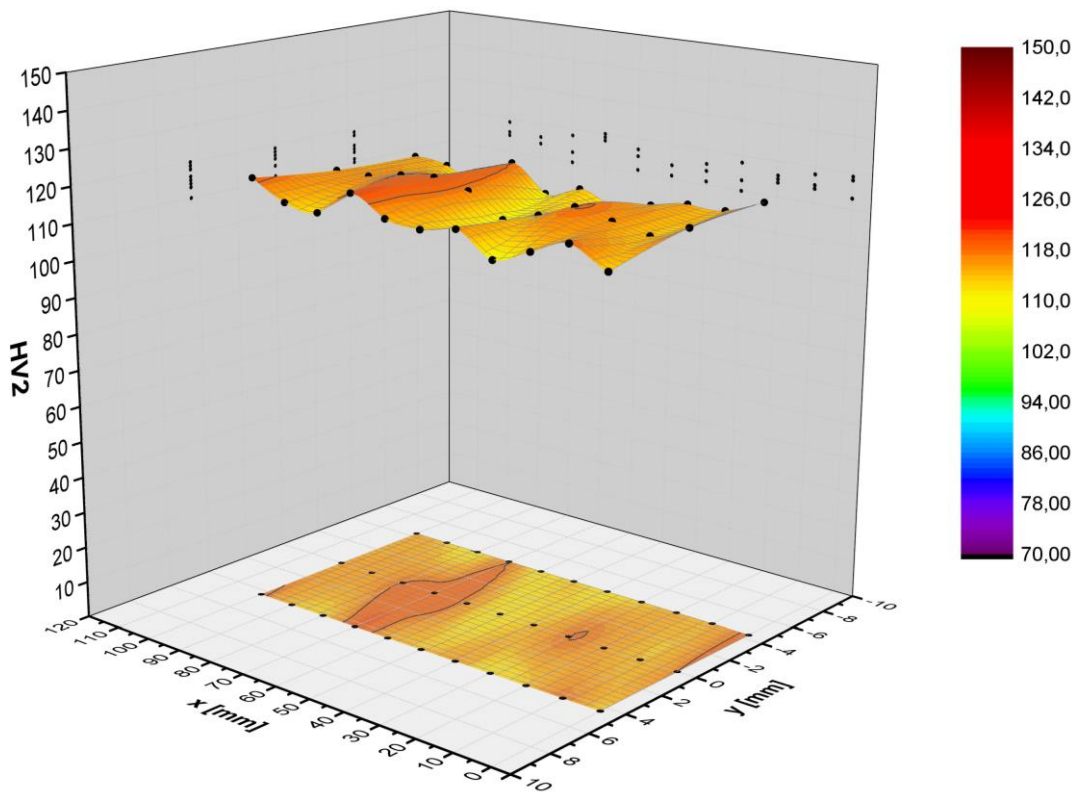
Obr. 3.7 DC05 - 0°; 0% deforme

DC05 - 0°; 10% deforme



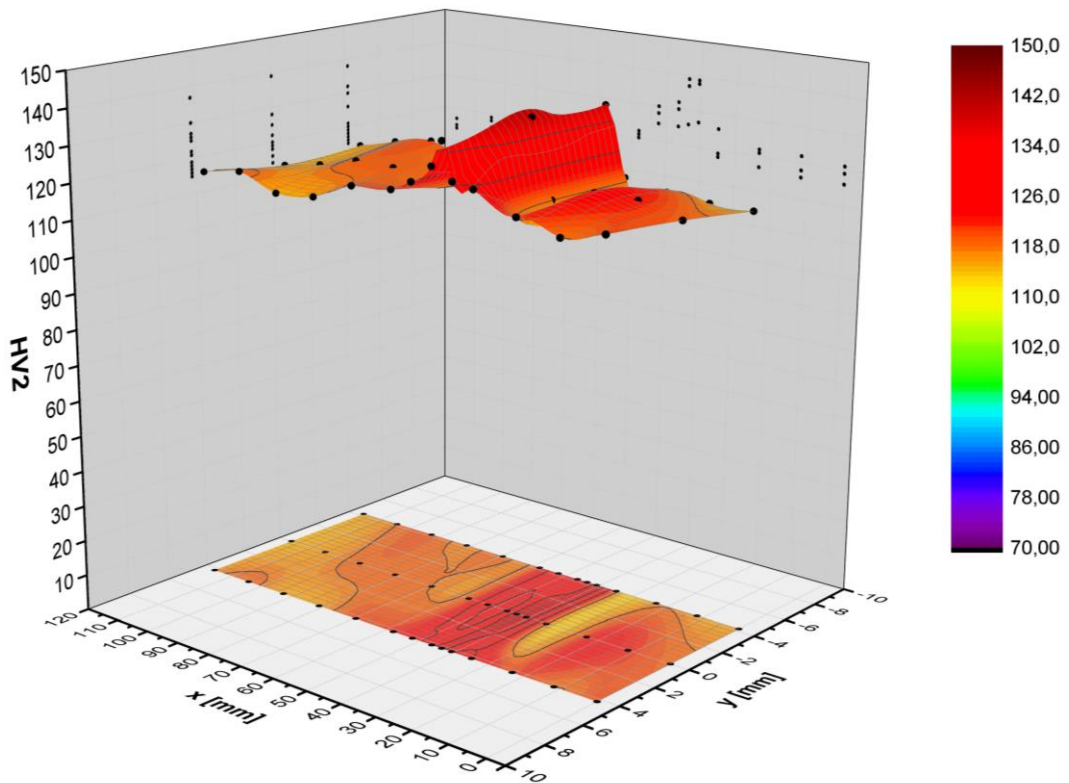
Obr. 3.8 DC05 - 0°; 10% deforme

DC05 - 0°; A_g (25% deformace)



Obr. 3.9 DC05 - 0°; A_g (25% deformace)

DC05 - 0°; A_{80mm} (45% deformace)



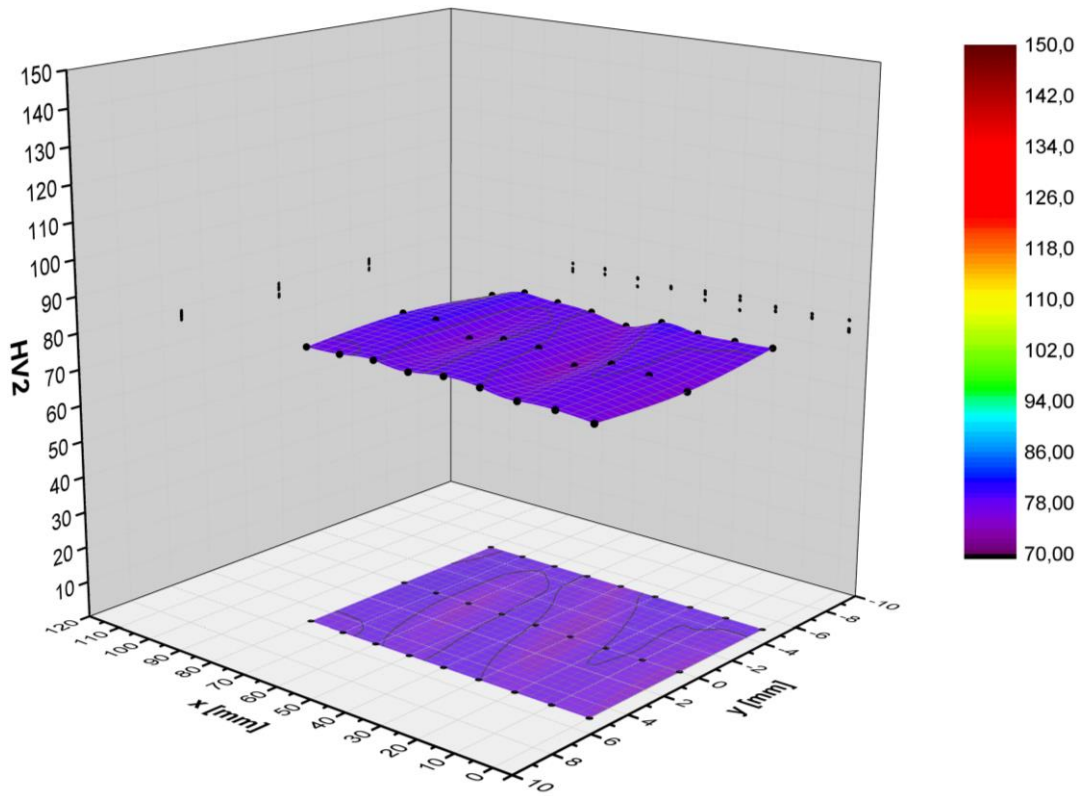
Obr. 3.10 DC05 - 0°; A_{80mm} (45% deformace)

Naměřené hodnoty pro směr 90° byly zpracovány stejným způsobem jako pro směr 0°. Tyto hodnoty jsou opět uspořádány do tabulek. Jako příklad je uvedena tab. 5 pro směr 90°, vzorek bez deformace. Ostatní tabulky byly opět přidány do přílohy.

Tab. 5 DC05 - 90°; 0% deformace

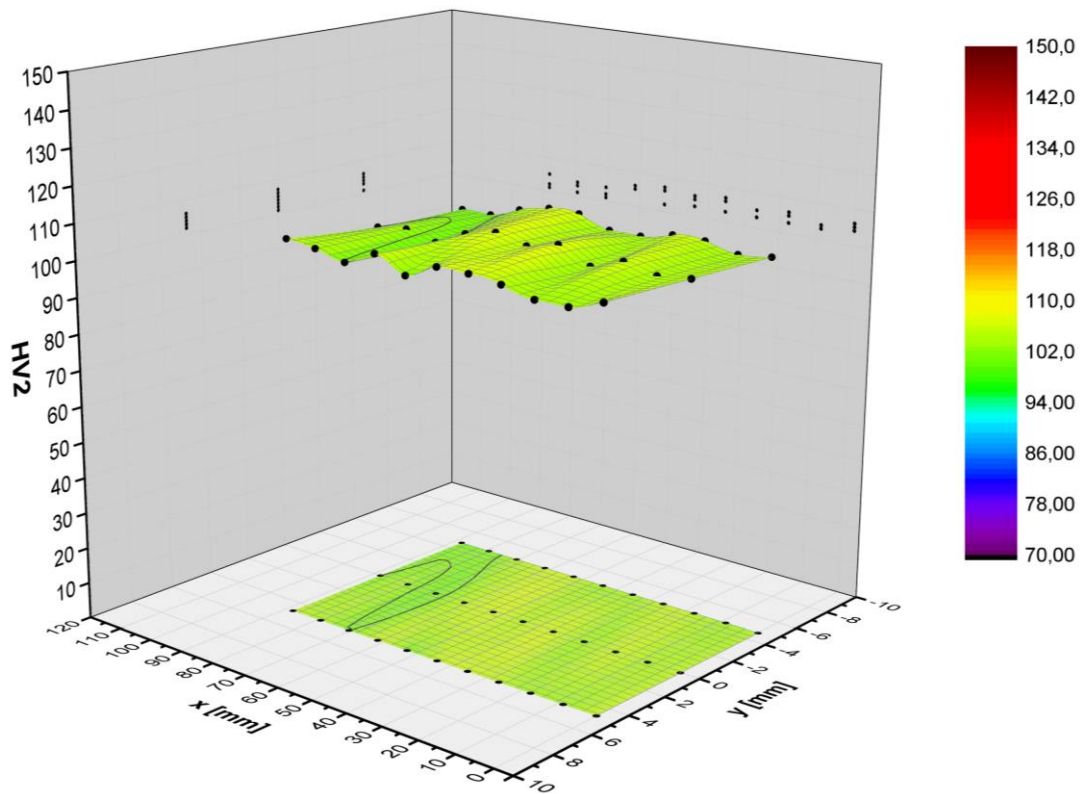
číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-5,05	78,7
2	0	0,00	75,5
3	0	5,05	76,3
4	10	-5,05	78,4
5	10	0,00	77,4
6	10	5,05	77,2
7	20	-5,05	78,3
8	20	0,00	78,1
9	20	5,05	77,0
10	30	-5,05	79,2
11	30	0,00	75,2
12	30	5,05	78,1
13	40	-5,05	76,1
14	40	0,00	77,8
15	40	5,05	78,7
16	50	-5,05	77,9
17	50	0,00	78,0
18	50	5,05	77,4
19	60	-5,05	78,5
20	60	0,00	76,0
21	60	5,05	78,3
22	70	-5,05	79,3
23	70	0,00	79,1
24	70	5,05	77,6
25	80	-5,05	76,5
26	80	0,00	78,9
27	80	5,05	77,4

DC05 - 90°; 0% deformace



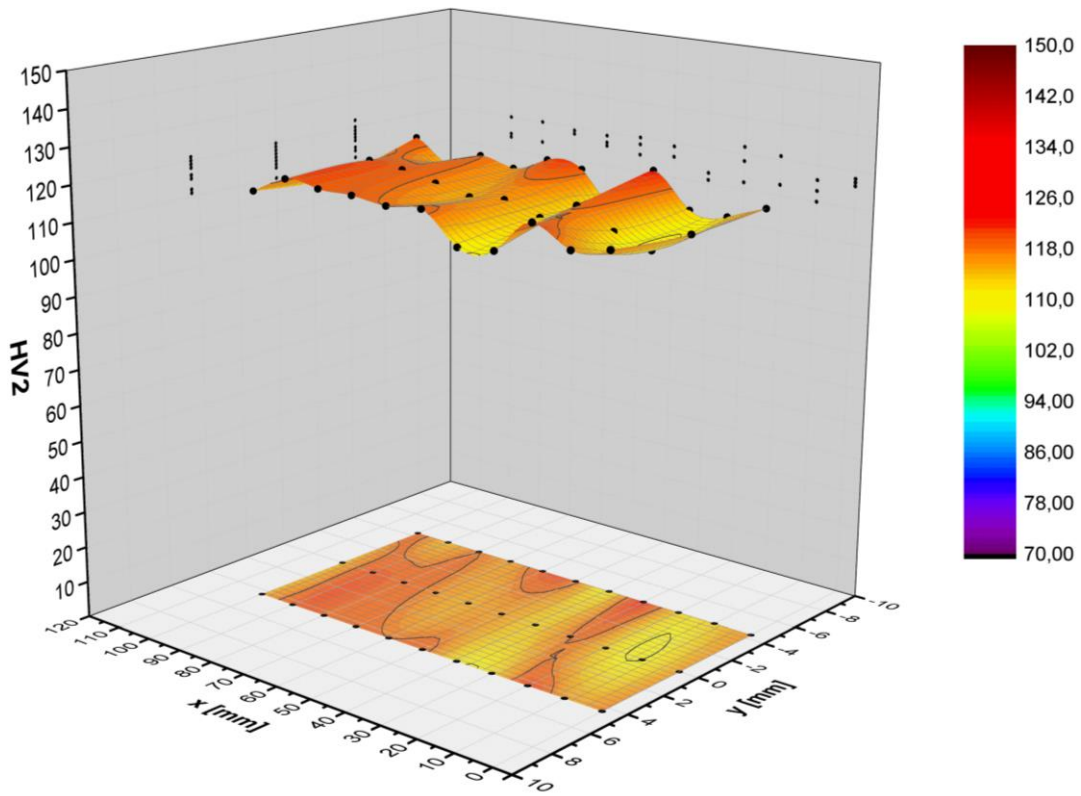
Obr. 3.11 DC05 - 90°; 0% deformace

DC05 - 90°; 10% deformace



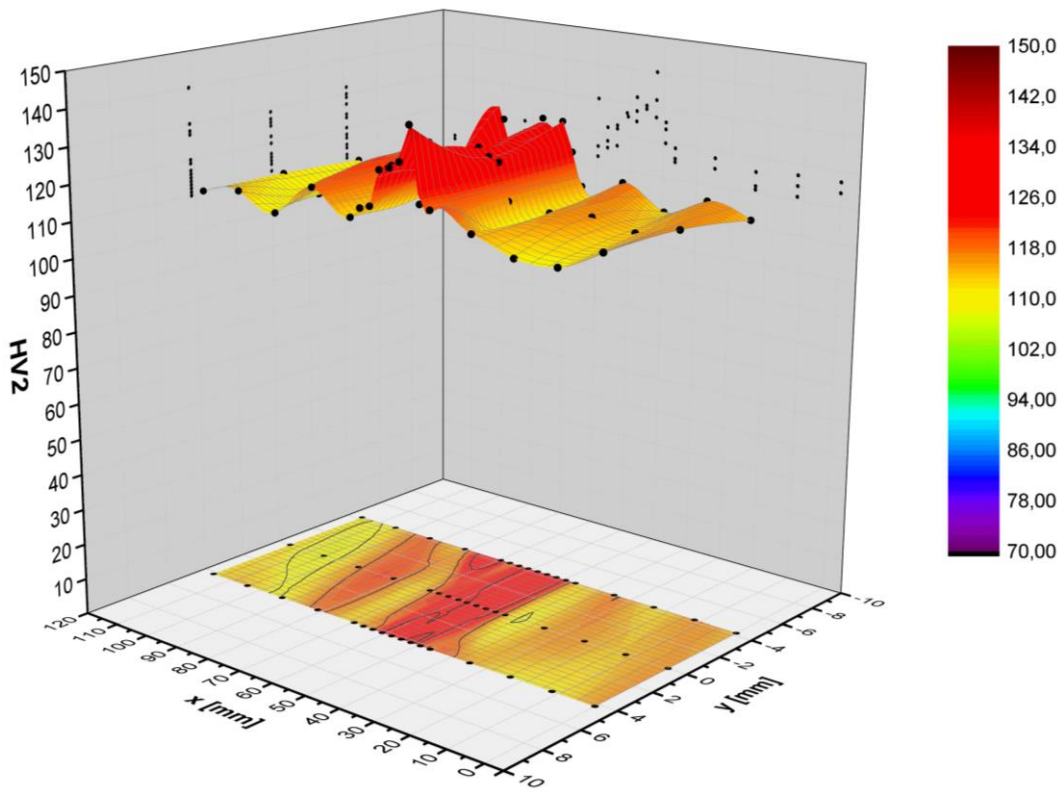
Obr. 3.12 DC05 - 90°; 10% deformace

DC05 - 90°; A_g (25% deformace)



Obr. 3.13 DC05 - 90°; A_g (25% deformace)

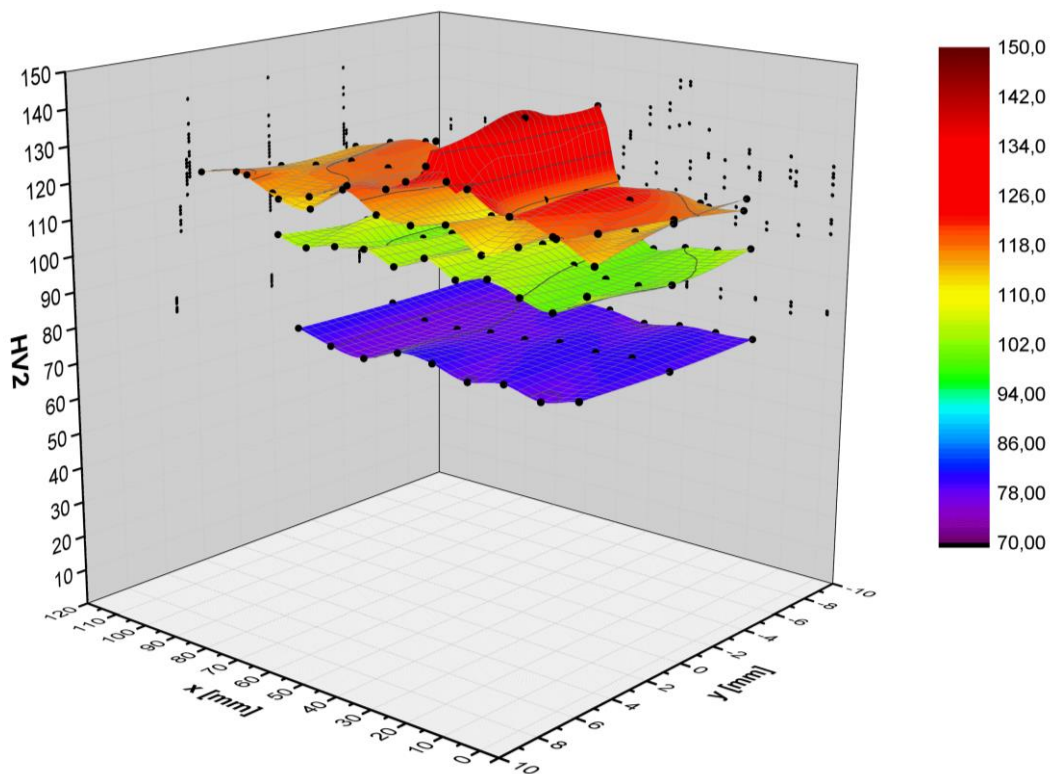
DC05 - 90°; A_{80mm} (45% deformace)



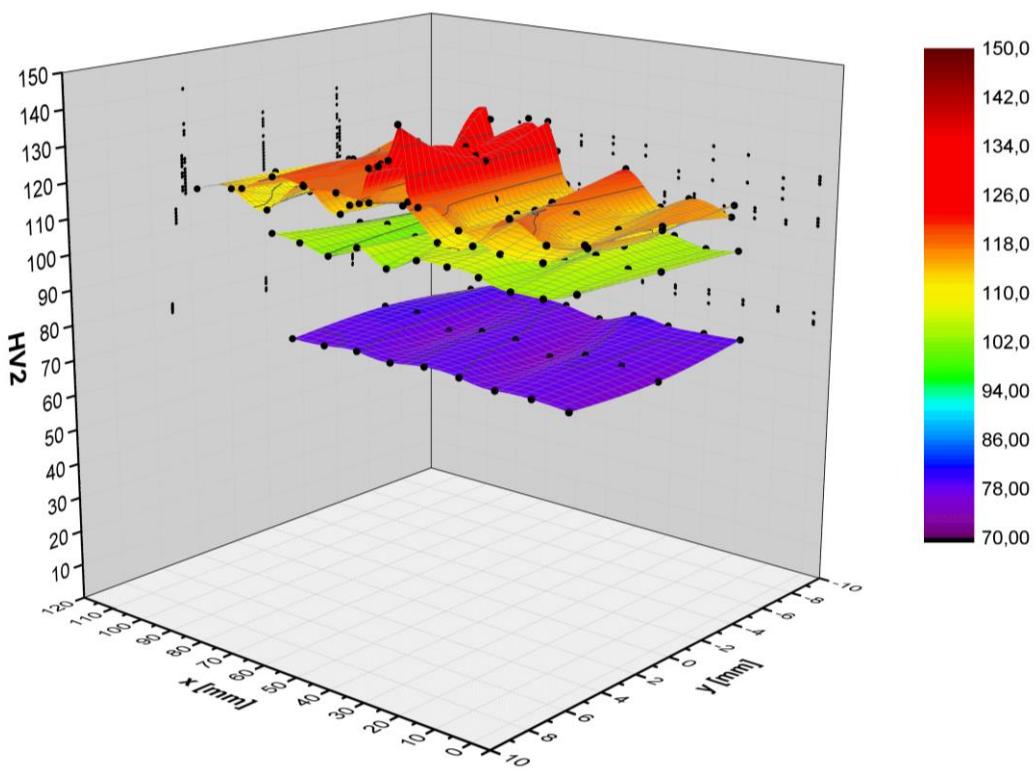
Obr. 3.14 DC05 - 90°; A_{80mm} (45% deformace)

Porovnání obou směrů z hlediska hodnot HV2

Pro lepší názornost rozložení tvrdosti a její nárůst byly sestrojeny grafy se všemi naměřenými hodnotami (viz obr. 3.15 a 3.16).



Obr. 3.15 DC05 - 0°; rozložení tvrdosti pro všechny deformace



Obr. 3.16 DC05 - 90°; rozložení tvrdosti pro všechny deformace

4 Vyhodnocení naměřených hodnot

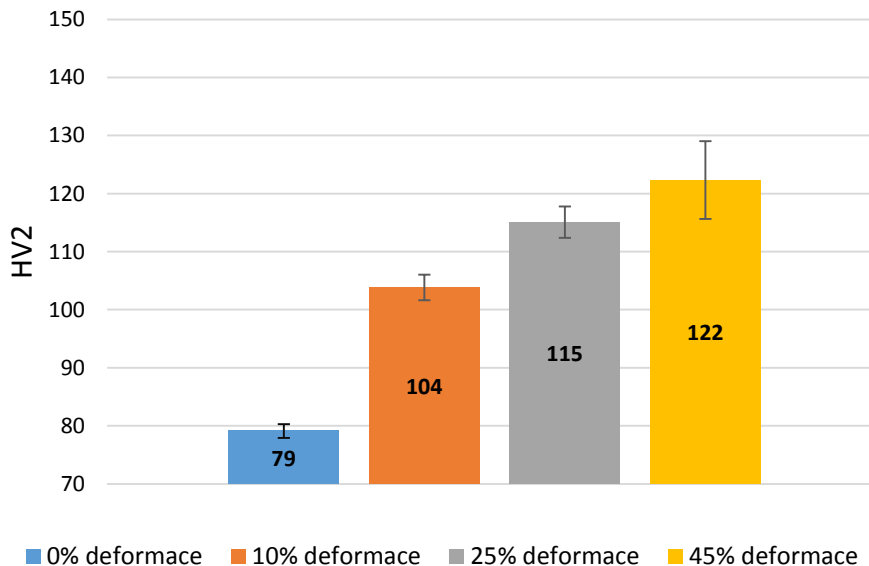
Vyhodnocení naměřených hodnot bylo rozděleno do dvou skupin podle směru válcování (0° a 90°). Průměrné hodnoty tvrdosti HV2 (\bar{x}) jsou uvedeny se směrodatnými odchylkami $\pm s$. Tvrdost u vzorku s nehomogenní deformací byla rozdělena na tvrdost v oblasti krčku a mimo krček (viz tab. 7).

Směr 0°

Pro porovnání získaných hodnot byla vytvořena tab. 6, ve které jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti ($\bar{x} \pm s$). Hodnoty uvedené v tab. 6 byly vyneseny do grafu 1.

Tab. 6 DC05 - 0°; výsledné hodnoty tvrdosti (HV2)

Deformace [%]	\bar{x} [HV2]
0	79 ± 1
10	104 ± 2
A _g (25)	115 ± 3
A _{80mm} (45)	122 ± 7



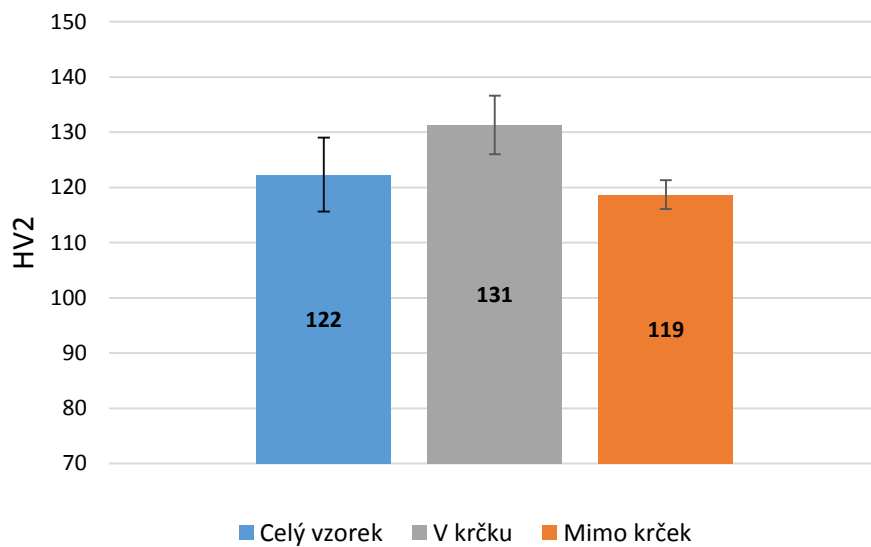
Graf 1 DC05 - 0°; průměrné hodnoty tvrdosti (HV2)

Jako výchozí hodnota pro výpočet procentuálního nárůstu tvrdosti byla brána průměrná tvrdost vzorku bez deformace tj. 79 HV2. Z hodnot uvedených v grafu pro směr 0° je patrný nárůst průměrné hodnoty tvrdosti z hodnoty 79 HV2 o 31% na hodnotu 104 HV2 u vzorku s 10% deformace. U vzorku s 25% deformace je nárůst tvrdosti o 46% na hodnotu 115 HV2.

U vzorku s 45% deformace se nejedná o homogenní deformaci, proto byly hodnoty tvrdosti rozděleny. Zvlášť byla vypočtena průměrná hodnota tvrdosti v oblasti krčku, kde je očekávaná nejvyšší hodnota tvrdosti, a další oblastí byly hodnoty tvrdosti mimo krček. Oblast krčku je tvořena body 13 ÷ 24, ostatní body (1 ÷ 12 a 25 ÷ 42) tvoří oblast mimo krček. Toto rozdělení je zobrazeno v tab. 7 a grafu 2. U hodnot jsou také uvedeny směrodatné odchylky.

Tab. 7 DC05 - 0°; 45% deformace - rozepsání rozložení tvrdosti

Deformace [%]	Oblast hodnot	\bar{X} [HV2]
45	Celý vzorek	122 ± 7
	V krčku	131 ± 5
	Mimo krček	119 ± 3



Graf 2 DC05 - 0°; 45% deformace - rozložení tvrdosti

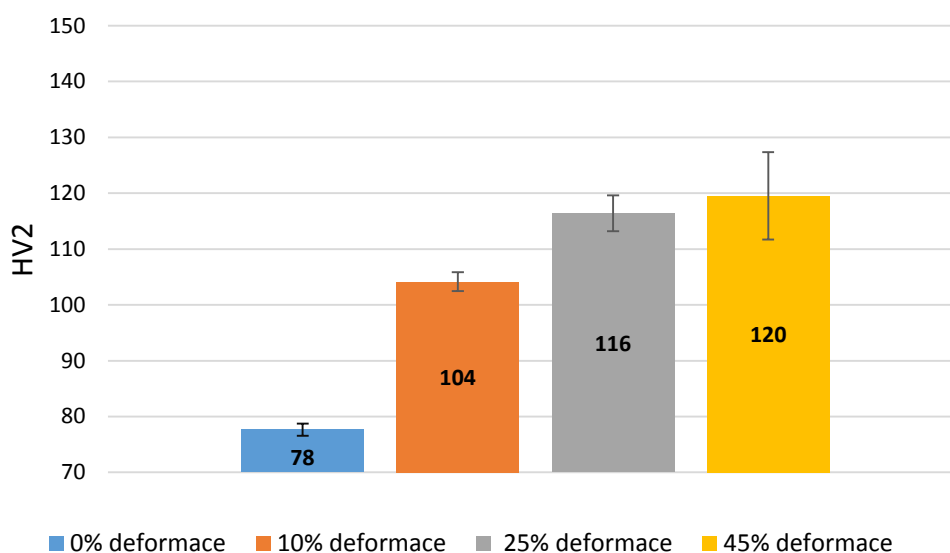
Z hodnot pro vzorek s 45% deformace je patrný nárůst tvrdosti v krčku o 66% na hodnotu 131 HV2. V oblasti mimo krček je nárůst tvrdosti o 50%. U celého vzorku vzrostla tvrdost o 55%. Tvrdost v oblasti mimo krček je velmi podobná vzorku s homogenní deformací (A_g).

Směr 90°

Pro porovnání naměřených hodnot byla vytvořena tab. 8, ve které jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti HV2 pro směr 90° a jejich směrodatné odchylky. Tyto hodnoty jsou vyneseny do grafu 3. Také zde byly rozděleny hodnoty tvrdosti pro 45% deformace.

Tab. 8 DC05 - 90°; výsledné hodnoty tvrdosti (HV2)

Deformace [%]	\bar{X} [HV2]
0	78 ± 1
10	104 ± 2
A _g (25)	116 ± 3
A _{80mm} (45)	120 ± 7



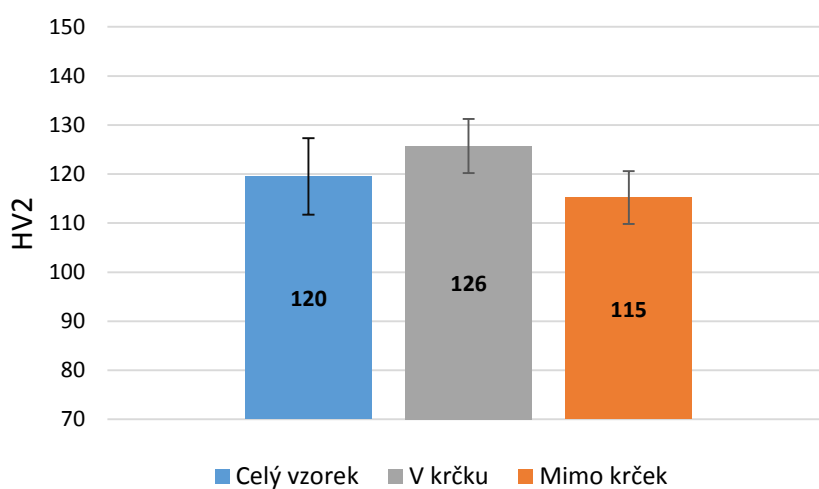
Graf 3 DC05 - 90°; průměrné hodnoty tvrdosti

Jako výchozí hodnoty pro výpočet procentuálního zpevnění byla brána hodnota tvrdosti vzorku bez deformace tj. 78 HV2. Z hodnot v grafu 3 pro směr 90° je patrný velký nárůst tvrdosti z hodnoty 78 HV2 o 34% na hodnotu 104 HV2 pro vzorek s 10% deformace. Nárůst tvrdosti u vzorku s 25% deformace byl o 50% na hodnotu 116 HV2.

Stejně jako u směru 0° byla u vzorku s 45% deformace tvrdost rozdělena do 2 oblastí. Oblast krčku je tvořena body 16 ÷ 36, ostatní body (1 ÷ 15 a 36 ÷ 51) tvoří oblast mimo krček. Hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab. 9 a vyneseny do grafu 4.

Tab. 9 DC05 - 90°; 45% deformace - rozložení tvrdosti

Deformace [%]	Oblast hodnot	\bar{X} [HV2]
45	Celý vzorek	120 ± 7
	V krčku	126 ± 6
	Mimo krček	115 ± 4



Graf 4 DC05 - 90°; 45% deformace - rozložení tvrdosti

Z hodnot pro vzorek s 45% deformace je patrný nárůst tvrdosti v krčku o 62% na hodnotu 126 HV2. V oblasti mimo krček je nárůst tvrdosti o 48%, tento nárůst odpovídá vzorku s homogenní deformací (A_g). U celého vzorku vzrostla tvrdost o 54% proti vzorku bez deformace.

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit vliv deformace na tvrdost materiálu a její plošné rozložení. Zvolenou metodou měření tvrdosti byla metoda podle Vickerse. Byla zvolena zátěž 2 kg, doba zatížení byla 10 s. Tato metoda je označena jako HV2. Pro experiment byl zvolen hlubokotažný plech DC05. V experimentu byl zohledněn směr válcování plechu (0° a 90°). Pomocí zkoušky tahem byly zjištěny základní mechanické vlastnosti, na jejichž základě byly stanoveny hodnoty deformace vzorků. Následně byla měřena tvrdost ve zvolených bodech na povrchu vzorku. Z naměřených hodnot tvrdosti HV2 byly následně sestrojeny 3D grafy. V tab. 10 jsou zobrazeny výsledné průměrné hodnoty tvrdosti a její procentuální nárůst. Jako základ byl brán vždy vzorek bez deformace.

Tab. 10 DC05 - 0° a 90° ; souhrn naměřených hodnot

Deformace [%]		Směr 0°		Směr 90°	
		Tvrdost [HV2]	Nárůst tvrdosti	Tvrdost [HV2]	Nárůst tvrdosti [%]
0		79	0	78	0
10		104	+31 %	104	+34 %
25 (A_g)		115	+46 %	116	+50 %
45 (A_{80mm})	Celý vzorek	122	+55 %	120	+54 %
	V krčku	131	+66 %	126	+62 %
	Mimo krček	119	+50 %	115	+48 %

Jak je patrné z tab. 10, s narůstající deformací roste tvrdost. Nejvyšší nárůst homogenní tvrdosti byl o 50% u směru 90° . U nehomogenní deformace byl nárůst tvrdosti až 66% u směru 0° .

Rozdíl ve změně tvrdosti s ohledem na směr válcování není velký. Vzniklý rozdíl může být způsoben nepřesností měření a také malými odchylkami mechanických vlastností zkoumaného materiálu.

U homogenní deformace bylo rozložení tvrdosti homogenní, u nehomogenní deformace došlo k nárůstu tvrdosti nejvíce v oblasti vzniku krčku. V oblasti mimo krček byla tvrdost jako u homogenní deformace. Pro další výzkum by bylo zajímavé podrobněji prozkoumat oblast nehomogenní deformace (krček). Také by bylo zajímavé zjistit změnu tvrdosti a její plošné rozložení u jiných materiálech. Jako jsou například neželezné materiály, materiály s vysokou tažností, vysokopevnostní oceli apod.

Seznam použité literatury

- [1] PLUHAŘ J. a kol.: *Nauka o materiálech*, vyd. Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury 1989
- [2] Obrázek: Tvrdoměr Qness [online]. [cit. 24. 5. 2017] Dostupné z: <http://www.bpress.cn/im/author/algous/page/30439/>
- [3] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu I – Vnitřní stavba pevných látek* [online]. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu – I. Liberec: KMT TU v Liberci. [cit. 24. 5. 2017] Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/NOM%20I.htm
- [4] PLUHAŘ J. a kol.: *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha, SNTL, 1987. 420 s.
- [5] HLUHÝ M., MODRÁČEK O., PAŇÁK R.: *Strojírenská technologie I – Metalografie a tepelné zpracování 2. díl*. 3 vydání. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-265-0
- [6] HLUCHÝ M., KOLOUCH J.: *Strojírenská technologie I – Nauka o materiálu 1. díl*. 4. vydání. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5
- [7] HLUCHÝ M. a kol.: *Strojírenská technologie I- Nauka o materiálu*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1978. 360 s.
- [8] LOUDA P., ODEHNALOVÁ D.: *Nauka o materiálu I- Vlastnosti kovů a jejich zkoušení* [online]. Studijní podklady k předmětu nauka o materiálu – I. Liberec: KMT TU v Liberci. [cit. 24. 5. 2017] Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/NOM1/Vlastnosti_podklady.pdf
- [9] FRISCHHERZ A., PAUL S.: *Technologie zpracování kovů 1- Základní poznatky*. 5. vydání. Praha: STNL Praha, 2004. ISBN 80-902655-5-3.
- [10] ČSN EN ISO 6507- 1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 20 s. Třídící znak 42 0359.
- [11] ČSN EN ISO 6508- 1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 24 s. Třídící znak 42 0360
- [12] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006. 22 s. Třídící znak 42 0374

Přílohy

A DC05 - 0°; tabulky naměřených hodnot

A. 1 DC05 - 0°; 0% deformace.....	43
A. 2 DC05 - 0°; 10% deformace.....	43
A. 3 DC05 - 0°; A_g (25% deformace).....	44
A. 4 DC05 - 0°; A_{80mm} (45% deformace).....	45

B DC05 - 90°; tabulky naměřených hodnot

B. 1 DC05 - 90°; 0% deformace.....	46
B. 2 DC05 - 90°; 10% deformace.....	46
B. 3 DC05 - 90°; A_g (25% deformace).....	47
B. 4 DC05 - 90°; A_{80mm} (45% deformace).....	48

Příloha A. 1 DC05 - 0°; 0% deformace

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-5,05	79,6	15	40	5,05	80,3
2	0	0,00	79,0	16	50	-5,05	79,8
3	0	5,05	79,8	17	50	0,00	78,4
4	10	-5,05	79,3	18	50	5,05	80,9
5	10	0,00	80,4	19	60	-5,05	78,5
6	10	5,05	77,3	20	60	0,00	77,2
7	20	-5,05	79,1	21	60	5,05	77,1
8	20	0,00	79,6	22	70	-5,05	78,7
9	20	5,05	79,5	23	70	0,00	77,4
10	30	-5,05	77,6	24	70	5,05	78,2
11	30	0,00	80,1	25	80	-5,05	80,8
12	30	5,05	77,7	26	80	0,00	80,5
13	40	-5,05	79,3	27	80	5,05	81,0
14	40	0,00	78,7				

Příloha A. 2 DC05 - 0°; 10% deformace

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0,00	-4,725	105	18	44,00	4,725	107
2	0,00	0,000	102	19	52,80	-4,725	107
3	0,00	4,725	106	20	52,80	0,000	103
4	8,80	-4,725	103	21	52,80	4,725	103
5	8,80	0,000	100	22	61,60	-4,725	103
6	8,80	4,725	100	23	61,60	0,000	104
7	17,60	-4,725	102	24	61,60	4,725	106
8	17,60	0,000	100	25	70,40	-4,725	106
9	17,60	4,725	102	26	70,40	0,000	101
10	26,40	-4,725	100	27	70,40	4,725	105
11	26,40	0,000	102	28	79,20	-4,725	105
12	26,40	4,725	105	29	79,20	0,000	107
13	35,20	-4,725	107	30	79,20	4,725	103
14	35,20	0,000	106	31	88,00	-4,725	105
15	35,20	4,725	103	32	88,00	0,000	103
16	44,00	-4,725	105	33	88,00	4,725	105
17	44,00	0,000	105				

Příloha A. 3 DC05 - 0°; A_g (25% deformace)

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-4,35	119	18	50	4,35	114
2	0	0	118	19	60	-4,35	111
3	0	4,35	113	20	60	0	117
4	10	-4,35	115	21	60	4,35	115
5	10	0	114	22	70	-4,35	118
6	10	4,35	118	23	70	0	119
7	20	-4,35	115	24	70	4,35	120
8	20	0	116	25	80	-4,35	110
9	20	4,35	114	26	80	0	118
10	30	-4,35	113	27	80	4,35	113
11	30	0	118	28	90	-4,35	114
12	30	4,35	110	29	90	0	116
13	40	-4,35	111	30	90	4,35	114
14	40	0	114	31	100	-4,35	115
15	40	4,35	116	32	100	0	116
16	50	-4,35	114	33	100	4,35	119
17	50	0	111				

Příloha A. 4 DC05 - 0°; A_{80mm} (45% deformace)

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-4,2	116	22	52,2	-4,2	130
2	0	0	119	23	52,2	0	128
3	0	4,2	121	24	52,2	4,2	125
4	11,6	-4,2	116	25	58	-4,2	121
5	11,6	0	122	26	58	0	120
6	11,6	4,2	118	27	58	4,2	122
7	23,2	-4,2	117	28	69,6	-4,2	119
8	23,2	0	122	29	69,6	0	118
9	23,2	4,2	121	30	69,6	4,2	121
10	34,8	-4,2	119	31	81,2	-4,2	117
11	34,8	0	118	32	81,2	0	119
12	34,8	4,2	126	33	81,2	4,2	116
13	40,6	-4,2	138	34	92,8	-4,2	120
14	40,6	0	139	35	92,8	0	119
15	40,6	4,2	127	36	92,8	4,2	115
16	43,5	-4,2	126	37	104,4	-4,2	118
17	43,5	0	139	38	104,4	0	116
18	43,5	4,2	137	39	104,4	4,2	119
19	46,4	-4,2	132	40	116	-4,2	115
20	46,4	0	125	41	116	0	114
21	46,4	4,2	130	42	116	4,2	117

Příloha B. 1 DC05 - 90°; 0% deformace

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-5,05	78,7	15	40	5,05	78,7
2	0	0,00	75,5	16	50	-5,05	77,9
3	0	5,05	76,3	17	50	0,00	78,0
4	10	-5,05	78,4	18	50	5,05	77,4
5	10	0,00	77,4	19	60	-5,05	78,5
6	10	5,05	77,2	20	60	0,00	76,0
7	20	-5,05	78,3	21	60	5,05	78,3
8	20	0,00	78,1	22	70	-5,05	79,3
9	20	5,05	77,0	23	70	0,00	79,1
10	30	-5,05	79,2	24	70	5,05	77,6
11	30	0,00	75,2	25	80	-5,05	76,5
12	30	5,05	78,1	26	80	0,00	78,9
13	40	-5,05	76,1	27	80	5,05	77,4
14	40	0,00	77,8				

Příloha B. 2 DC05 - 90°; 10% deformace

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0,00	-4,725	104	18	44,00	4,725	106
2	0,00	0,000	105	19	52,80	-4,725	106
3	0,00	4,725	106	20	52,80	0,000	107
4	8,80	-4,725	103	21	52,80	4,725	102
5	8,80	0,000	104	22	61,60	-4,725	106
6	8,80	4,725	103	23	61,60	0,000	105
7	17,60	-4,725	105	24	61,60	4,725	106
8	17,60	0,000	106	25	70,40	-4,725	104
9	17,60	4,725	103	26	70,40	0,000	101
10	26,40	-4,725	105	27	70,40	4,725	102
11	26,40	0,000	103	28	79,20	-4,725	101
12	26,40	4,725	105	29	79,20	0,000	103
13	35,20	-4,725	103	30	79,20	4,725	104
14	35,20	0,000	107	31	88,00	-4,725	101
15	35,20	4,725	106	32	88,00	0,000	102
16	44,00	-4,725	103	33	88,00	4,725	105
17	44,00	0,000	105				

Příloha B. 3 DC05 - 90°; A_g (25% deformace)

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-4,35	117	18	50	4,35	119
2	0	0	116	19	60	-4,35	120
3	0	4,35	118	19	60	0	115
4	10	-4,35	113	21	60	4,35	118
5	10	0	110	22	70	-4,35	116
6	10	4,35	116	23	70	0	117
7	20	-4,35	113	24	70	4,35	119
8	20	0	113	25	80	-4,35	118
9	20	4,35	121	26	80	0	119
10	30	-4,35	122	27	80	4,35	119
11	30	0	118	28	90	-4,35	114
12	30	4,35	112	29	90	0	120
13	40	-4,35	111	30	90	4,35	120
14	40	0	113	31	100	-4,35	120
15	40	4,35	111	32	100	0	114
16	50	-4,35	119	33	100	4,35	115
17	50	0	116				

Příloha B. 4 DC05 - 90°; A_{80mm} (45% deformace)

číslo měření	souřadnice			číslo měření	souřadnice		
	x [mm]	y [mm]	z [HV2]		x [mm]	y [mm]	z [HV2]
1	0	-4,2	114	27	58	4,2	128
2	0	0	117	28	60,9	-4,2	127
3	0	4,2	117	29	60,6	0	126
4	11,6	-4,2	117	30	60,9	4,2	127
5	11,6	0	114	31	63,8	-4,2	123
6	11,6	4,2	111	32	63,8	0	122
7	23,2	-4,2	112	33	63,8	4,2	117
8	23,2	0	116	34	66,7	-4,2	118
9	23,2	4,2	111	35	66,7	0	122
10	34,8	-4,2	118	36	66,7	4,2	116
11	34,8	0	115	37	69,6	-4,2	130
12	34,8	4,2	115	38	69,6	0	116
13	46,4	-4,2	115	39	69,6	4,2	113
14	46,4	0	116	40	81,2	-4,2	115
15	46,4	4,2	119	41	81,2	0	120
16	49,3	-4,2	124	42	81,2	4,2	119
17	49,3	0	126	43	92,8	-4,2	120
18	49,3	4,2	120	44	92,8	0	117
19	52,2	-4,2	132	45	92,8	4,2	110
20	52,2	0	127	46	104,4	-4,2	112
21	52,2	4,2	140	47	104,4	0	108
22	55,1	-4,2	129	48	104,4	4,2	114
23	55,1	0	129	49	116	-4,2	111
24	55,1	4,2	130	50	116	0	112
25	58	-4,2	132	51	116	4,2	112
26	58	0	125				