

Výskum ovplyvnenia povrchovej vrstvy kovov pri rezaní laserom pomocou merania mikrotvrdosti

Bc.Patrik Doblej

Diplomová práca
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práca pozostáva z teoretickej a praktickej časti. Teoretická časť obsahuje rozdelenie a popis najznámejších a najpoužívanejších skúšok tvrdosti a mikrotvrdosti, ich princíp a postup merania, popis štruktúry kovov a jej zmeny s teplotou, rozdelenie laserov a popis ich funkcie. Praktická časť sa zaoberá štúdiom a meraním mikrotvrdosti kovov a následným vyhodnotením výsledkov. Na určenie mikrotvrdosti skúšobných vzoriek boli použité vybrané metódy merania. Skúšobné vzorky boli zhotovené vybraným laserom.

Kľúčová slova: mikrotvrdosť, Vickers, laser, oceľ.

ABSTRACT

The master thesis consists of theoretical and practical parts. The theoretical part contains division and description of the most known and widely used hardness and microhardness tests, their principles and measurement procedures, description of the metal structure and its changes according to temperature, division of lasers and description of their function. The practical part deals with the study and measurement of metal microhardness and the subsequent evaluation of results. The selected measurement methods were used to determine the microhardness of test samples. The test samples were made by one of the described lasers.

Keywords: microhardness, Vickers, laser, steel

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČASŤ	11
1 TVRDOSŤ	12
1.1 METÓDY MERANIA TVRDOSTI	12
1.1.1 Skúška podľa Brinella (EN ISO 6506)	14
1.1.2 Ludwikova skúška	18
1.1.3 Skúška podľa Rockwella (EN ISO 6508)	18
1.1.4 Skúška podľa Vickersa (EN ISO 6507)	22
2 MIKROTVRDOSŤ	27
2.1 SKÚŠKA PODĽA VICKERSA	27
2.2 SKÚŠKA PODĽA KNOOPA (EN ISO 4545)	28
2.3 SKÚŠKA PODĽA CHRUŠČOVA A BERKOVICHA	30
2.4 SKÚŠKA PODĽA GRODZINSKÉHO	32
2.5 SKÚŠKA PODĽA HANEMANNA	33
3 ŽELEZO A JEHO ZLIATINY	35
3.1 ČISTÉ ŽELEZO	35
3.2 MODIFIKÁCIE	36
3.3 ROVNOVÁŽNE SÚSTAVY ŽELEZO - UHLÍK	36
3.4 NEROVNOVÁŽNE SÚSTAVY ŽELEZO – UHLÍK	38
3.5 ZÁKLADNÉ DELENIE SÚSTAV	38
3.6 ROVNOVÁŽNÝ METASTABILNÝ DIAGRAM Fe-C	38
3.7 ROVNOVÁŽNÝ STABILNÝ DIAGRAM Fe-C	41
3.8 TRANSFORMAČNÉ DIAGRAMY	42
3.8.1 Izotermický rozpad austenitu – IRA	43
3.8.2 Anizotermický rozpad austenitu – ARA	44
3.8.3 Perlitická premena	45
3.8.4 Bainitická premena	45
3.8.5 Martenzitická premena	46
4 OBRÁBANIE LASEROM	47
4.1 CHARAKTERISTIKA LASERA	47
4.2 ROZDELENIE LASEROV	48
4.3 KONŠTRUKCIA LASERU	50
4.3.1 Pevnolátkové lasery	52
4.3.2 Polovodičové lasery	52
4.3.3 Plynové lasery	53
4.3.4 Kvapalinové lasery	54

4.4	REZANIE LASEROM.....	54
4.4.1	Laserové tavné rezanie.....	55
4.4.2	Laserové rezanie plameňom.....	55
4.4.3	Sublimačné rezanie plameňom.....	55
II	PRAKTICKÁ ČASŤ.....	56
5	PRAKTICKÁ ČASŤ.....	57
5.1	CIELE PRÁCE.....	57
5.2	SKÚŠOBNÉ VZORKY.....	57
5.2.1	Použité materiály.....	57
5.2.1.1	Oceľ 11 375 – ČSN 41 1375.....	57
5.2.1.2	Oceľ 11 523 – ČSN 41 1523.....	57
5.2.1.3	Oceľ 12 050 - ČSN 41 2050.....	58
5.2.1.4	Oceľ 14 220 - ČSN 41 4220.....	58
5.2.1.5	Oceľ 19 312 - ČSN 41 9312.....	59
5.2.2	Výroba skúšobných vzoriek.....	60
5.2.3	Príprava skúšobných vzoriek.....	60
5.2.4	Meranie mikrotvrdości.....	61
6	VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT.....	63
6.1	OCEE 11 375 – ČSN 41 1375.....	65
6.2	OCEE 11 523 – ČSN 41 1523.....	68
6.3	OCEE 12 050 – ČSN 41 2050.....	72
6.4	OCEE 14 220 – ČSN 41 4220.....	75
6.5	OCEE 19 312 - ČSN 41 9312.....	79
7	DISKUSIA VÝSLEDKOV.....	83
	ZÁVER.....	89
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY.....	91
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	94
	ZOZNAM OBRÁZKOV.....	95
	ZOZNAM TABULIEK.....	98

ÚVOD

Človek je svojimi zmyslami schopný rozlišovať rôzne vlastnosti predmetov. Nervovými zakončeniami rozlišuje veľkosť, tvar, drsnosť a v neposlednom rade aj tvrdosť. Všetky predmety, ktoré človek nie je schopný nestlačiť vlastnou silou považuje za tvrdé. Ale to je v súčasnosti nedostačujúce.

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

V súčasnej dobe sa čoraz viac začínajú používať skúšky mikrotvrdosti pri ktorých dochádza k ešte menšiemu poškodeniu materiálu, čo je spôsobené použitím menších zaťažení. Tieto skúšky umožňujú merať tvrdosť veľmi malých predmetov, meranie vybraných oblastí na vzorke a meranie jednotlivých štruktúrnych zložiek daného materiálu.

Hlavným cieľom diplomovej práce je porovnať tvrdosť vzoriek. V teoretickej časti sa budem zaoberať vypracovaním literárnej rešerše so zameraním na najpožívanejšie druhy skúšok tvrdosti a mikrotvrdosti, popisom štruktúry kovov, rozdelením laserov a popis funkcie. V praktickej časti budem experimentálne analyzovať tvrdosť vzoriek zhotovených pomocou laseru a skúmať, aký vplyv bude mať teplota pri rezaní na výslednú mikroštruktúru. Následne vyhodnotím a porovnáam jednotlivé vzorky a metódy merania.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 TVRDOSTĚ

Skúšky tvrdosti sú jedny z najstarších a najrozšírenejších skúšok kovových, nekovových a iných materiálov. Aj keď dochádza k porušeniu materiálu, sú tieto skúšky v podstate ne-deštruktívne, pretože funkčné a vzhľadové poškodenie skúšobných dielcov je väčšinou bezvýznamné.

Tvrdosť nemožno jednoznačne definovať ako fyzikálnu veličinu. Jej hodnota je závislá na komplexných vlastnostiach povrchu skúšaného materiálu a od skúšobných podmienok. Pri skúške tvrdosti pôsobí na skúšaný povrch cudzie teleso z tvrdého materiálu a výsledok tohto pôsobenia sa vyjadří ako tvrdosť. (Tillová, Belan, 2010, s.3)

Podľa (Veles, 1985):

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

A (Tillová, 2010, s.3) tvrdí že:

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

Výslednú tvrdosť vyhodnocujeme podľa veľkosti deformácie pri pôsobení stálej sily alebo podľa veľkosti sily potrebnej k určitej deformácii. Pre lepšiu reprodukovateľnosť merania, je nutné do vzorcov pre výpočet tvrdosti dosadzovať všetky veličiny v jednotnej forme, silu v [N] a plochu v [mm²]. (Skočovský, 2001, s.124)

Tvrdosť materiálu sa mení podľa jeho čistoty, stavu štruktúry, druhu atómovej väzby, veľkosti vnútorného napätia v kove, teploty skúšaného kovu a pod.

Hodnoty tvrdosti sa uvádzajú bezrozmerné s udaním spôsobu merania alebo stupnice. (Tillová, 2010, s.4)

1.1 Metódy merania tvrdosti

Na meranie tvrdosti bolo vyvinuté množstvo skúšok. Vďaka svojej jednoduchosti a rýchlosti patria skúšky tvrdosti v praxi medzi veľmi používané.

Na rozdiel od väčšiny mechanických skúšok sa skúšaný kov pri meraní tvrdosti neporuší, pretože meraním je ovplyvnený len malý objem materiálu.

Skúšky tvrdosti možno rozdeliť:

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

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

2. podľa **účelu merania tvrdosti**:

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

3. podľa **princípu**:

- vtláčacie
- vrypové
- odrazové

Medzi najrozšírenejšie patria vtláčacie skúšky, pri ktorých sa vyhodnocuje veľkosť plastickej deformácie (Brinell, Vickers, Knoop), alebo veľkosť elasticko-plastickej deformácie (Rockwell).

Pri vrypových metódach sa na vyleštenom povrchu vytvorí vryp pomocou diamantového telesa. Výsledná tvrdosť závisí na šírke vrypu (Martensova metóda).

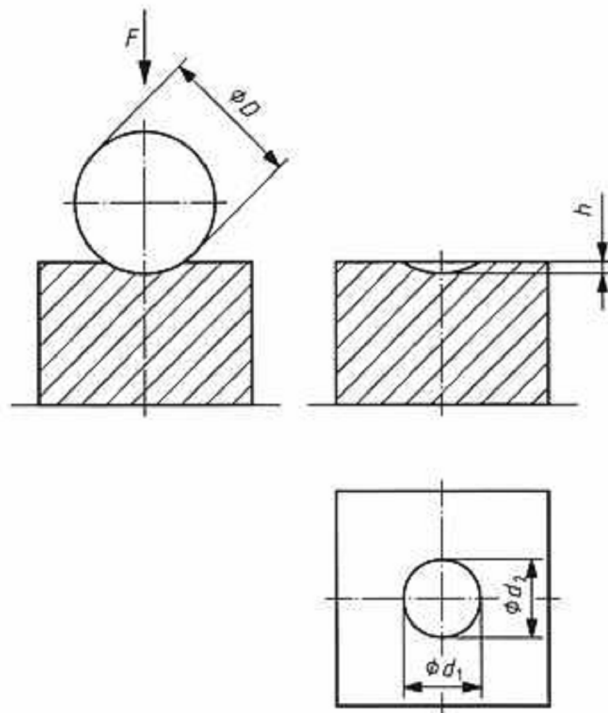
Odrazové metódy spočívajú v odraze padajúceho telieska od skúšanej vzorky. Kinetická energie padajúceho telieska vytvorí jamku v skúšanom kove a pomocou zvyšnej energie na teliesko odrazí od skúšaného materiálu do určitej výšky. Pomocou výšky odrazu sa zistí výsledná tvrdosť materiálu (Shore). Metóda sa používa na skúšanie veľmi tvrdých materiálov.

Princíp kyvadlových metódach je podobný ako pri odrazových metódach, ale namiesto padajúceho telieska sa používa kyvadlo.

Hodnoty tvrdosti je možné porovnať iba v prípade, že sa použije rovnaká metóda a rovnaké skúšobné zariadenie. (Tillová,2010,s.5)

1.1.1 Skúška podľa Brinella (EN ISO 6506)

Autor metódy je Švédsky inžinier J.A.Brinell. Podstatou skúšky, je vtlačanie skúšobného telieska (kalenej alebo tvrdokovovej guľôčky) do skúšaného materiálu silou F . Zaťažovacia sila musí pôsobiť kolmo na povrch po stanovený čas t . Po odľahčení sa odmeria priemer vtlačku d . (Zábavník, 2009)



Obr. 1. Princíp skúšky podľa Brinella

Tvrdosť sa stanovuje ako pomer zaťaženia a povrchu vtlačku. Za vtlačok sa považuje guľový vrchnáčik a jeho plocha sa vypočíta zo strednej hodnoty priemeru vtlačku a guľôčky.

Stredný priemer vtlačku sa vypočíta ako

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} [mm] \quad (1)$$

Kde h je hĺbka vtlačku a vypočíta sa ako

$$h = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2} \right) \quad (2)$$

Hodnota Brinellovej tvrdosti je

$$HBW = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h} \quad (3)$$

$$HBW = 0,102 \cdot \left(\frac{2F}{1 - \sqrt{1 - d^2 / D^2}} \right) \quad (4)$$

Skúška prebieha pri teplote okolia 10-35°C. Skúšobné zaťaženie sa volí podľa Tab.1.

a musí byť vybrané tak, aby priemer vtlačku d bol v rozmedzí 0,24 – 0,6 D . Skúšaná vzorka musí byť umiestnená na tuhej podložka tak, aby sa v priebehu skúšky nepohla. Styčné plochy musia byť čisté, odmastené a bez cudzích predmetov. Vtláčané teleso musí pôsobiť kolmo na skúšaný povrch bez chvení a nárazov. Počas skúšky musí byť stroj chránený pred chvení a nárazmi, ktoré by mohli ovplyvniť výsledky skúšky. Čas od začiatku skúšky po plné zaťaženie musí byť v rozmedzí 2-8s. Plné pôsobenie zaťaženia sa pohybuje od 10 do 15s. Vzdialenosť vtlačku od okraja vzorku musí byť min. 2,5-násobok priemernej hodnoty vtlačku. Po vykonaní skúšky sa meria priemer vtlačku v dvoch na seba kolmých smeroch. (ISO 6506-1,2005)

Tab.1. Skúšobné zaťaženia pre Brinellovu metódu

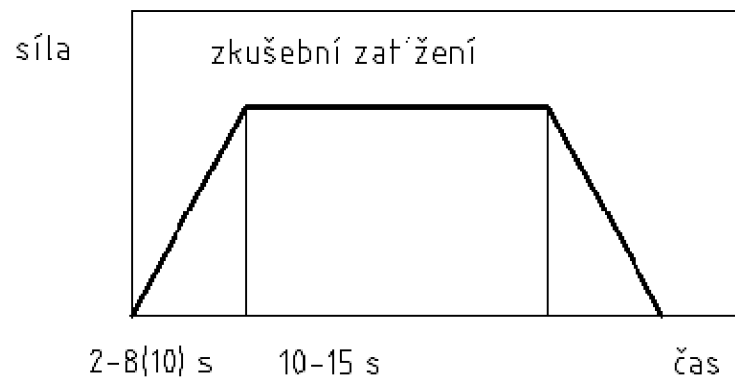
Označenie tvrdosti	Priemer guľôčky z tvrdokovu D [mm]	Pomer. zaťaženie- priemer guľôčky 0,102 . F/D^2 [N.mm ²]	Menovitá hodnota skúšobného zaťaženia F	
			[N]	[kPa]
HBW 10/3000	10	30	29 420	3000
HBW 10/1500	10	15	14 170	1500
HBW 10/1000	10	10	9 807	1000
HBW 10/500	10	5	4 903	500
HBW 10/250	10	2,5	2 542	250
HBW 10/100	10	1	980,7	10
HBW 5/750	5	30	7 355	750
HBW 5/250	5	10	2 452	250

HBW 5/125	5	5	1 226	125
HBW 5/62,5	5	2,5	612,9	62,5
HBW 5/25	5	1	245,2	2,5
HBW 2,5/187,5	2,5	30	1 839	187,5
HBW 2,5/62,5	2,5	10	612,9	62,5
HBW 2,5/31,25	2,5	5	306,5	31,25
HBW	2,5	2,5	153,2	15,625
HBW 2,5/6,25	2,5	1	61,29	6,25
HBW 1/30	1	30	294,2	30
HBW 1/10	1	10	98,07	10
HBW 1/5	1	5	49,03	5
HBW 1/2,5	1	2,5	24,52	2,5
HBW 1/1	1	1	9,807	1,0

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

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

(Tillová,2010,s.7,8)



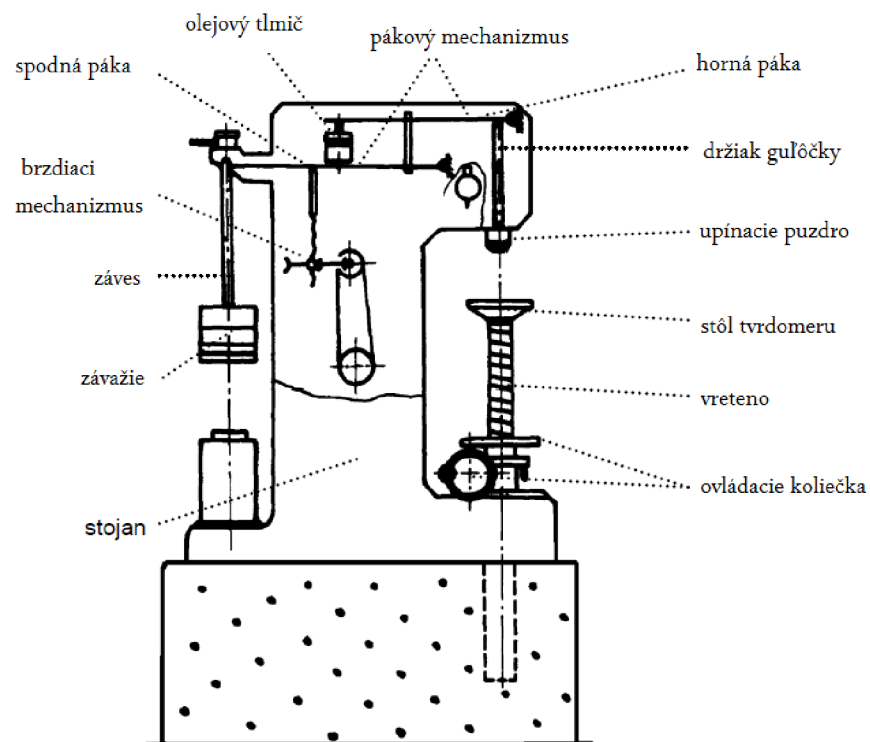
Obr.2. Priebek skúšobného zaťaženia

(METROTEST,2010, 2012-10-19)

Označenie tvrdosti:

600 HBW 1/30/20 - hodnota tvrdosti 600

- priemer guľôčky 1 mm
- skúšobné zaťaženie 30 kp
- čas zaťaženia 20s (Zábavník, 2009)



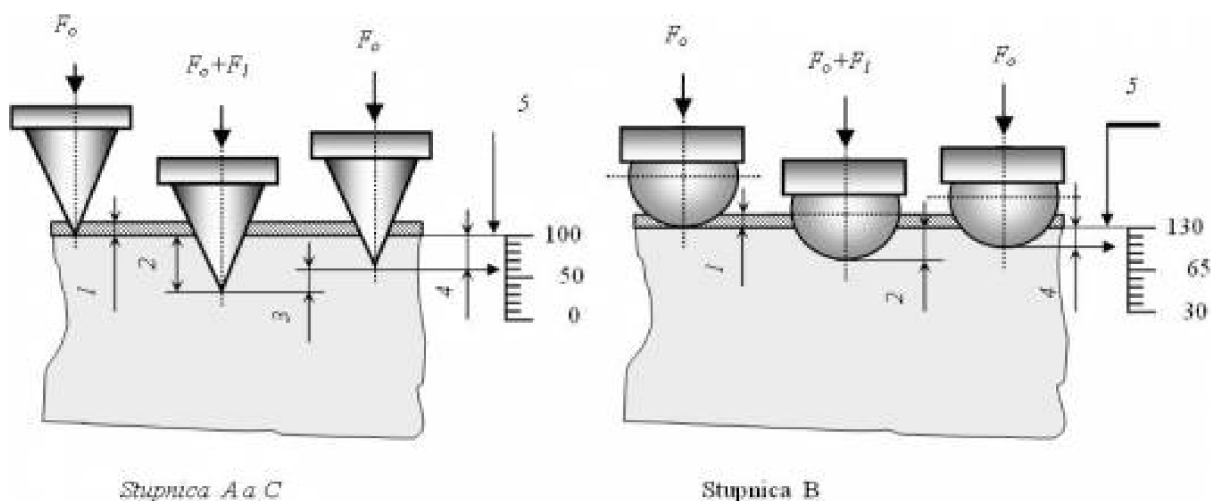
Obr.3. Schéma meracieho zariadenia- Brinell

1.1.2 Ludwikova skúška

Brinellova skúška sa stala veľmi rýchlo rozšírená. Bola však zistená nevýhoda v tom, že tvrdosť je závislá na veľkosti skúšobného zaťaženia. Pre Brinellovu skúšku neplatí zákon úmernosti pretvorenej práce a deformovaného objemu (Kick, 1885). Pomery napätosti sa pri zmene zaťaženia menia zložitým spôsobom. Ludwik tento problém odstránil tým, že nahradil guľôčku kužeľom. Pri použití kužeľa je pomer tangenciálneho a normálového napätia rovnaký a hodnota tvrdosti není závislá na zažžení. Kužeľ je vyrobený z kalenej oceli, má vrcholový uhol najčastejšie 90° (používa sa aj 60 a 120°) a polomer zaoblenia vrcholu $0,2$ mm. Výroba vnikacieho telieska je veľmi finančne náročná. Skúška nie je vhodná pre tvrdé materiály napr. kalenú oceľ. Táto metóda sa neujala ale mala veľký vplyv na vývoj ďalších skúšobných metód. (Fakulta strojná západočeské univerzity v Plzni, 2012, s.3.)

1.1.3 Skúška podľa Rockwella (EN ISO 6508)

Vynálezcom metódy je S.P. Rockwell. Počas skúšky sa do skúšaného materiálu vtlačá diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° a polomerom zaoblenia hrotu $0,2$ mm alebo oceľová guľôčka s priemerom $1,5875$ mm prípadne $3,175$ mm, v závislosti od predpokladanej tvrdosti materiálu. Diamantový kužeľ sa používa pre tvrdé materiály a oceľová guľôčka pre stredne tvrdé a mäkké materiály. Meria sa trvalá hĺbka vtlačku h pri predbežnom a po odstránení prídavného zaťaženia. (Zábavník, 2009)



Obr. 4. Princíp skúšky podľa Rockwella (Iždinská, 2006, 2012-10-19)

Meranie by malo byť realizované pri teplote 10-35°C. Skúšaná vzorka musí byť umiestnená na tvrdom povrchu a zabezpečená proti posunutiu. Povrch skúšaného materiálu musí byť kolmý na os vnikacieho telieska. Povrch vzorky musí byť čistý, odmastený a zbavený cudzích predmetov. Vyberie sa vhodná stupnica z Tab.3. a nastaví sa skúšobné zaťaženie. Meracie teliesko sa privedie do styku so skúšaným povrchom a zaťaží sa predbežným zaťažením F_0 . V okamihu, keď dosiahneme predpísané predbežné zaťaženia vynulujeme meracie zariadenie hĺbky vtlačku a zaťaženie zvýšime o hodnotu prídavného zaťaženia F_1 . Po uplynutí potrebnej doby pôsobenia prídavného zaťaženia sa toto zaťaženie odstráni (pôsobí len predbežné zaťaženie) a odčíta sa hodnota hĺbky vtlačku h . Na výpočet výslednej tvrdosti použijeme vzorce Tab.4. alebo pri novších meracích zariadeniach ju odčítame priamo na zariadení. Zaťaženia musia narastať konštantne, bez rázov a kmitov. Skúšobné zariadenie musí byť izolované od okolitých chvení a vibrácií. (ISO 6508-1,2005)

Tab.3. Stupnice tvrdosti pre metódu podľa Rockwella

Stupnice tvrdosti	Značka tvrdosti	Typ vtlačacieho telieska	Predbežné zaťaženie F_0 [N]	Prídavné zaťaženie F_1 [N]	Celkové zaťaženie F [N]	Oblasť použitia
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20-88 HRA
B	HRB	Guľôčka 1,5875 mm		882,6	980,7	20-100 HRB
C	HRC	Diamantový kužel		1 373	1 471	20-70 HRC
D	HRD	Diamantový kužel		882,6	890,7	40-77 HRD
E	HRE	Guľôčka 3,175 mm		882,6	980,7	70-100 HRE
F	HRF	Guľôčka 1,5875 mm		490,3	588,4	60-100 HRF
G	HRG	Guľôčka 1,5875 mm		1 373	1 471	30-94 HRG
H	HRH	Guľôčka 3,175 mm		490,3	588,4	80-100 HRH
K	HRK	Guľôčka 3,175mm		1 373	1 471	40-100 HRK

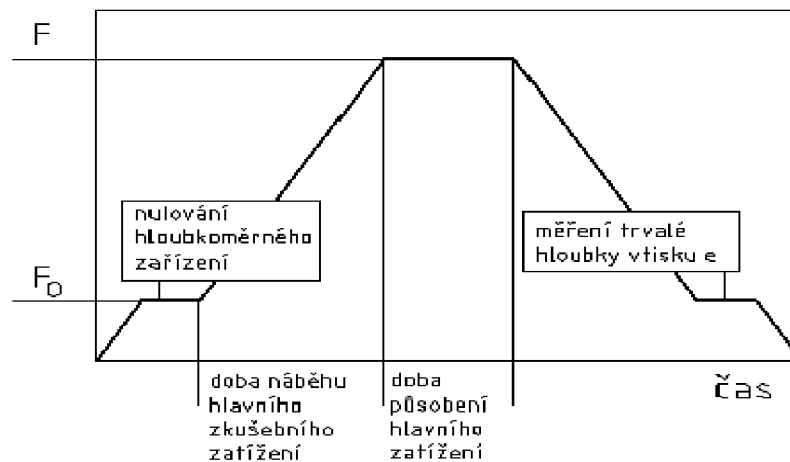
15N	HR15N	Diamantový kužel	29,42	117,1	147,1	70-94 HR15N
30N	HR30N	Diamantový kužel		264,8	294,2	42-86 HR30N
45N	HR45N	Diamantový kužel		411,9	441,3	20-77 HR45N
15T	HR15T	Gul'odka 1,5875 mm		117,1	147,1	67-93 HR15T
30T	HR30T	Gul'odka 1,5875 mm		264,8	294,2	29-82 HR30T
45T	HR45T	Gul'odka 1,5875 mm		411,9	441,3	10-72 HR45T

Pozn.: pre stupnice, ktoré používajú ako vtláčacie telieska gul'ocky, sa značka tvrdosti doplní o „S“, ak je použitá oceľová kalená gul'odka a o „W“, ak je použitá gul'odka z tvrdokovu.

Tab.4. Spôsob výpočtu Rackwellovej tvrdosti

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

(Tillová,2010,s.16)



Obr.5.Priebeh skúšobného zaťaženia

(METROTEST,2010, 2012-10-19)

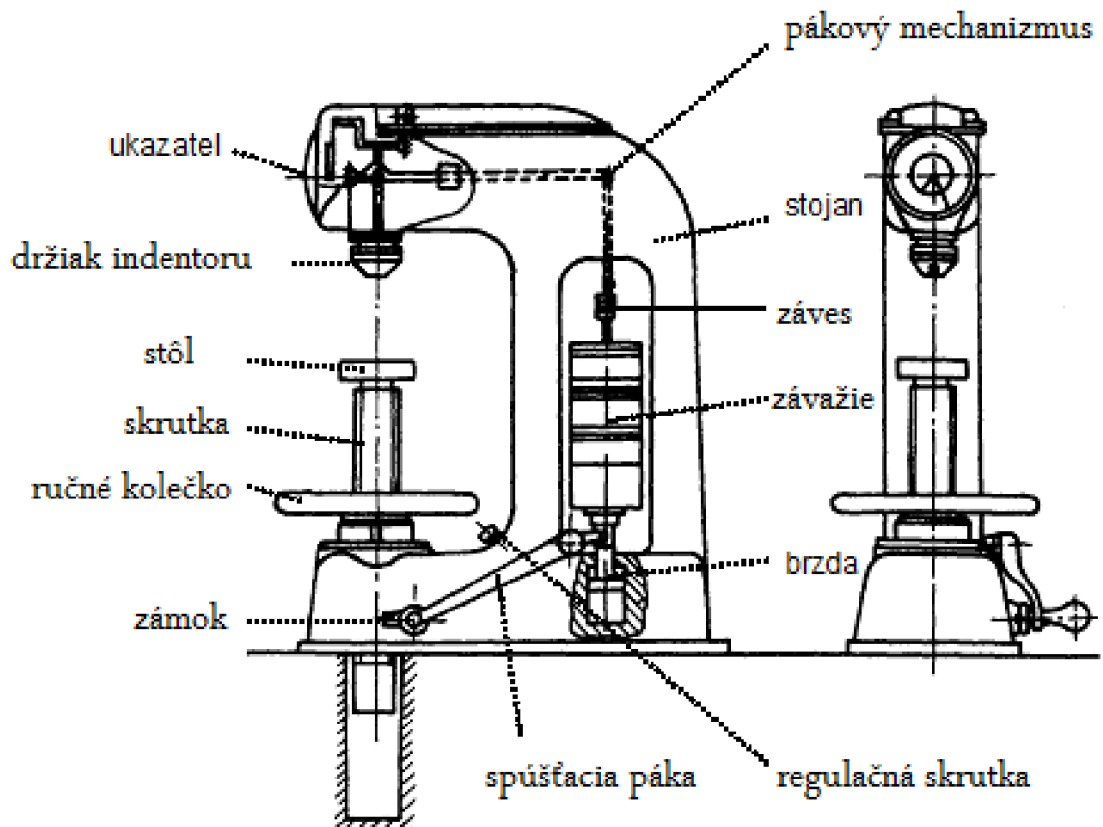
Označenie tvrdosti:

Tvrdosť pre stupnice A,C a D sa označuje hodnotou tvrdosti, písmenami HR a doplnkovým písmenom označujúcim použitú stupnicu

Príklad: 42 HRC – tvrdosť podľa Rockwella 42 nameraná na stupnici C

Tvrdosť pre stupnice B,E,F,G,H a K sa označuje hodnotou tvrdosti, písmenami HR, doplnkovým písmenom označujúcim použitú stupnicu a písmenom, ktoré označuje typ použitej guľôčky (S pre oceľovú kalenú a W pre tvrdokovovú).

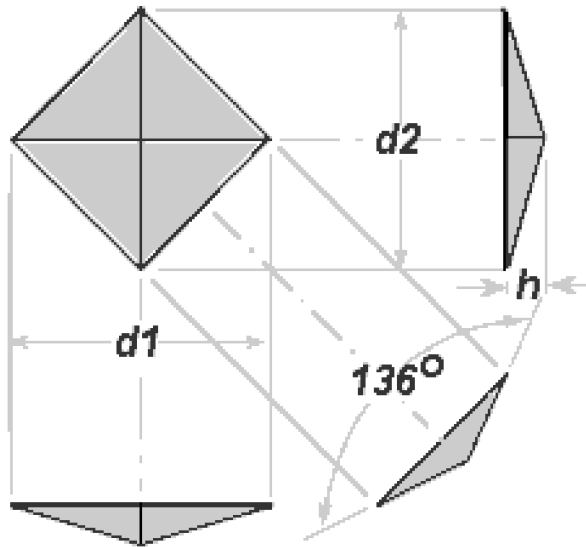
Príklad: 72 HRBW – tvrdosť podľa Rockwella 72 nameraná na stupnici B s použitím guľôčky z tvrdokovu. (Zábavník, 2009)



Obr.6. Schéma meracieho zariadenia- Rockwell

1.1.4 Skúška podľa Vickersa (EN ISO 6507)

Skúška bola prvýkrát použitá v Anglicku v roku 1922. Skúška je vhodná pre meranie tvrdosti aj mikrotvrdosti. Podobne ako pri Rockwellovej skúške sa používa diamantové vnikacie teliesko. Vo Vickersovom prípade sa jedná o diamantový štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom 136° . (Fryš,2005)



Obr.7. Diamantový ihlan Vickers

(Gordon England,2008,2012-10-20)

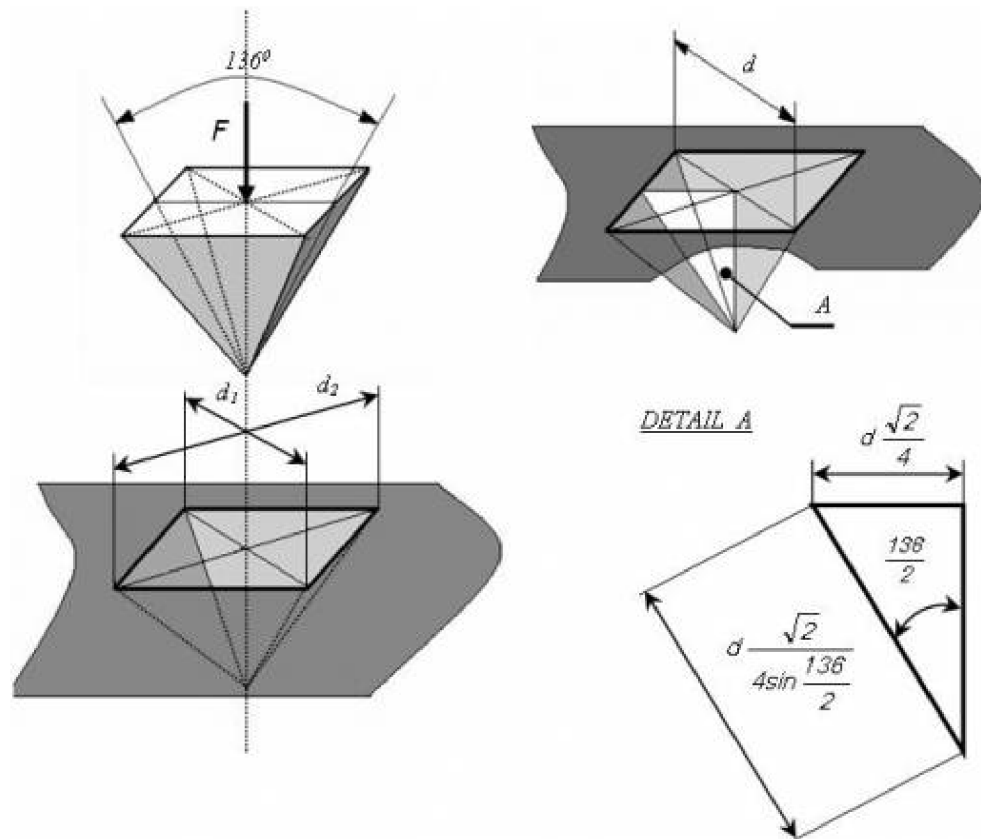
Princíp skúšky je rovnaký ako pri Brinellovej skúške. Podstatou je vtlačanie diamantového štvorbokého ihlanu do skúšaného povrchu predpísanou zaťažujúcou silou F . Po odstránení zaťažujúcej sily sa meria uhlopriečka vzniknutého vtlačku. Podľa (Iždinská,2006, 2012-10-19) je výsledná tvrdosť daná podielom zaťažujúcej sily F a plochy vzniknutého vtlačku S :

$$HV = \frac{F}{S} \quad (5)$$

$$HV = \frac{0,189.F}{d^2} \quad (6)$$

F- zatěžující síla [N]

d- aritmetický průměr naměřených délek úhlopříček [mm]



Obr.8. Meranie vtlačkov- Vickers (Iždinská,2006, 2012-10-19)

Vickersova skúška tvrdosti je vhodná pre dĺžky uhlopriečok vtlačku od 0,02 mm do 1,4 mm. Ak znížime skúšobné zaťaženie, zvýšime rozptyl výsledkov merania. To platí najmä pre skúšky tvrdosti pri nízkom zaťažení a skúšky mikrotvrdosti. Pri meraní mikrotvrdosti je zložité dosiahnuť lepšiu presnosť stanovenia priemernej dĺžky uhlopriečky vtlačku ako $\pm 0,001$ mm. (Tillová,2010,s.11)

Tab.5. Skúšky podľa Vickersa

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

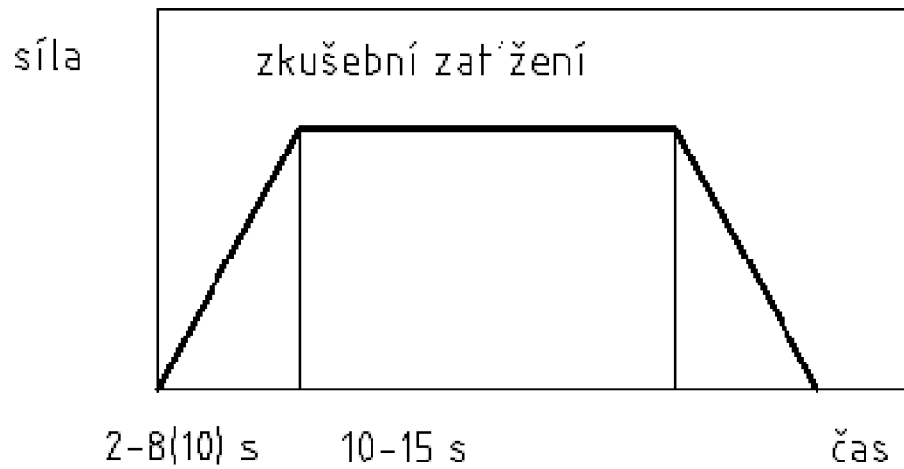
(Tillová,2010,s.11)

Skúška štandardne prebieha pri teplote okolia 10-35°C. Skúšaná vzorka musí byť umiestnená na tvrdom povrchu a zabezpečená proti posunutiu. Pre všetky metódy Vickers sa používa rovnaké skúšobné teliesko a to diamantový štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom $136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$. Zaťažujúca sila musí pôsobiť kolmo na skúšaný povrch. Povrch skúšaného vzorku musí byť čistý, odmastený a zbavený cudzích predmetov. Skúšobné zaťaženia sa volia podľa hrúbky a tvrdosti skúšaného materiálu z Tab.6. Zaťaženie pôsobí bez chvení, otrasov a vibrácií. Po skúške sa merajú dĺžky uhlopriečok a dopočíta sa výsledná tvrdosť. Rozdiel medzi dĺžkou uhlopriečok jedného vtlačku by nemal byť väčší ako 5%. (METROTEST,2010, 2012-10-19)

Tab.6. Skúšobné zaťaženia pre Vickersovu metódu

Skúška tvrdosti		Skúška tvrdosti pri nízkom zaťažení		Skúška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]	Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1417
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

(METROTEST,2010, 2012-10-19)



Obr.9.Priebeh skúšobného zataženia

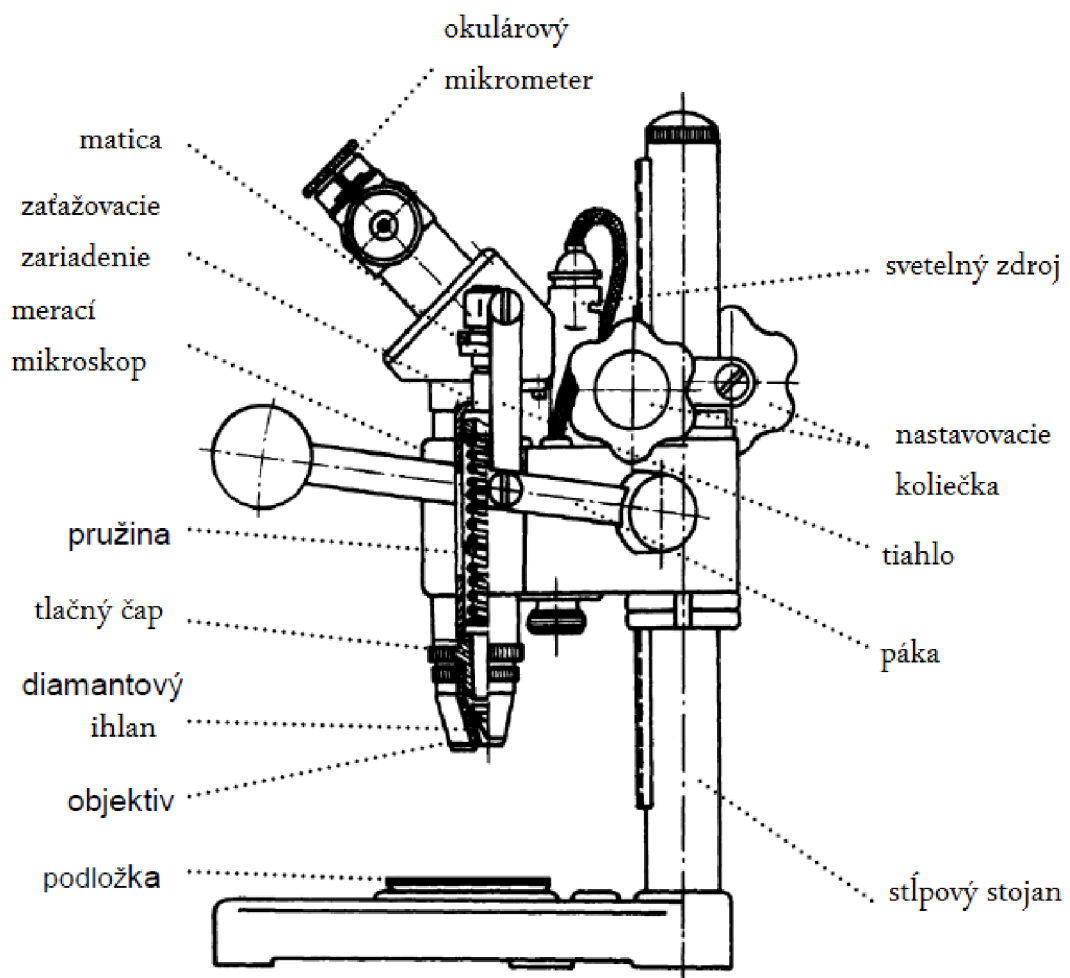
(METROTEST,2010, 2012-10-19)

Označenie tvrdosti:

Vickersova tvrdosť sa hodnotou tvrdosti, písmenami HV a doplnkovými číslami označujúcimi podmienky pri skúške:

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

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



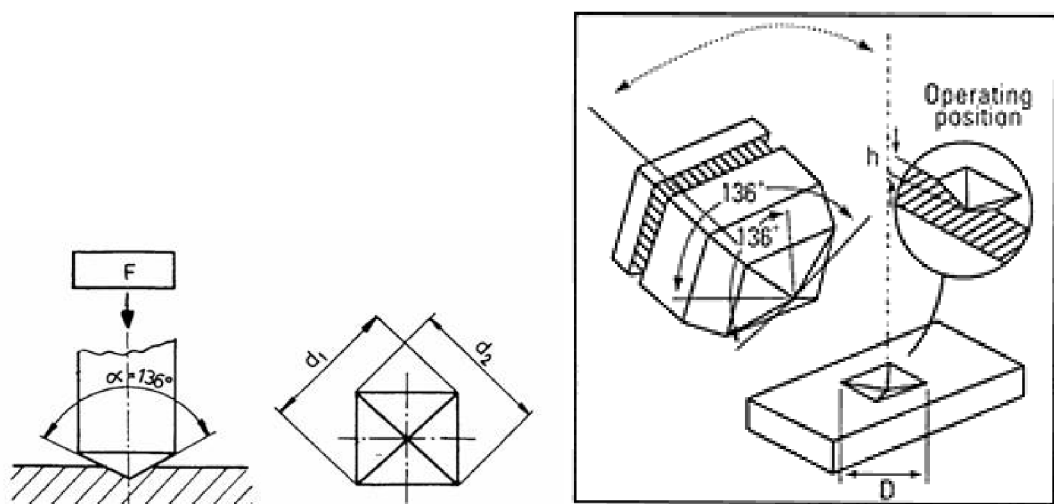
Obr.9. Schéma tvrdomeru Vickers

2 MIKROTVRDOSTĚ

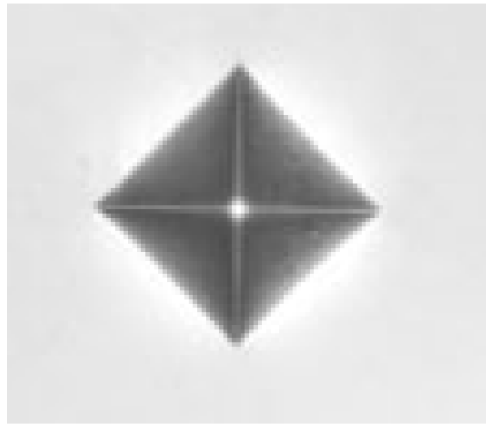
Na meranie mikrotvrdoosti sa najčastejšie využívajú metódy merania podľa Vickersa, Knoop-a. V oboch prípadoch je na meranie použité diamantové vnikacie teliesko, ktoré má tvar ihlanu. Pri bežných skúškach tvrdosti podľa Vickersa sa používajú zaťaženia 10-1200N. Skúšky mikrotvrdoosti prebiehajú pri zaťaženiach 1-1000g (0,09807-9,807N). S použitím menších zaťažení presnosť merania klesá. Vtlačky pri meraní mikrotvrdoosti sú veľmi malé a preto je toto meranie vhodné pre malé a tenké predmety, meranie vybraných oblastí na vzorke, meranie mikrotvrdoosti štruktúrnych zložiek, hodnotenie tepelne a chemicko-tepelne spracovaných vrstiev, meranie povlakov, meranie krahkých materiálov a pod. Menej používané sú metódy podľa Meincka a Attingera, Chruščova a Berkoviča, Hanemanna alebo skúška na dvojkuželi (Grodzinski).

2.1 Skúška podľa Vickersa

Meranie mikrotvrdoosti a tvrdosti podľa Vickersa je rovnaké. Jediným rozdielom je veľkosť použitého zaťaženia. Pri meraní mikrotvrdoosti sa používa zaťaženie 0,09807 - 1,961N (tab.5.)



Obr.10. Princíp skúšky podľa Vickersa (Doležal,2005,s.9)



Obr.11. Vtlačok po skúške Vickers

(Struers,2012,2012-10-20)

Po odstránení zaťaženia vznikne vtlačok (Obr.12). Pretože sú vtlačky malé na presné meranie uhlopriečok vtlačku sa používajú optické prístroje. Výsledná tvrdosť sa dopočíta podľa vzorca:

$$HV = \frac{0,189.F}{d^2} \quad (7)$$

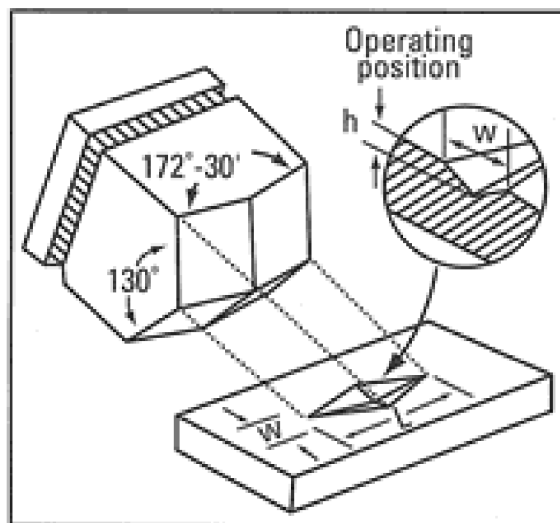
F- zaťažujúca sila [N]

d- aritmetický priemer nameraných dĺžok uhlopriečok [mm]

Skúška mikrotvrdości podľa Vickersa je veľmi rozšírená. Princíp skúšky sa používa aj pri ďalších metódach (Knoop, Berkovich). Rozdielom je len použité vnikacie teliesko.

2.2 Skúška podľa Knoop (EN ISO 4545)

Skúška bola vytvorená v roku 1939 Národným úradom pre normy v USA. Táto meracia metóda používa ako vnikacie teliesko diamantový ihlan (obr. 13.). Skúška je určená na meranie veľmi tenkých vrstiev a mikrotvrdości. (Struers,2012,2012-10-20)

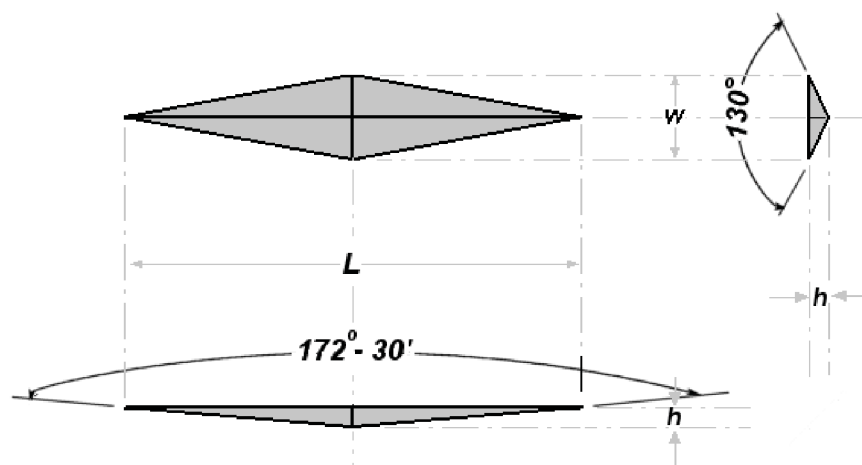


Obr.12. Vnikacie teliesko Knoop (Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni,2012, s.6.)

Princíp skúšky je v podstate zhodný s Vickersovou skúškou. Diamantový ihlan o vrcholových uhloch $172,5$ a 130° sa vtlačá do skúšaného materiálu určitou silou. Zaťažujúca sila môže byť max. $9,807$ N. Vytvorený vtláčok má tvar kosoštvorca. Po odstránení zaťaženia je pre vyhodnotenie potrebné zmerať len dĺžku dlhšej uhlopriečky. Výsledná tvrdosť je definovaná ako podiel sily a druhej mocniny dĺžky uhlopriečky.

$$HK = \frac{1,4529 \cdot F}{d^2} \quad (8)$$

Je veľmi dôležité aby povrch skúšaného telesa bol čistý, odmastený a zbavený všetkých nečistôt. Skúšaná vzorka musí byť pevne uložená aby sa počas skúšky nepohla. Veľké nároky sú kladené aj na ostrosť hrán vtláčajúceho telieska.



Obr.13. Tvar vtláčku pri Knoopovej skúške

Tab.7. Skúšobné zaťaženia pre Knoopovu metódu

Skúška mikrotvrlosti podľa Knoopu	
Symbol tvrdosti	Nominálna hodnota skúšobného zaťaženia F [N]
HK 0,01	0,09807
HK 0,02	0,1961
HK 0,025	0,2452
HK 0,05	0,4903
HK 0,1	0,9807
HK 0,2	1,961
HK 0,3	2,942
HK 0,5	4,903
HK 1	9,807

Označenie tvrdosti:

Tvrdosť podľa Knoopu sa označuje hodnotou tvrdosti, písmenami HK a prídavnými číslami, ktoré charakterizujú veľkosť skúšobného zaťaženia a dobu pôsobenia tohto zaťaženia.

640 HV 0,1 = tvrdosť podľa Knoopu 640 stanovená pri skúšobnom zaťažení 0,9807 N pôsobiacom po dobu od 10 do 15 s.

640 HV 0,1/20 = tvrdosť podľa Knoopu 640 stanovená pri skúšobnom zaťažení 0,9807 N pôsobiacom po dobu 20 s. (MATULA,2011.s.44)

2.3 Skúška podľa Chruščova a Berkovicha

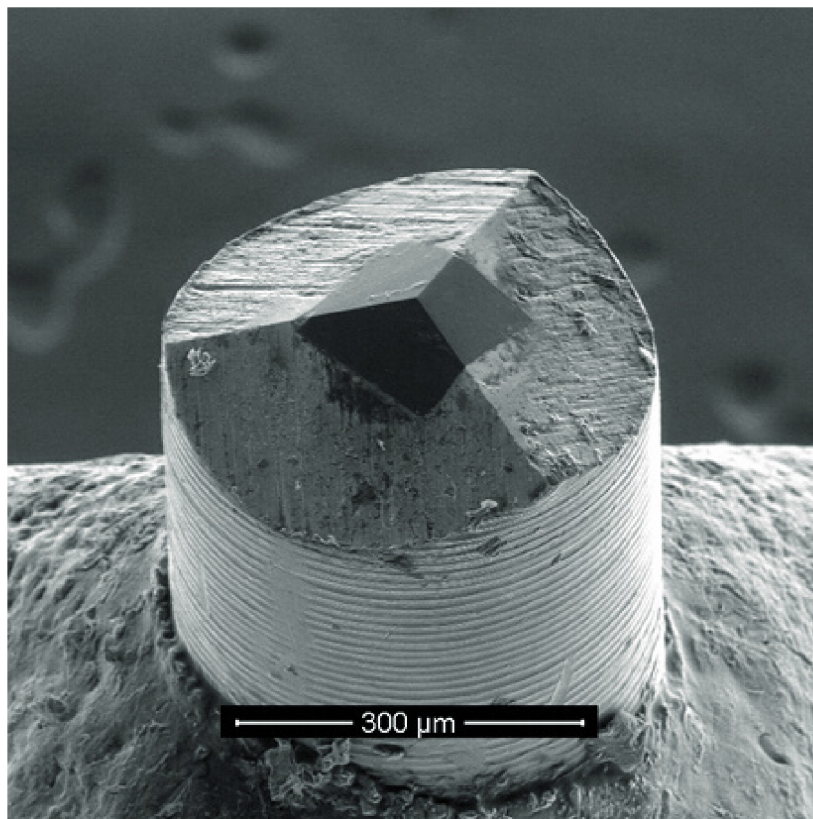
Skúška je založená na rovnakom princípe ako skúška podľa Vickersa, ale namiesto štvorbokého ihlanu sa používa trojboký ihlan s uhlom 65° medzi bočnými stenami a výškou. Hlavným dôvodom uvedenia nového vnikacieho telieska bola problematická výroba štvorbokého ihlanu (používaného pre skúške Vickers) a dodržanie jeho geometrie. V súčasnej dobe je Berkovichov ihlan používaný pri meraní mikro a nanotvrlosti. Na zistenie výslednej

mikrotvrdości je potrebné zmerať hĺbku vzniknutého vtlačku a poznať veľkosť použitého zaťaženia. Mikrotvrdosť potom zistíme zo vzorca:

$$H_{CH} = \frac{1570 \cdot F}{l^2} \quad (9)$$

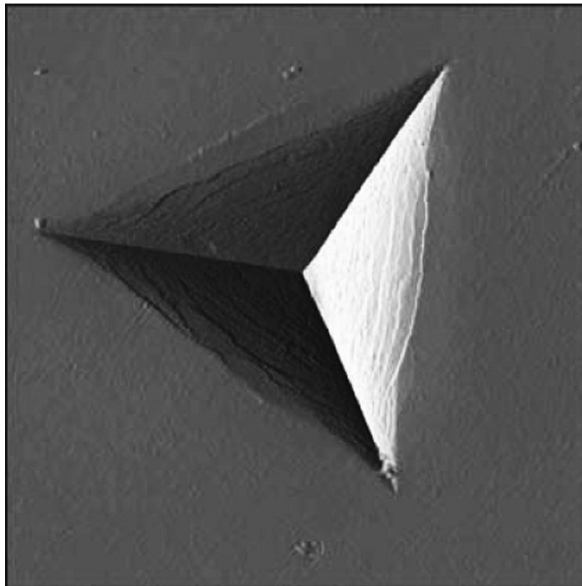
F- veľkosť použitého zaťaženia [kg]

l- hĺbka vtlačku [μm]



Obr. 14. Vnikacie teliesko Berkovich (UNIVERSITY OF NEBRASKA-LINCOLN, 2010, 2012-11-03)

Výhodou tejto metódy je jednoduchšia výroba vnikacieho telieska, vyššia presnosť a nižšia citlivosť na nárazy a neopatrné zaobchádzania na rozdiel od Vickersovho telieska. (MATULA, 2011, s. 45)

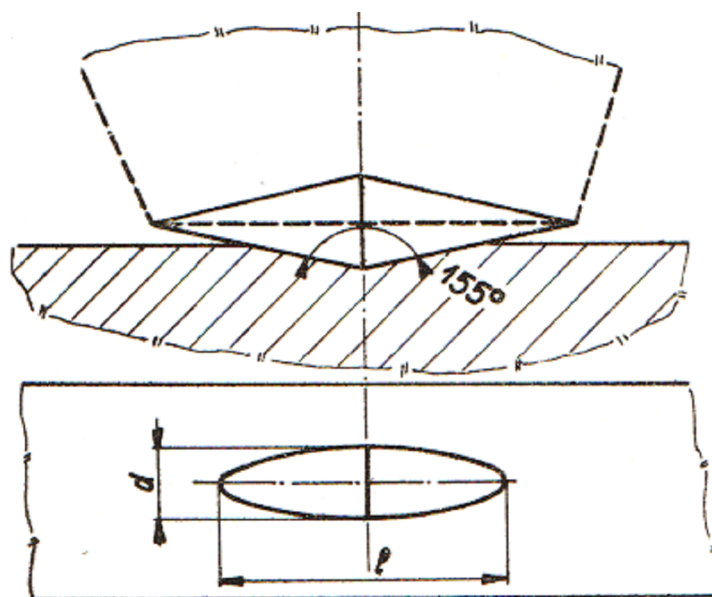


Obr. 15. Vtlačok po skúške Berkovich

(Savkova ,2010, 2012-11-03)

2.4 Skúška podľa Grodzinského

Táto metóda používa ako vnikacie teliesko dva kužele spojené základňami (dvojkružel'). Vrcholový uhol medzi plášťami kužeľov je 155° . Vnikacie teliesko sa vtlačá kolmo k osi súmernosti. Vzniknuté vtlačky sú podobné ako pri metóde Knoop.



Obr. 16. Vnikacie teliesko Grodzinski (MATULA, 2011, s. 47)

Mikrotvrdosť sa vypočítaná ako pomer zaťaženia a plochy vtlačku:

$$H_{DC} = \frac{F}{A} \quad (10)$$

kde F je použité zaťaženie [kg] a A je plocha vtlačku [mm^2]. Plocha vtlačku je ohraničená dvomi hyperbolami a vypočíta sa ako :

$$A = \frac{l^3}{6r} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = c.l^3 \quad (11)$$

α - uhol plášťa kužeľov [$^\circ$]

r - polomer základne kužeľov [mm]

l - dĺžka vtlačku [mm]

po dosadení do vzorca (10) dostaneme výsledný vzťah na výpočet mikrotvrdoosti:

$$H_{DC} = \frac{F}{c.l^3} \quad (12)$$

Výhodou tejto skúšky je vysoká odolnosť vnikacieho telieska. Pretože nemá ostré brity je veľmi ťažké poškodiť ho. Ak dôjde k poškodeniu vnikacieho telieska je možné pootočiť ho okolo pozdĺžnej osi a použiť znova.

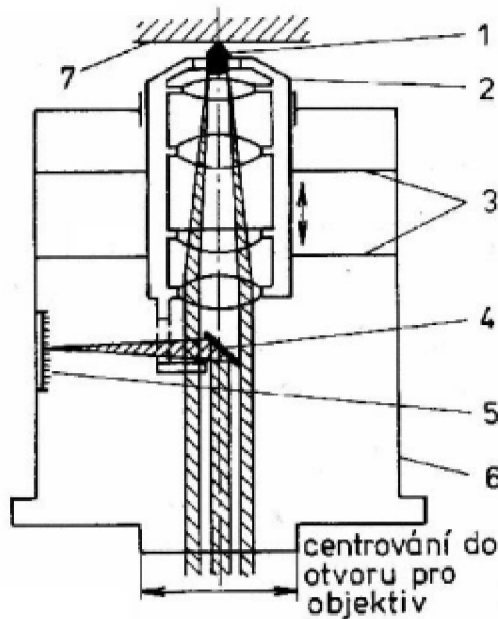
2.5 Skúška podľa Hanemanna

Podstata skúšky je rovnaká ako pri Vickersovej skúške ale uskutočňuje sa na špeciálnom mikrotvrdomeri. Vnikacie teliesko je umiestnené v špeciálnom objektíve, ktorý sa vloží do metalografického mikroskopu. Objektív je zavesený na pružných membránach a pohybuje sa v smere optickej osi. Prehnutie pružín odpovedá zaťaženiu, ktoré pôsobí na vnikacie teliesko. Meria sa na zaťažovacej stupnici, ktorá je umiestnená vo vnútri objektívu. Po odľahčení sa zmeria vytvorený vtlačok. Na vyhodnotenie sa používa rovnaký vzorec ako pre výpočet Vickersovej tvrdosti

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \quad (13)$$

F- zatěžující síla [N]

d- aritmetický průměr naměřených délek uhlopříček [mm]



Obr.17. Schéma mikrotvrdomeru Hanemann

(1-Vickersova pyramída, 2- nosič objektivu, 3- závesné pružiny, 4- optický hranol, 5- stupnice zatáženía, 6- kryt, 7- výbrus) (Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni, 2012, s.7.)

Tab.8. Skúšobné zaťaženia pre Hanemannovu metódu

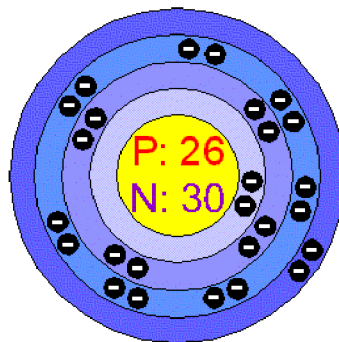
Skúška mikrotvrdosti		
Označenie tvrdosti	Hodnote skúšobného zaťaženia F[N]	Hmotnosť závažia [g]
HV 0,005	0,04093	5
HV 0,01	0,09807	10
HV 0,02	0,1961	20
HV 0,05	0,4903	50
HV 0,1	0,9807	100

3 ŽELEZO A JEHO ZLIATINY

Zliatiny železa sú najvýznamnejšia skupina kovových materiálov. Používajú sa vo väčšine všetkých oborov. V praxi sa používajú liatiny alebo špeciálne vysokolegované materiály.

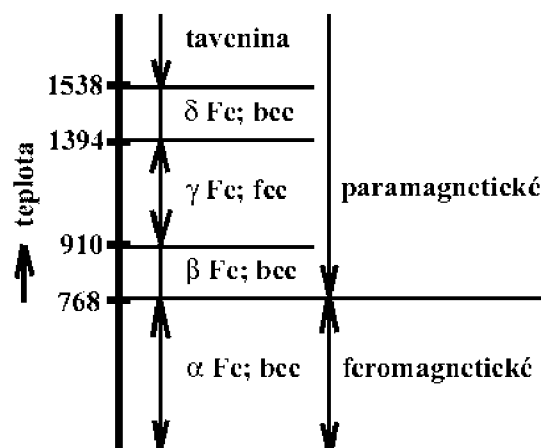
3.1 Čisté železo

Čisté železo má atómové číslo 26, atómovú hmotnosť 55,874. Je štvrtý najrozšírenejší prvok na zemi. V dnešnej dobe je viac ako 90% všetkej kovovej produkcie tvorené produktmi železa a jeho zliatinami.



Obr. 18. Atóm čistého železa

Výroba čistého železa je obtiažna a nákladná. Čisté železo je mäkké, dobre tvárne, má malú pevnosť a malú odolnosť proti korózii. Pre priemyslové účely sa používa technicky čisté železo (99,8 - 99,9 %). Teplota tavenia závisí od jeho čistoty (1535 - 1539 °C). Teplota varu je cca. 3070 °C. Železo je polymorfny kov, ktorý sa za normálnych tlakov vyskytuje v troch modifikáciach (α, γ, δ).



Obr. 19. Modifikácie železa

3.2 Modifikácie

Železo α je nízko teplotná modifikácia, ktorá je stabilná do teploty 900 °C. Kryštalizuje v kubickej priestorovo centrovanej mriežke. Pri teplote 769 °C stráca svoje feromagnetické vlastnosti a stáva sa paramagnetickým. Táto modifikácia sa nazýva železo β a používa sa len veľmi málo.

Železo γ vzniká prekryštalizáciou pri teplote cca. 911 °C. Kryštalizuje v kubickej plošne centrovanej mriežke. Vyskytuje sa až do teploty cca. 1392 °C, kedy vzniká železo δ .

Železo δ vzniká pri teplote cca. 1392 °C. Kryštalizuje v kubickej plošne centrovanej mriežke.

3.3 Rovnovážne sústavy železo - uhlík

Uhlík tvorí s modifikáciami železa intersticiálne tuhé roztoky. Môže sa v sústavách vyskytovať ako intermedialna fáza (karbid) alebo ako voľný uhlík (grafit).

Ferit je intersticiálny tuhý roztok uhlíku v železe α . Maximálna rozpustnosť pri teplote 723 °C je 0,018%. Je tvárny a má pevnosť cca. 220 MPa a tvrdosť 50 HB. V oceliach tvorí svetlé kryštály, ktoré obsahujú najviac 0,035 % uhlíku. Vyskytuje sa v konštrukčných oceliach, u ktorých je hlavnou požiadavkou húževnatosť.

δ ferit je intersticiálny tuhý roztok uhlíku v železe δ . Kryštalizuje priamo z taveniny. Maximálna rozpustnosť pri teplote 1499 °C je 0,08 %.

Austenit je intersticiálny tuhý roztok uhlíku v železe γ . Maximálna rozpustnosť pri teplote 1147 °C je 2,14 % a so znižujúcou sa teplotou klesá na 0,765 %. Vyskytuje sa v uhlíkových a nízkoalegovaných oceliach nad teplotou 723 °C. Kryštály austenitu obsahujú najviac 1,8 % uhlíku, sú mäkké, húževnaté a tvárne. U vysokolegovaných ocelí, ktoré obsahujú väčšie množstvo niklu a mangánu ostáva austenit aj za normálnych teplôt (zbytkový austenit).

Cementit je chemická zlúčenina železa a uhlíku (6,67 %). Má rombickú mriežku. Pri teplote 217 °C stráca svoje feromagnetické vlastnosti. Kryštály sú krehké, majú svetlú farbu a sú najtvrdšou zložkou technického železa.

Primárny cementit kryštalizuje priamo z taveniny a vyskytuje sa v bielych nadeutektických liatinách.

Sekundární cementit vzniká z presýteného roztoku železa γ v důsledku klesající rozpustnosti uhlíku v austenitu při ochlazení z teploty 1147 °C do teploty 723 °C.

Terciální cementit vzniká změnou rozpustnosti uhlíku z tuhého roztoku železa α pod teplotou 723 °C.

Perlit je zmes jemných kryštálov feritu a cementitu. Vzniká rozpadom austenitu obsahujúceho 0,8 % uhlíku. Pevnosť je cca. 840 MPa a tvrdosť dosahuje 280 HB.

Lamelárny perlit je tvorený doštičkami feritu a cementitu. Tento druh perlitu je pomerne tvrdý, pevný ale málo tvárny.

Globulárny (gul'ôčkový) perlit vzniká z lamelárneho perlitu pomalým ochladzovaním cez teplotu 723 °C alebo dlhším zotrvaním na tejto teplote. Doštičky cementitu sa pôsobením povrchového napätia zaokrúhľia do tvaru gul'atých zŕn. Ocele, ktoré obsahujú globulárny perlit je mäkkšie a tvárnejšie ako ocele s lamelárnym perlitom.

Grafit je voľný uhlík. Vyskytuje sa v šedom surovom železe. Je veľmi mäkký, málo pevný a má tvar šupiniek. Liatina obsahujúca grafit je mäkká a krahká.

Ledeburit je zmes austenitu a cementitu. Je stabilný do teploty 723 °C. Kryštály sú biele, lesklé a veľmi tvrdé. Zo všetkých zliatin železa má najnižšiu teplotu tavenia (1130 °C).



Obr. 20. Štruktúry kovov

3.4 Nerovnovážne sústavy železo – uhlík

Martenzit je presýtený tuhý roztok uhlíku v železe α . Martenzit vzniká kalením uhlíkových podeutektoidných ocelí nad teplotu Ac_3 a nadeutoidných ocelí nad teplotu Ac_1 . Martenzit je veľmi tvrdý a krehký.

Bainit je tvorený feriticko-karbitickou štruktúrou. Tvrdosť je 400 - 450 HB. Je menej krehký ako martenzit a vzniká rozpadom austenitu pod teplotou 550 °C.

Sorbit je zmes jemne vylúčeného cementitu a feritu pri popúšťaní martenzitu za vyšších teplôt.

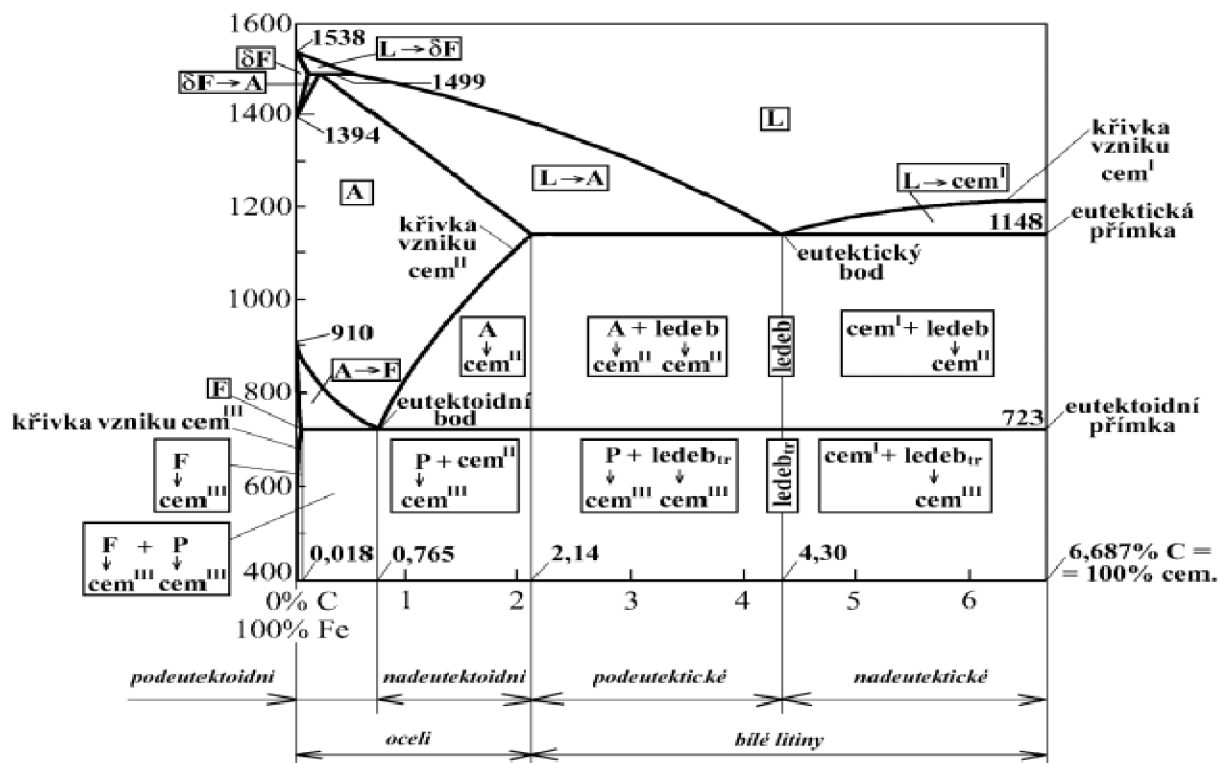
3.5 Základné delenie sústav

Metastabilná sústava Fe-C- uhlík sa vyskytuje vo forme cementitu (Fe_3C). Diagram sa znázorňuje do obsahu uhlíku 6,68 %, ktorý odpovedá 100 % karbidu železa – cementitu.

Stabilná sústava Fe-C – uhlík je prítomný ako grafit(C_{gr}). V tejto sústave je rovnováha medzi železom a grafitom v závislosti na teplote.

3.6 Rovnovážný metastabilní diagram Fe-C

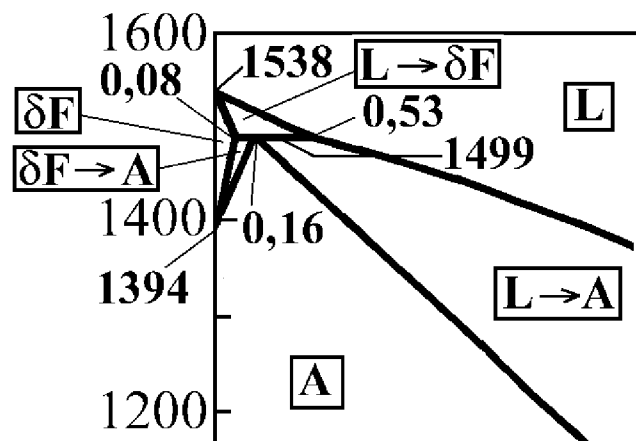
Podľa metastabilnej sústavy sa chovajú väčšinou ocele. Oceľ je zliatina železa, uhlíku (menej ako 2,14 %) a ďalších prvkov. Metastabilný diagram zobrazuje binárnu sústavu s úplnou nerozpustnosťou železa a obmedzenou rozpustnosťou uhlíku.

Obr.21. Diagram Fe-Fe₃C

Na vodorovnú os vynášame obsah uhlíku v % (do hodnoty 6,67%) a na zvislú os hodnoty teploty v °C (do hodnoty 1800 °C). Zmesi s obsahom uhlíku do 2,11 % sa nazývajú ocele a s obsahom uhlíku nad 2,11 % liatiny. Ocele s obsahom uhlíka do 0,765 % sa označujú ako podeutektoidné a nad hodnotu 0,765 % ako nadeutektoidné. Liatiny s obsahom uhlíka od 0,765 % do 4,3 % nazývame ako podeutektické a s obsahom od 4,3 % do 6,67 % ako nadeutektické. V tejto sústave prebiehajú tri izotermické reakcie.

1. Oblasť peritektickej premeny

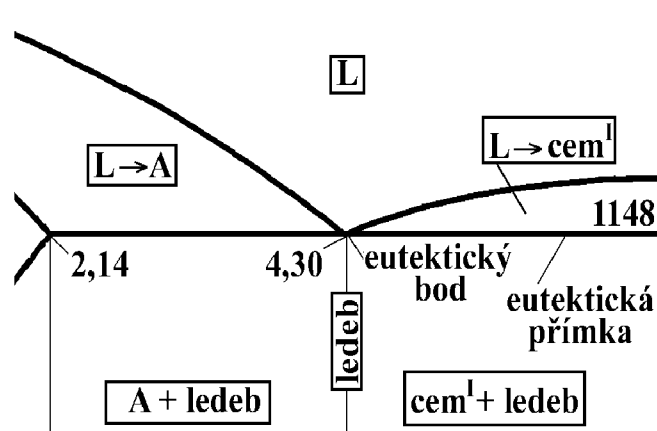
Pri koncentrácii uhlíku do 0,08 % kryštalizuje tavenina cez zmes taveniny a δ feritu až na δ ferit. Od 0,08 % do 0,16 % kryštalizuje tavenina na zmes taveniny a δ feritu. Pri teplote 1499 °C prebehne v tavenine peritektická reakcia a vznikne zmes δ feritu a austenitu a nakoniec prekryštalizuje na austenit. Od koncentrácie 0,16 % do 0,53 % kryštalizuje tavenina na zmes taveniny a δ feritu. Pri teplote 1499 °C prebehne peritektická reakcia a vznikne zmes taveniny a austenitu a následne austenit. Pri koncentrácii na 0,53 % kryštalizuje tavenina priamo za zmes taveniny a austenitu a následne na austenit.



Obr. 22. Oblasť peritektickej premeny

2. Oblasť eutektickej premeny

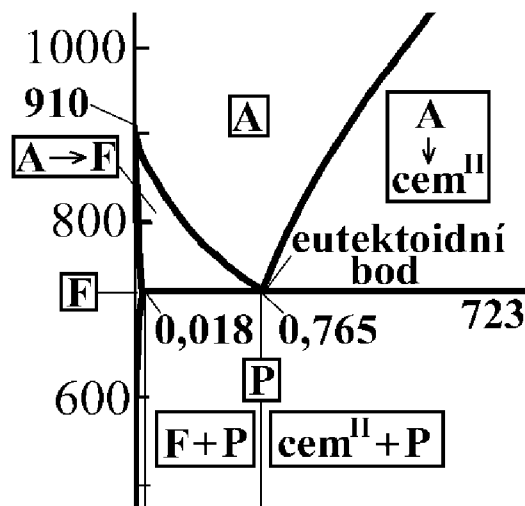
Eutektická reakcia prebieha pri teplote 1148 °C v materiáloch, u ktorých je obsah uhlíku od 2,11 % do 6,67 % (liatiny). Počas reakcie sa tavenina premení na eutektikum (ledeburit). K priamej premene taveniny na eutektikum dochádza len pri koncentrácii uhlíku 4,3 %.



Obr. 23. Oblasť eutektickej premeny

3. Oblasť eutektoidnej premeny

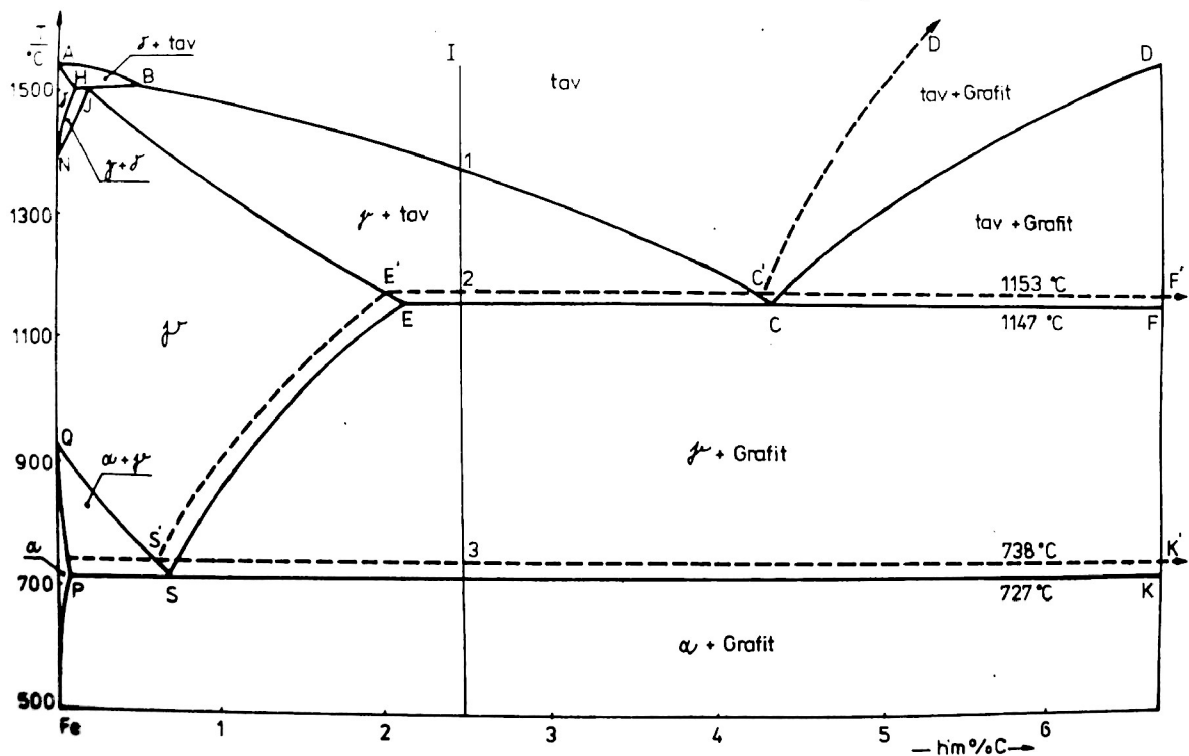
Eutektoidná premena prebieha pri teplote 723 °C v materiáloch s obsahom uhlíku od 0,18 % do 6,67 %. Pri premene sa transformuje austenit na eutektoid (perlit). K priamej premene austenitu na perlit dochádza len pri koncentrácii 0,765 % uhlíku. Ak je v materiáli menej ako 0,765 % uhlíku premení sa austenit najskôr na ferit a pritom sa austenit obohacuje o uhlík až na eutektoidnú koncentráciu (0,765 % uhlíku).



Obr. 24. Oblasť eutektoidnej premeny

3.7 Rovnovážný stabilní diagram Fe-C

Podľa stabilnej sústavy sa chovajú grafitické liatiny a surové železá. Liatina je zliatina železa, uhlíku (viac ako 2,14 %) a ďalších prvkov. Surové železo je produkt vysokej pece a ďalej sa spracúva na ocele alebo liatiny. Stabilný diagram sa kreslí čiarkovane do diagramu metastabilného a dôležité body sa označujú čiarkou. Pri porovnaní stabilného a metastabilného diagramu zistíme, že eutektická a eutektoidná reakcia stabilného diagramu prebieha pri vyšších teplotách a nižších koncentráciách uhlíku. Teplota eutektickej premeny je 1153 °C (čiara E', C', F'). Teplota eutektoidnej premeny je 738 °C (čiara P', S', K'). Koncentrácia eutektického bodu C' je 4,26 %, koncentrácia eutektoidného bodu S' je 0,69 % a koncentrácia bodu E' je 2,11 % uhlíku.



Obr. 25. Diagram Fe-C

Výsledkom eutektickej premeny je grafitové eutektikum, ktoré sa skladá z austenitu a grafitu. Výsledkom eutektoidnej premeny je grafitový eutektoid, ktorý sa skladá z feritu a grafitu. Pri ochladzovaní austenitu podľa čiary S'E' sa vylučuje sekundárny grafit. Kryštalizácia cementitu je výhodnejšia ako kryštalizácia grafitu, pretože stavba cementitu je bližšia stavbe austenitu. Tvorba cementitu z austenitu a z taveniny prebieha ľahšie. Z termodynamického hľadiska je grafit stabilnejší ako cementit.

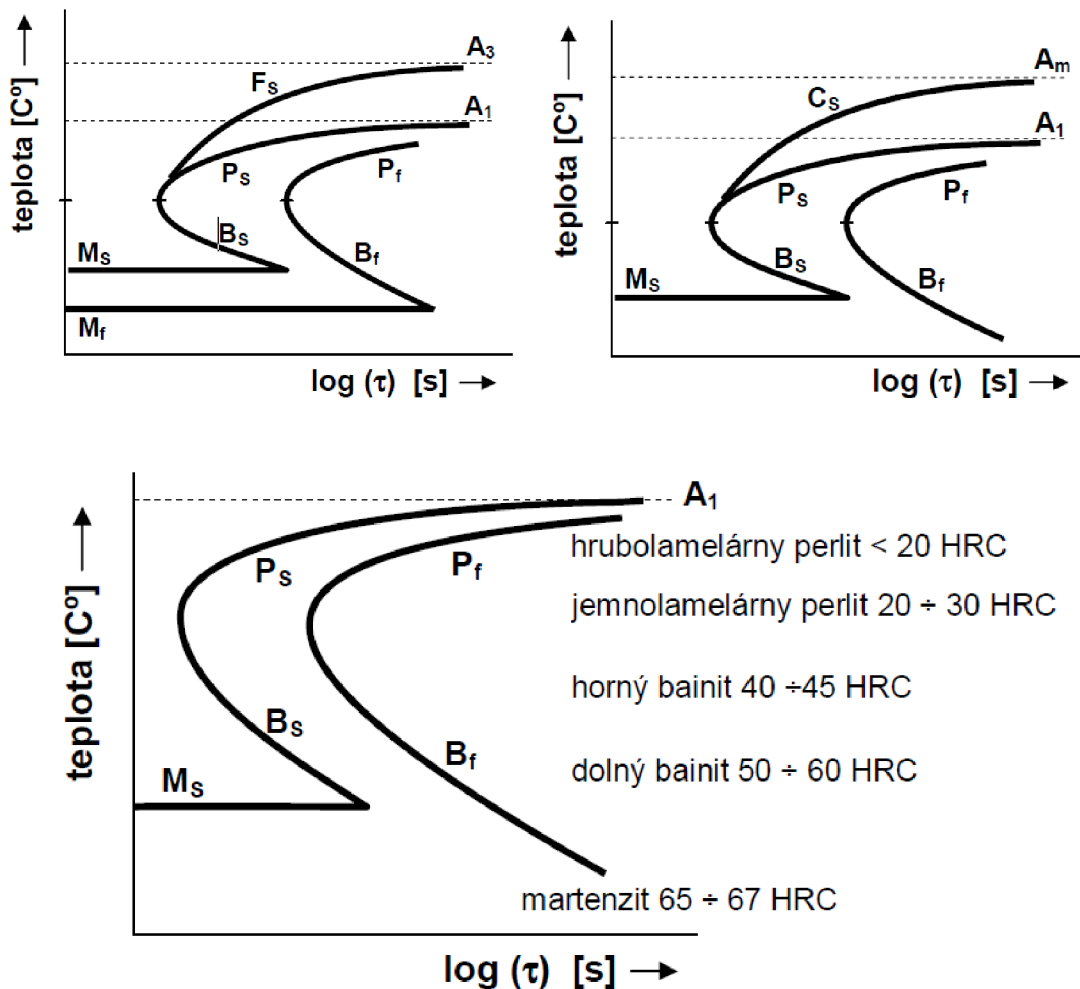
3.8 Transformačné diagramy

Znázorňujú priebeh premeny austenitu a udávajú vplyv teploty a času na priebeh premeny. Na rozdiel od rovnovážnych diagramov platia pre ocele určitého chemického zloženia a pre určité podmienky austenitizácie. Využívajú sa hlavne pri procesoch tepelného spracovania. Rozlišujeme dva druhy transformačných diagramov:

- **Izotermické diagramy – IRA** – udávajú dobu premeny austenitu za izotermických podmienok
- **Anizotermické diagramy - ARA** – udávajú dobu potrebnú na premenu austenitu za rôznych ochladzovacích rýchlostí

3.8.1 Izotermický rozpad austenitu – IRA

Rozpad austenitu pri konštantnej teplote. IRA diagramy sa zostrojujú pomocou využitia veľkého počtu meraní teplôt začiatku a konca fázovej premeny austenitu. Oceľ sa z teploty austenitizácie ochladí na požadovanú teplotu, pri ktorej prebehne premena austenitu na rovnovážnejšiu štruktúrnú zložku.



Obr.26. IRA diagram podeutektickej, nadeutektickej a eutektickej ocele

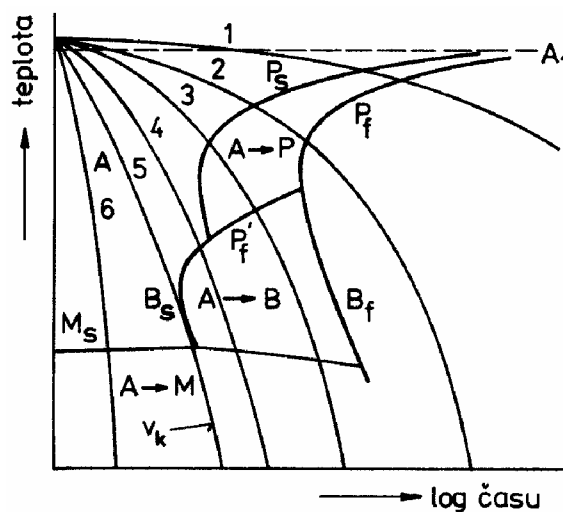
kde A – austenit, P – perlit, B- bainit, M – martenzit, indexy *s* a *f* označujú začiatok a koniec premeny.

Pri malom ochladení pod teplotu A₁ je rýchlosť premeny malá a prvé zrná perlitu sa objavajú až po veľmi dlhej dobe. Pri rýchlejšom ochladení sa zvyšuje rýchlosť premeny ale znižuje rýchlosť difúzie železa tzn. Od určitej teploty sa rýchlosť premeny opäť znižuje. Podobný tvar ako perlitická premena majú aj krivky bainitickej premeny. V rozmedzí teplôt A₁ – 550°C vzniká lamelárna perlitická štruktúra, v oblasti „nosu“ až po M_s vzniká bainit a pod

teplotou M_s vzniká bezdifúznou premenou martenzit. U podeutektoidných oceli vzniká na začiatku ferit a u nedeutektoidných cementit. (Moravčík, 2010, s.159)

3.8.2 Anizotermický rozpad austenitu – ARA

ARA diagram sa využíva častejšie. V porovnaní s IRA diagramom je zložitejší, pretože výsledná štruktúra oceli môže byť tvorená zmesou produktou. ARA nás informuje o zmenách austenitu pri plynulom ochladzovaní a poskytuje informácie o vplyve rýchlosti ochladzovania z teploty austenitizácie na výslednú mikroštruktúru a tvrdosť.



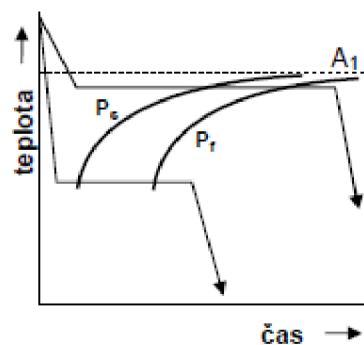
Obr.27. ARA diagram

Pri ochladzovaní ocele vzniká pri určitom ochladiení z austenitu perlit. Začiatok a koniec perlitickej premeny je tým viac posunutý k nižším teplotám, čím vyššia je ochladzovacia rýchlosť (krivky 1 a 2). Po dosiahnutí určitej rýchlosti ochladzovania sa nestihne všetok austenit premeniť na perlit a časť sa zachová až do teplôt pri ktorých sa premení na bainit. Štruktúru spolu s perlitom a bainitom tvorí aj martenzit (krivka 3). Krivka 4 zobrazuje ochladzovanie určitou rýchlosťou, pri ktorej sa austenit nepremieňa na perlit ale na bainit a martenzit. Pri ochladzovaní kritickou rýchlosťou martenzitickej premeny v_k je štruktúra tvorená len martenzitom a príp. zbytkovým austenitom.

Na tvar a polohu kriviek diagramov IRA a ARA má vplyv chemické zloženie ocele a podmienky austenitizácie a preto sa tieto údaje uvádzajú pri každom diagrame.

3.8.3 Perlitická premena

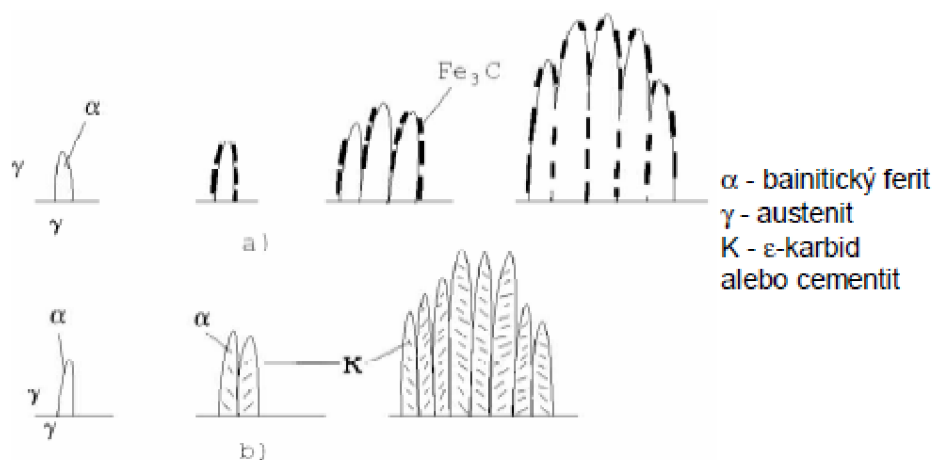
Je to polymorfná premena železa γ na železo α , s ktorou je spojená zmena rozpustnosti uhlíku. Prebieha pri vysokých teplotách. Pri rovnovážnych podmienkach ochladzovania sa austenit premení postupne na perlit. Perlit je tvorený feritom a cementitom. Podľa čiary P_s sa začína premena austenitu na perlit. Dosiachnutím čiary P_f je premena ukončená. Pri ochladení mierne pod teplotu A_1 sa bude štruktúra perlitu vyznačovať hrubými lamelami feritu a cementitu. Pri ochladení na teplotu cca 550 °C bude štruktúra perlitu tvorená veľmi jemnými lamelami feritu a cementitu.



Obr.28. Oblasť perlitickej premeny

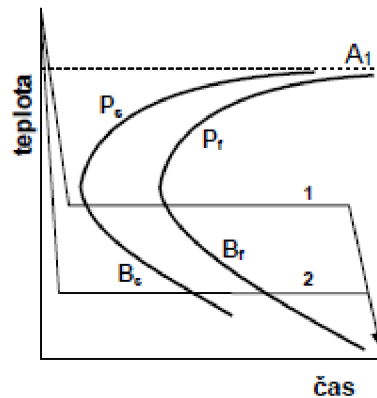
3.8.4 Bainitická premena

Pri teplotách 200 – 550 °C prebieha bainitická premena, ktorej produktom je bainit. Bainit je tvorený zmesou presýteného feritu a karbidov. Základom je bezdifúzna premena austenitu na ferit a difúzna zmena rozloženia uhlíka a vznik karbidickej fázy.



Obr.29. Mechanizmus tvorby bainitu

Štruktúra bainitu sa výrazne mení s teplotou. Rozlišujeme dva základné typy bainitu. A to bainit horný a bainit dolný.



Obr.30. Oblasť bainitickej premeny

Krivka 1 zobrazuje teplotu cca 550 °C pri ktorej vzniká horný bainit, ktorý je tvorený zväzkami hrubších ihlíc bainitického feritu s pozdĺžne usporiadanými časticami cementitu.

Krivka 2 nám zobrazuje vznik dolného bainitu, ktorý vzniká pri nižších teplotách a jeho štruktúra je tvorená tenkými doskami bainitického feritu, ktoré rastú od hraníc zrn.

3.8.5 Martenzitická premena

Martenzitická premena prebieha pri teplotách nižších ako 200 °C. Výsledný produkt je martenzit. Martenzitická premena nepatrí medzi izotermické premeny. Prebieha pri plynulom ochladzovaní austenitu pod určitú teplotu. Pri dostatočnej rýchlosti ochladzovania vzniká z austenitu martenzit bezdifúznou premenou. Martenzit je nerovnovážny tuhý roztok uhlíka v železe α . Martenzitická premena sa uskutočňuje vznikom zárodkov a ich rastom. Rýchlosť rastu je veľmi vysoká (cca. $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Rast kryštálov prestane, ak narazí na hranicu zrna alebo iný kryštál.

4 OBRÁBANIE LASEROM

LASER (skratka z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation,

čo znamená zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia). Laser je zdrojom zvláštneho druhu svetla, ktoré sa v prírode nevyskytuje. Toto žiarenie je monochromatické a tvorí úzky lúč s veľmi malou rozbiehavosťou. Možno ho zaostriť na veľmi malú plochu.

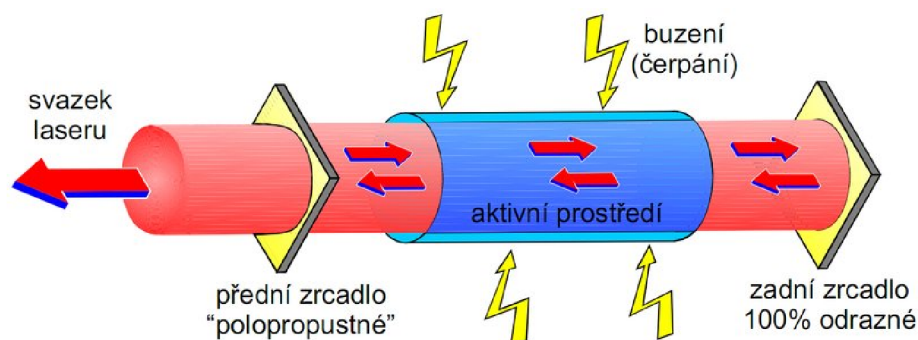
Rozmanitosť laserov odpovedá širokému poľu jeho použitia. Laser sa postupom času stal nenahraditeľným nástrojom nielen vedy a výskumu ale aj priemyslu, medicíny a bežného života. (Lapšanská,2010)

4.1 Charakteristika lasera

Laserové zariadenie pracuje na princípe indukovanej emisie. Táto emisia je vyvolaná dopadom žiarenia na atóm prvku. Elektrón prvku, ktorý obieha okolo jadra toto žiarenie pohltí a tým stúpne na vyššiu obežnú dráhu. Absorbovaním ďalšieho žiarenia sa vyrovnajú sily v atóme a elektrón sa vráti na pôvodnú obežnú dráhu pričom vyžiari prijatú energiu do priestoru v podobe monochromatického, koherentného žiarenia, čo znamená, že fotóny sa v zväzku pohybujú jedným smerom a sú rovnomerne rozdelené v priereze. (Viselka, 2010,s.35.)

Vznik laserového žiarenia:

- Atóm pri absorbovaní svetla prechádza do vyššieho energetického stavu
- Atóm v excitovanom stave vyžaruje energiu vo forme fotónu
- Fotón dopadá na atóm v excitovanom stave, ktorý prejde do nižšej energetickej hladiny a vyžiari dva fotóny čo má za následok zosilnenie svetla



Obr.31. Princíp laserového zariadenia

Laserový lúč vzniká stimulovanou emisiou v rezonátore. Tvoria ho fotóny, ktoré smerujú rovnobežne s osou rezonátora. Použitím vhodnej optickej sústavy sa sústreďí veľké množstvo energie na malú plochu. V mieste dopadu lúča sa materiál nataví (odparí) a vytvorí sa rezná medzera. (Mičietová,2007.s.67.)

Základné časti laseru:

- Aktívne zosilňovacie prostredie
- Zdroj energie
- Optický rezonátor (Mičietová,2007.s.67.)

4.2 Rozdelenie laserov

1. podľa vysielaných vlnových dĺžok:

- infračervené lasery
- lasery viditeľného pásma
- ultrafialové lasery
- röntgenové lasery

2. podľa energetických hladín:

- molekulárne
- elektrónové
- jadrové

3. podľa časového režimu prevádzky:

- impulzné
- kontinuálne

4. podľa **dĺžky generovaného impulzu:**

- dlhé impulzy
- krátke impulzy
- veľmi krátke impulzy

5. podľa **typu budenia:**

- optické budenie
- budenie elektrickým výbojom
- budenie elektrónovým zväzkom
- budenie tepelnými zmenami
- chemické budenie
- rekombinačné budenie
- budenie injekciou nosičov nábojov

6. podľa **skupenstva materiálu:**

- pevnolátkové lasery
- polovodičové lasery
- plynové lasery
- kvapalinové lasery
- chemické lasery (Mičietová,2007.s.68.)

Tab.9. Rozdelenie laserov podľa aktívneho prostredia a oblasti použitia

Druh lasera	Aktívna látka		Vlnová dĺžka [μm]	Typ lúča	Výkon lasera	Oblasť využitia
Pevnolátkový	Rubín	Cr ³⁺	0,6943	Pulzný	5 W	Holografia
	Nd-YAG	Nd ³⁺	1,064	Kontinuálny, Pulzný	100-1200 W	Strojársky priemysel
	Nd-sklo	Nd ³⁺	1,064	Pulzný	2 mW	
	Alexandrid		0,7-0,818	Pulzný	10 W	
Polovodičový	GaAs		0,8-0,9	Pulzný	2-10 mW	Informačné technológie, optoelektronika
Plynový	CO ₂ (N ₂ +He)	CO ₂	10,6	Kontinuálny, Pulzný	500-15000 W	Strojársky priemysel
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	Kontinuálny	20 mW	Metrológia, geodézia, holografia
	Ar	Ar ⁺	0,4764; 0,488; 0,5145	Kontinuálny, Pulzný	1-5000 W	Laserová chirurgia
	Excimer (ArCl)		0,17	Pulzný	20-250 W	Fotolitografia, laserový chirurgia, strojárstvo
	(XeCl)		0,308			
	(XeF)		0,351			
	(KrF)		0,248			
kvapalinový	Farbivo Rhodamine 6	etanol, metanol	0,34-1,175	Pulzný	100 W	Fotochémiá, spektroskopia

(Mičietová,2007.s.70.)

4.3 Konštrukcia laseru

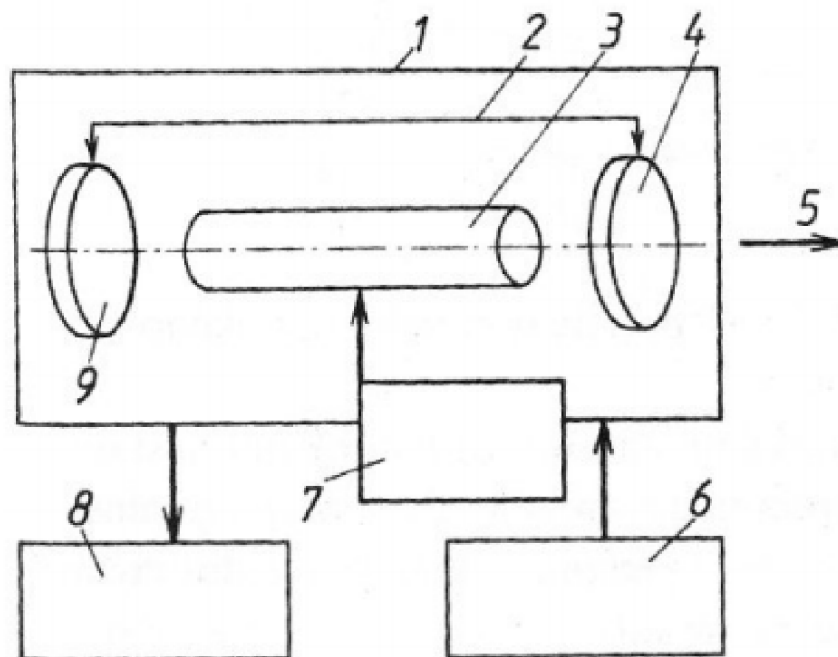
Hlavnou časťou každého laserového zariadenia je laserová hlavica, ktorá obsahuje laserové médium, rezonátor, budiace zariadenie, zdroj energie budenia a chladiaci systém.

Laserové médium určuje dĺžku vlny žiarenia. Je to zmes materiálov, je priehľadná a má schopnosť odvádzať teplo.

Rezonátor je optický systém, ktorý umožňuje sformovať a zosilniť žiarenie. Tvoria ho najmenej dve zrkadlá. Najčastejšie sa používajú sférické zrkadlá. Priemer a zakrivenie týchto zrkadiel určuje rozdelenie intenzity žiarenia a rozbiehavosť laserového žiarenia.

Budiacie zariadenie ovplyvňuje pracovný režim laseru. Spôsob budenia je daný použitým médiom. Plynné médium je budené elektrickým výbojom, pevné médium je budené lampami alebo diodami.

Chladiaci systém odvádza nevyužitú energiu, ktorá sa premení na tepelnú energiu. Chladenie môže prebiehať pomocou vody alebo vzduchu v závislosti od výkonu laseru. Najčastejšie sa ako chladiace médium používa voda. Studená voda prúdi k laserovej jednotke a tým ju chladí. Následne je táto ohriata voda odvádzaná do chladiacej jednotky kde sa opätovne ochladí.



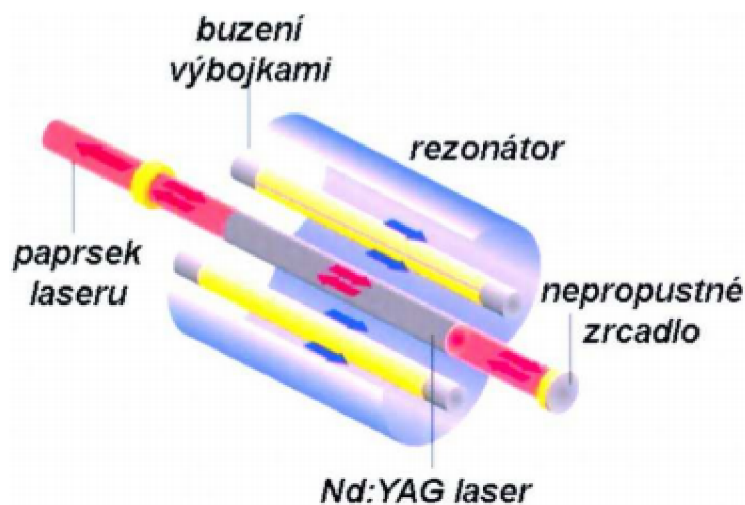
Obr. 32. Schéma laserového zariadenia (1-laserová hlavica, 2-rezonátor, 3-laserové médium, 4-polopriepustné zrkadlo, 5-laserový lúč, 6-zdroj energie budenia, 7-budiacie zariadenie, 8-chladiace zariadenie, 9- nepriepustné zrkadlo) (Plškova, 2011, s15)

4.3.1 Pevnolátkové lasery

Aktivným prostredím je pevná, opticky priepustná látka (kryštál výbrúsený do tvaru valca, kotúča alebo hranolu, ktorého čelá sú dokonale vyleštené). Základným materiálom, ktorý určuje technické vlastnosti kryštálu je matrica, ktorá musí byť priezračná a opticky homogénna.

Tieto lasery sú schopné pracovať v rôznych režimoch. Vlny sú generované vo viditeľnej aj v infračervenej oblasti. Výhodou týchto laserov je ich stabilita, malé nároky na údržbu a prevádzkové podmienky.

Najrozšírenejším pevnolátkovým laserom je Nd:YAG laser. Používa sa v kontinuálnom aj pulznom režime. V kontinuálnom režime dosahuje výkon 500 W a v pulznom režime 106 W. Nd:YAG lasery sa používajú najčastejšie na zváranie, rezanie, vŕtanie do tvrdých materiálov, gravírovanie a značenie. (Mičietová,2007,s.73)



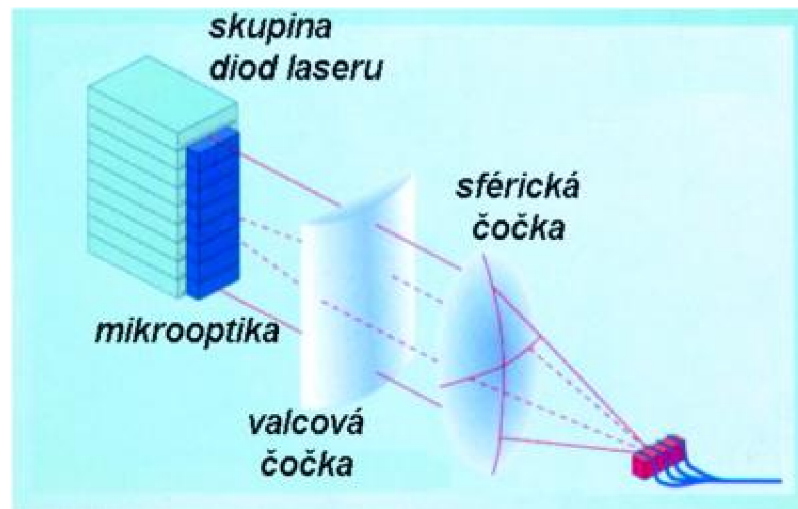
Obr.33. Konštrukcia Nd:YAG laseru

4.3.2 Polovodičové lasery

Aktivným prostredím je polovodičový materiál, v ktorom vzniká stimulovaná emisia žiarenia. Ako polovodičový materiál sa používa kadmium sulfid, kadmium selén, gálium arzenid. Budenie polovodičových laserov je optické alebo elektrónovým lúčom.

Výhodou týchto laserov je ich masívnosť a hlavne vysoká účinnosť (až 50%). Medzi nevýhody patrí rozbiehavosť žiarenia a závislosť na teplote polovodičového materiálu. Používajú

sa na popisovanie súčastí, rezanie a na tepelné zváranie. (Plšková,2011.s.16), (Mičietová,2007.s.73)



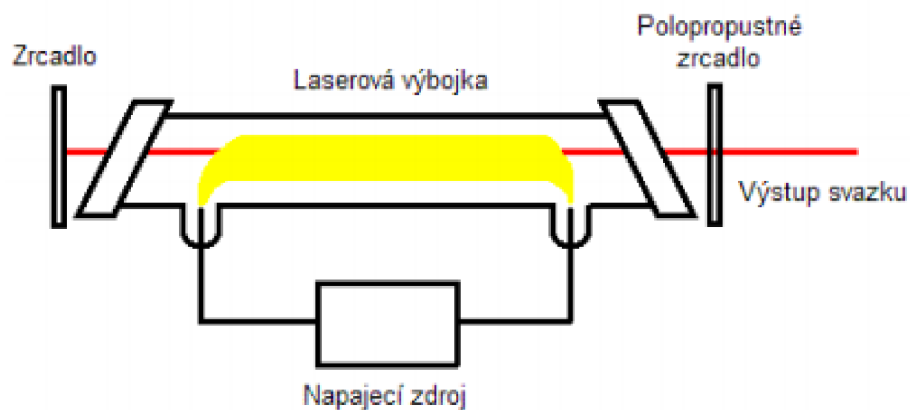
Obr.34. Konštrukcia polovodičového laseru

4.3.3 Plynné lasery

Aktívne prostredie je v plynnej fáze. Vo väčšine prípadov pracujú v kontinuálnom režime. Plynné lasery sú budené elektrickým výbojom, chemickou reakciou, prechodom zväzku elektrónov alebo opticky.

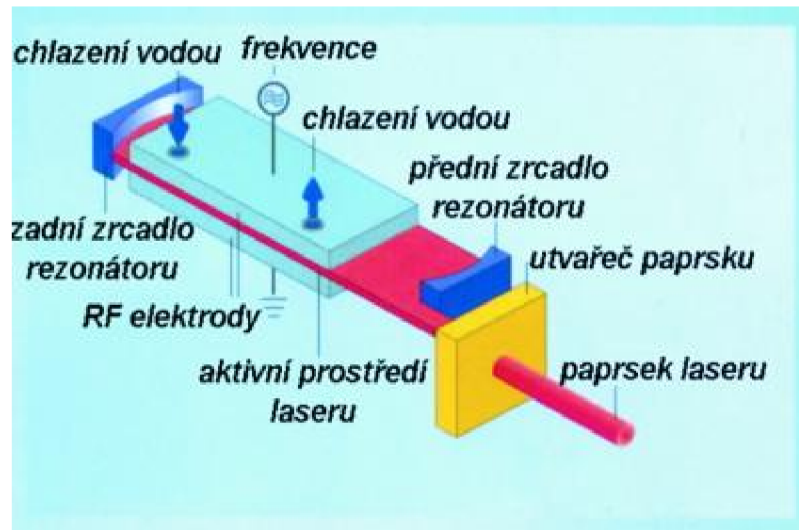
Prvým vyrobeným a najznámejším plynným laserom je hélium – neónový laser (He-Ne). Pracuje so zmesou hélia a neónu. (Plšková,2011.s.17), (Mičietová,2007.s.71)

He-Ne Laser



Obr.35. Konštrukcia He-Ne laseru

Najpoužívanejším spomedzi plynových laserov je CO₂ laser. Aktívnym prostredím sú molekuly oxidu uhličitého. Budenie je pomocou elektrického výboja, ktorý zapaluje zmes plynov CO₂, N₂ a He. V kontinuálnom režime sú schopné dosiahnuť výkon až 100 kW, v pulznom režime až 200 TW. Pritom dochádza k rozkladu laserového plynu, ktorý sa musí stále dodávať. Svoje uplatnenie našli v strojárstve (rezanie, gravírovanie) ale aj v medicíne pri chirurgických zákrokoch. (Plšková,2011.s.18), (Mičietová,2007.s.71)



Obr.36.Konstrukcia CO₂ laseru

4.3.4 Kvapalinové lasery

Aktívnym prostredím sú roztoky farbív alebo špeciálne pripravené kvapaliny. Budenie je realizované opticky alebo laserom. V závislosti od zloženia farbiva pracujú tieto lasery od infračervenej až k ultrafialovej oblasti. V kontinuálnom režime sú schopné dosiahnuť výkon až 1 kW, v pulznom režime až 10⁵ W. (Plšková,2011.s.16), (Mičietová,2007.s.74)

4.4 Rezanie laserom

Rezanie laserom prebieha na základe vzájomného pôsobenia laserového lúča, rezného plynu a rezného materiálu. Počas rezania dochádza k nataveniu materiálu na teplotu, ktorá vedie ku zmene skupenstva materiálu z pevného na kvapalné príp. plyné. Podľa použitého výkonu laseru, rezného plynu, rezaného materiálu a tlaku plynu rozlišujeme tri metódy rezania.

4.4.1 Laserové tavné rezanie

Pomocou laserového lúča sa materiál lokálne roztaví a prúdom plynu sa odstráni z reznej medzery. Použitý plyn sa priamo nezúčastňuje na reznom procese ale používa sa len na odstránenie roztaveného materiálu z miesta rezu. Táto metóda sa používa na rezanie vysoko-
legovaných ocelí, neželezných kovov a materiálov bez oxidových rezov. Ako rezný plyn sa používa N_2 alebo Ar. Pri tavnom rezaní môžu byť použité väčšie rezné rýchlosti, ako pri sublimačnom rezaní, pretože materiál sa nemusí odpariť. Ale v porovnaní s rezaním plameňom sa používajú menšie rezné rýchlosti. Druh použitého plynu nám ovplyvňuje vznik oxidácie v mieste rezu.

4.4.2 Laserové rezanie plameňom

Tento spôsob na rozdiel od tavného rezania používa ako rezný plyn kyslík. Pri rezaní dochádza k reakcii kyslíku a rezaným materiálom. Táto metóda sa používa hlavne na rezanie materiálu. Používa sa vyššia rezná rýchlosť ako pri tavnom rezaní. Nevýhodou je nižšia kvalita rezu, problematika vytvorenia ostrých hrán alebo jemných obrysov a oxidácia reznej hrany. Pri rezaní plameňom je možné rezať hrubšie materiály ako pri tavnom a sublimačnom rezaní. Rýchlosť rezania je dvoj až trojnásobne vyššia ako pri tavnom rezaní. Turbulentná dynamika tavenia spôsobuje vytváranie rýh na povrchu rezu.

4.4.3 Sublimačné rezanie plameňom

V dôsledku pôsobenia laserového lúča sa materiál ohreje na teplotu odparovania a rezný plyn odstraňuje vzniknuté výpary. Pri rezaní kovov sa tento spôsob moc nepoužíva, pretože nie je možné rezať materiály väčších hrúbok ako je priemer lúča laseru. Pri väčších hrúbkach materiálu dochádza ku kondenzácii pár na stenách a rezná štrbina sa následne uzavrie.

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

5 PRAKTICKÁ ČASŤ

5.1 Ciele práce

Cieľom diplomovej práce bolo zistiť, aký vplyv bude mať rezanie pomocou laseru a s ním spojený nárast teploty v mieste rezu na výslednú tvrdosť a veľkosť ovplyvnenej vrstvy.

5.2 Skúšobné vzorky

Na výrobu skúšobných vzoriek bolo použitých päť rôznych ocelí a to oceľ 11 375, 11 523, 12 050, 14 220 a 19 312. Vzorky boli rezané CO₂ laserom s použitím N₂ ochrannej atmosféry. Hrúbka rezaného materiálu u všetkých vzoriek bola 5 mm. Z narezaných materiálov boli vytvorené skúšobné vzorky, na ktorých následne prebiehalo meranie.

5.2.1 Použité materiály

5.2.1.1 Oceľ 11 375 – ČSN 41 1375

Oceľ 11 375 je konštrukčná oceľ so zaručenou tavnou zvariteľnosťou. Používa sa na jednoduché, mierne namáhané súčasti. Ďalej na súčasti lisované, kované príp. ohýbané za studena. Na súčasti staticky a mierne dynamicky namáhané. Používa sa na výrobu súčastí z plechu, pák, nitov, profilových materiálov a tlakových nádob s obmedzeným pretlakom a teplotou do 300°C a pod. (LEINVEBER, 2006, str. 233)

Tab.10. Chemické zloženie ocele 11 375 v hmot. %

C	Mn	P	S	N
max. 0,17	max. 1,4	max. 0,035	max. 0,035	max. 0,012

(CZ FERRO - STEEL, spol. s r.o.: ČSN 11375, 2011)

5.2.1.2 Oceľ 11 523 – ČSN 41 1523

Konštrukčná oceľ jemnozrnná, tvárna so zaručenou zvariteľnosťou do 20 mm. Používa sa na výrobu mostných a iných zvaraných konštrukcií, ohýbaných profilov, trubiek, súčastí strojov, automobilov a motocyklov a výrobu kolies. (LEINVEBER, 2006, str. 234)

Tab.11. Tepelné spracovanie ocele 11 523

Spôsob	Teplota [°C]	Ochladzovanie
Normalizačné žihanie	870 – 900	Na vzduchu
Žihanie na mätko	680 – 710	Pomalé ochladzovanie v peci
Popúšťanie	670 – 700	Na vzduchu

Tab.12. Chemické zloženie ocele 11 523 v hmot. %

C	Mn	P	S	Si
max. 0,2	max. 1,6	max. 0,04	max. 0,045	max. 0,055

(JKZ Bučovice, a.s., 2010)

5.2.1.3 Oceľ 12 050 - ČSN 41 2050

Konštrukčná oceľ vhodná na zušľachtovanie, a tepelné spracovanie. Prekaliteľnosť do priemeru $D = 40$ mm. Výroba ozubených kôl, vačkových a kľukových hriadeľov, hriadeľov turbokompresorov a čerpadiel, šnekov, automobilových ojníc, závesov pružín, vodiacich čapov, lamiel spojok, frézovacích trňov a pod.

Tab.13. Tepelné spracovanie ocele 12 050

Tepel. spracovanie	Normalizačné žihanie	Žihanie na mätko	Kalenie	Popúšťanie
Teplota [°C]	840	700	820/ voda, olej	600/ vzduch

(LEINVEBER, 2006, str. 235)

Tab.14. Chemické zloženie ocele 12 050 v hmot. %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
0,42 - 0,5	0,5 – 0,8	0,17 - 0,37	max.0,04	max.0,04	max.0,25	max.0,3	max.0,3

(CZ FERRO - STEEL, spol. s r.o.: ČSN 12050, 2011)

5.2.1.4 Oceľ 14 220 - ČSN 41 4220

Oceľ 14 220 je ušľachtilá konštrukčná mangán - chrómová oceľ vhodná na cementovanie. Dobré tvárna za tepla a po žihaní aj za studena. Po cementovaní a kalení majú súčasti veľmi tvrdú cementovanú vrstvu a veľkú pevnosť v jadre. Vyrábajú sa z nej ozubené kolá, šneky, menšie hriadele, vretená obrábacích strojov, piestne čapy, zubové spojky, vačková hriadele a pod. (LEINVEBER, 2006, str. 237)

Tab.15. Tepelné spracovanie ocele 14 220

Spôsob		Teplota [°C]	Ochladenie
Normalizačné žíhanie		880 – 920	Na vzduchu
Cementovanie	V plyne	900 – 930	Na vzduch / ochladzovacej jednotke
	V prášku	860 - 900	Na vzduchu/ cementačnej krabici
	V soľnom kúpeli	890 - 910	Na vzduchu
Žíhanie na mätko		680 – 720	V peci
Kalenie		810 – 840	V oleji / kúpeli 150 – 200 °C
Popúšťanie		150 – 200	Na vzduchu

Tab.16. Chemické zloženie ocele 14 220 v hmot. %

C	Mn	Si	P	S	Cr
0,14 – 019	1,1 – 1,4	0,17 - 0,37	max.0,035	max.0,035	0,8 – 1,1

(JKZ Bučovice, a.s., 2010)

5.2.1.5 Oceľ 19 312 - ČSN 41 9312

Nástrojová, nízkolegovaná Mn – V oceľ s dobrou rozmerovou stálosťou po tepelnom spracovaní. Je vhodná na kalenie v oleji. Má strednú prekaliteľnosť, dobrú húževnatosť a odolnosť voči opotrebeniu. Tvárna za tepla a dobre obrobiteľná. Používa sa na výrobu nástrojov pre strihanie za studena (nástroje na strihanie na lisoch a dierovanie materiálov malých hrúbok, tvarovo zložitú strižnice a strižníky a pod.), rezných nástrojov (tanierové a kotúčové nože na rezanie papiera), foriem (malé formy na tvarovanie plastov a pryže a málo namáhané formy pre lisovanie práškových hmôt), meradlá a ručné nástroje (závitníky).

Tab.17. Tepelné spracovanie ocele 19 312

Spôsob	Teplota [°C]	Ochladzovanie
Žíhanie na mätko	680 – 710	V peci
Žíhanie na zníženie pnutia	600 – 650	V peci
Kalenie	740 – 780	V oleji

Popúšťanie	150 – 250	Na vzduchu
------------	-----------	------------

Tab.18. Chemické zloženie ocele 19 312 v hmot. %

C	Mn	Si	P	S	V
0,75 – 0,85	1,85 – 2,15	0,15 – 0,35	max.0,03	max.0,035	0,1 – 0,2

(LEINVEBER, 2006, str. 245)

5.2.2 Výroba skúšobných vzoriek

Výroba skúšobných vzoriek prebiehala vo firme MRB Sazovice. Na výrobu bol použitý CO₂ laser. V tab.19. vidieť parametre použitého laseru.

Tab.19. Parametre použitého laseru

Laser	TLF 2400 TURBO		
Všeobecné parametre	Hrúbka materiálu	mm	5
	Ohnisková vzdialenosť	Zoll	7,5
	Priemer trysky	mm	1,7
Rezanie obrysov	Plyn		N ₂
	Hrúbka rezu	mm	0,2
Obrábanie obrysov	Výkon laseru	W	2400
	Frekvencie	Hz	10000
	Rezná rýchlosť	m/min	1,7
	Vzdialenosť trysky	mm	1
	Tlak plynu	bar	18

5.2.3 Príprava skúšobných vzoriek

Príprava vzoriek prebiehala v laboratóriách UVI. Skúšobné vzorky boli narezané a následne pomocou prístroja Buehler SimpliMet 1000 zalisované do formy skúšobných teliesok.



Obr.37. Buehler SimpliMet 1000

Následne boli vzorky umiestnené do leštiaceho stroja Buehler AutoMet 250 a leštené na požadovanú kvalitu povrchu. Po vyleštení boli vzorky nakonzervované aby sa predišlo nežiaducemu vzniku korózie.



Obr.38. Buehler AutoMet 250

5.2.4 Meranie mikrotvrdości

Po príprave skúšobných vzoriek prišiel rad na samotné meranie mikrotvrdości. Meranie prebiehalo na mikrotvrdomeri CSM Instruments.



Obr. 39. Mikrotvrdomer CSM Instruments

Meranie bolo realizované na 5-tich vzorkách. Pred začatím merania bol prístroj nastavený na požadované parametre. Na každej vzorke bolo zrealizovaných 50 meraní, pri ktorých bolo použité zaťaženie 50 mN. Po uložení vzorky na pracovný stôl bolo meranie spustené a prebiehalo automaticky. Po zmeraní všetkých skúšobných vzoriek boli namerané hodnoty vyexportované a pripravené na vyhodnotenie.

6 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH HODNÔT

Na vyhodnotenie bol použitý program MS Excel. Z nameraných hodnôt boli vyhodnocované veličiny:

Vtlačková tvrdosť H_{IT}

Je to najčastejšie vyjadrenie tvrdosti v spojení s metódou DSI. Je to miera rezistencie k trvalej deformácii alebo poškodeniu.

$$H_{IT} = \frac{F_{\max}}{A_p} = \frac{F_{\max}}{24,5 \cdot h_p^2} \quad (14)$$

kde: H_{IT} – Vtlačková tvrdosť

F_{\max} – maximálne zaťaženie (N)

A_p – priemet kontaktnej plochy indenteru (mm^2)

h_p - kontaktná hĺbka vtlačku (Dušek, 2008, s.37)

Elastický modul E_{IT}

V ideálnom prípade je jeho význam rovnaký ako pri Youngovom module, ale v určitej hĺbke preniknutia indenteru styčná plocha závisí nielen na tvare hrotu, ale aj na pružnej deformácii materiálu. Určuje sa pomocou vtačkovej tuhosti S zo sklonu odľahčovacej krivky, pričom platí:

$$S = \frac{dF}{dh} \quad (15)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \cdot S}{2 \cdot \sqrt{A_p}} \quad (16)$$

Pri použití diamantového indenteru je $E_i = 1140$ GPa a $\nu = 0,07$.

Následne dostávame vtlačkový modul :

$$E_{IT} = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (17)$$

Vtlačkový modul sa všeobecne vypočíta ako

$$E_{IT} = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{\nu^2}{E_i}} \quad (18)$$

- kde:
- S – vlačková tuhosť
 - F – skúšobné zaťaženie (N)
 - h – hĺbka vlačku (mm)
 - A_p - priemet kontaktnej plochy indentoru (mm^2)
 - E_r – redukovaný modul
 - E – Youngov modul
 - E_i – Youngov modul indentoru
 - ν – Piossonovo číslo materiálu
 - ν_i – Poissonovo číslo indentoru (Dušek, 2008, s.38,39)

Vlačkový creep C_{IT}

Je to relatívne vniknutie indentoru do materiálu alebo zmena hĺbky vlačku pri konštantnom zaťažení.

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_2} \cdot 100 \quad (19)$$

- kde:
- C_{IT} – Vlačkový creep (%)
 - h_1 – hĺbka na začiatku merania (mm)
 - h_2 – hĺbka na konci merania (mm) (Dušek, 2008, s.81)

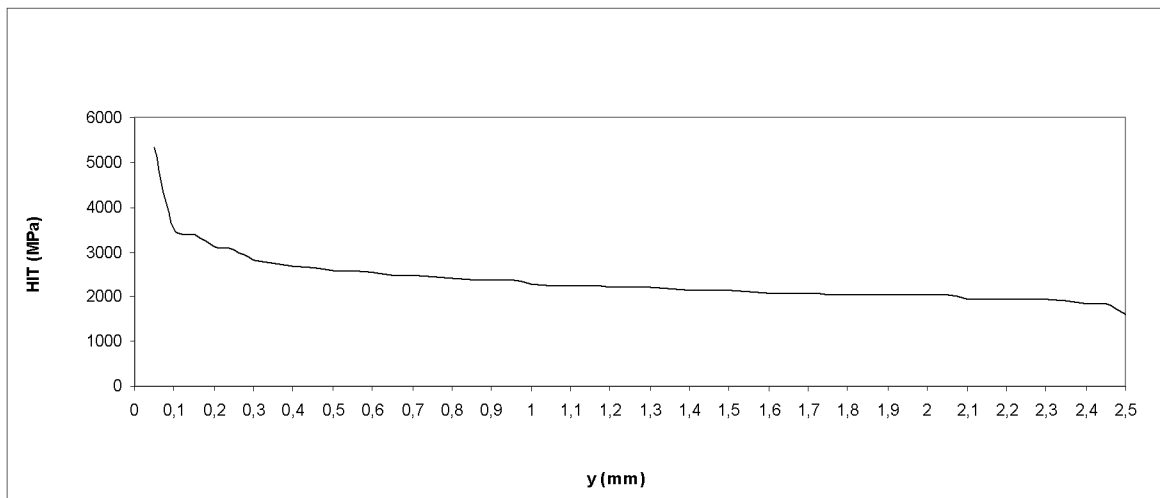
Deformačná práca vlačku W_{elast} , W_{plast} , W_{total}

Celková práca sa skladá z plastickej a elastickej časti. Elastická práca predstavuje plochu pod odľahčujúcou krivkou. Plastická práca predstavuje plochu pod zaťažujúcou krivkou.

$$W = W_{plast} + W_{elast} \quad (20)$$

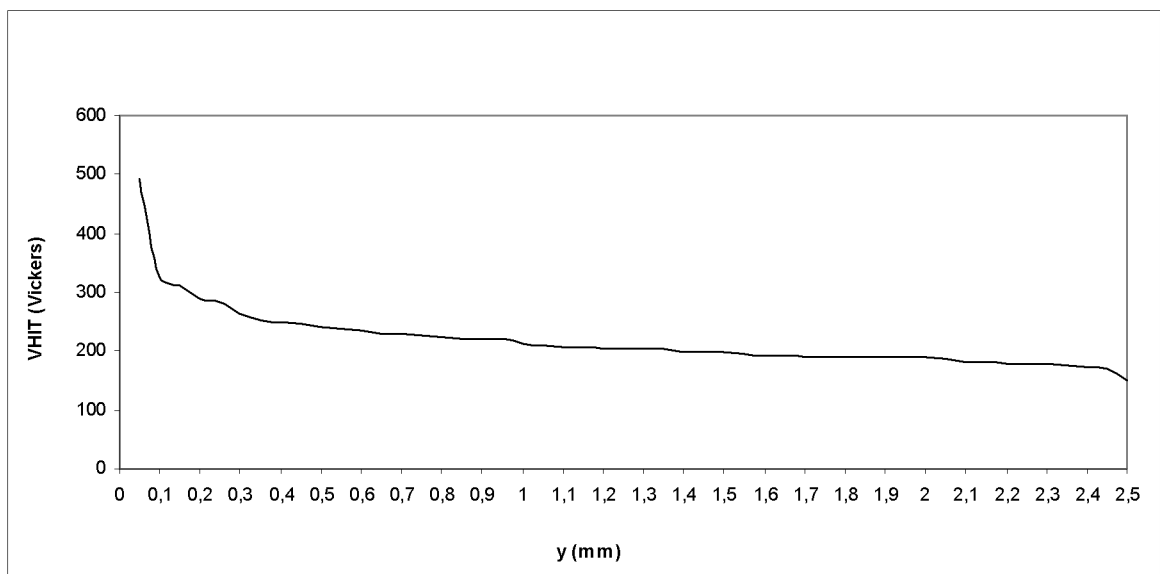
- kde:
- W – celková práca (J)
 - W- elastická zložka práce (J)
 - W – plastická zložka práce (J)

6.1 Ocel' 11 375 – ČSN 41 1375



Obr. 40. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre ocel' 11 375

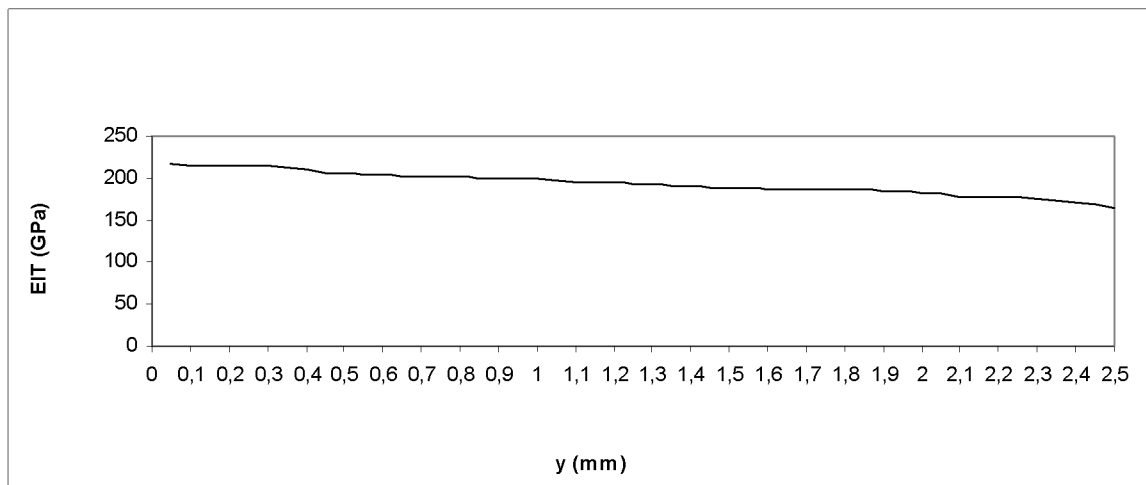
Najvyššia hodnota tvrdosti 5317,6 MPa bola nameraná v mieste rezu. Tepelne ovplyvnená vrstva siaha do hĺbky 0,3 mm, kde bola nameraná hodnota 2827,6 MPa. V ďalšom priebehu merania bol zaznamenaný len mierny pokles tvrdosti až na najnižšiu nameranú tvrdosť 1608,7 MPa. (obr.40.)



Obr. 41. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre ocel' 11 375

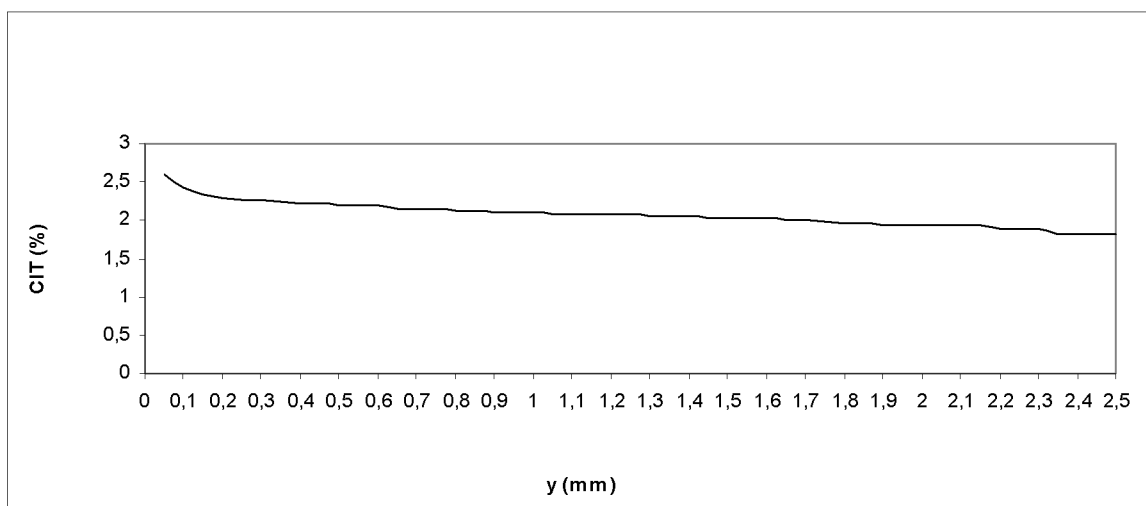
Následkom tepelného ovplyvnenia pri rezaní laserom vzrástla tvrdosť materiálu v mieste rezu (obr.41). Tvrdosť dosahuje hodnoty 492,46 HV. So zväčšujúcou sa vzdialenosťou od miesta rezu pozorujeme prudký pokles tvrdosti, až do vzdialenosti 0,35 mm kde tvrdosť

dosahuje 253,22 HV a následne tvrdosť klesá pozvoľna až na najnižšiu nameranú hodnotu 148,98 HV .



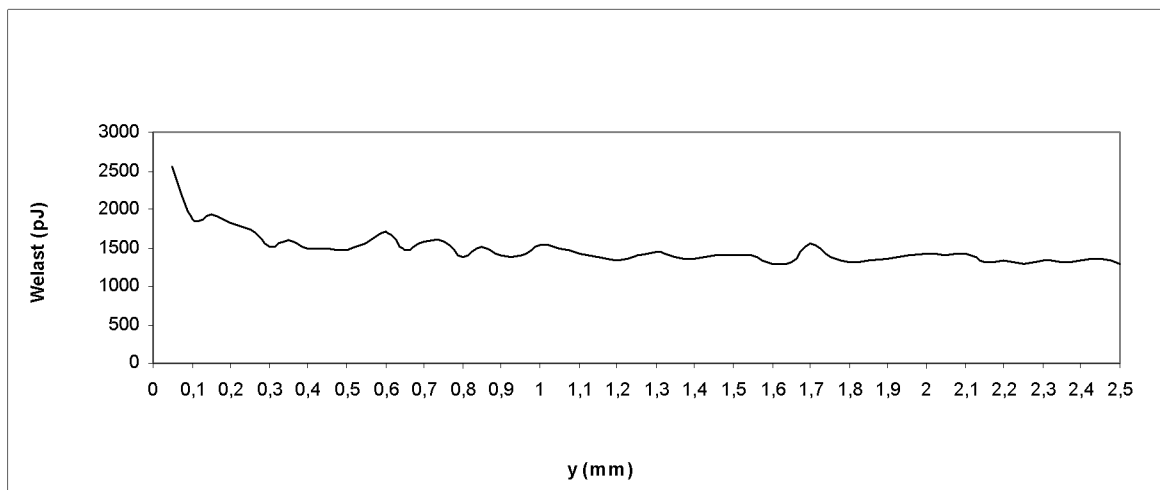
Obr. 42. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 11 375

Na obr. 42. je vidieť mierny nárast elastického modulu v mieste rezu a jeho pozvoľný pokles so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od miesta rezu. Najvyšší nameraný modul bol 217,88 GPa. Pokles elastického modulu bol po celej dĺžke merania mierny a najnižšia nameraná hodnota bola 165,18 GPa.



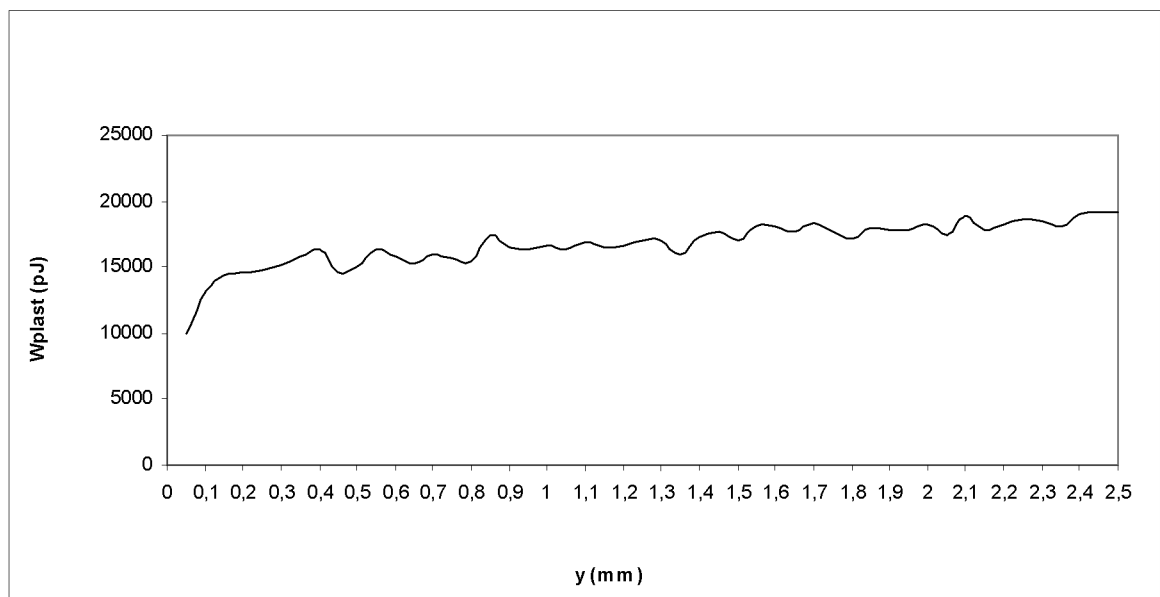
Obr. 43. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 11 375

Na obr. 43. zaznamenávame najvyššiu hodnotu creepu 2,61%. Do hĺbky 0,1 mm vidíme rýchly pokles na hodnotu 2,43%. Na zvyšnej meranej dĺžke pozorujeme mierny pokles a najnižšia nameraná hodnota dosahovala 1,81 %.



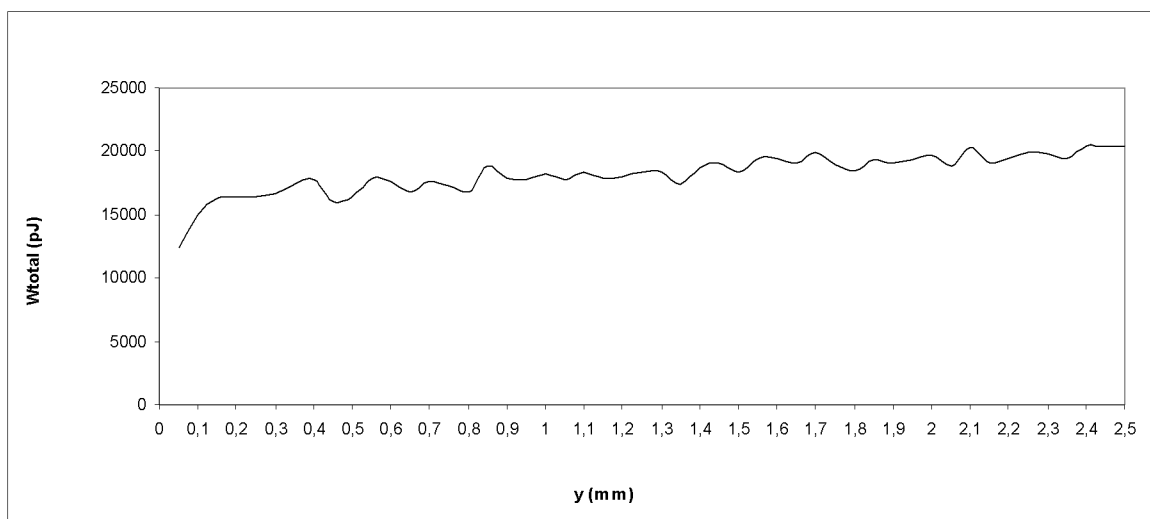
Obr. 44. Elastická práca vtláčku W_{elast} pre oceľ 11 375

Elastická práca dosahuje najvyššiu hodnotu v mieste rezu a to 2551,49 pJ. Do hĺbky 0,25 mm pozorujeme pokles na hodnotu 1735,4 pJ. Priebeh práce na zvyšnej meranej dĺžke je nepravidelný a môže byť ovplyvnený zložením meraného materiálu.



Obr. 45. Plastická práca vtláčku W_{plast} pre oceľ 11 375

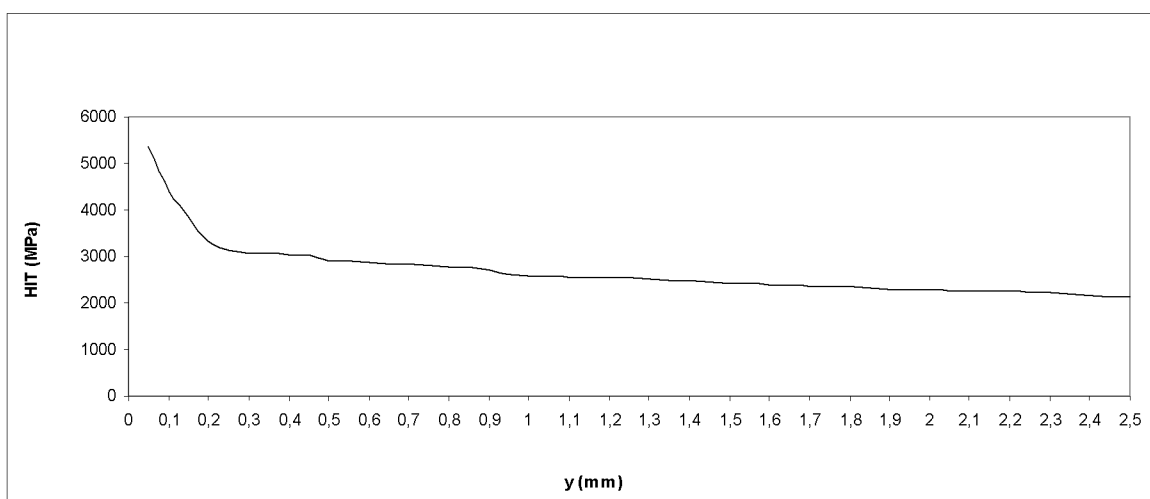
Priebeh plastickej práce po celej meranej dĺžke má rastúci charakter. Najnižšia hodnota plastickej práce 9940,63 pJ bola nameraná v mieste rezu. Výrazný nárast plastickej práce na hodnotu 14406,35 pJ môžeme pozorovať do hĺbky 0,15 mm. Zvyšné hodnoty plastickej práce mierne rastú. Najvyššia plastickej práca 19168,6 pJ bola nameraná vo vzdialenosti 2,5 mm od miesta rezu.



Obr. 46. Celková práca vtlačku W_{total} pre oceľ 11 375

Priebeh celkovej deformačnej práce je ovplyvnený vlastnosťami materiálu a jeho zložením. Najnižšia hodnota celkovej práce je 12492,11 pJ a bola nameraná v mieste rezu. Na obr.46. pozorujeme do hĺbky 0,15 mm nárast celovej práce na hodnotu 16330,31 pJ a ďalší priebeh je nepravidelný. Vo vzdialenosti 2,5 mm bola nameraná najvyššia celková práca 20466,3 pJ.

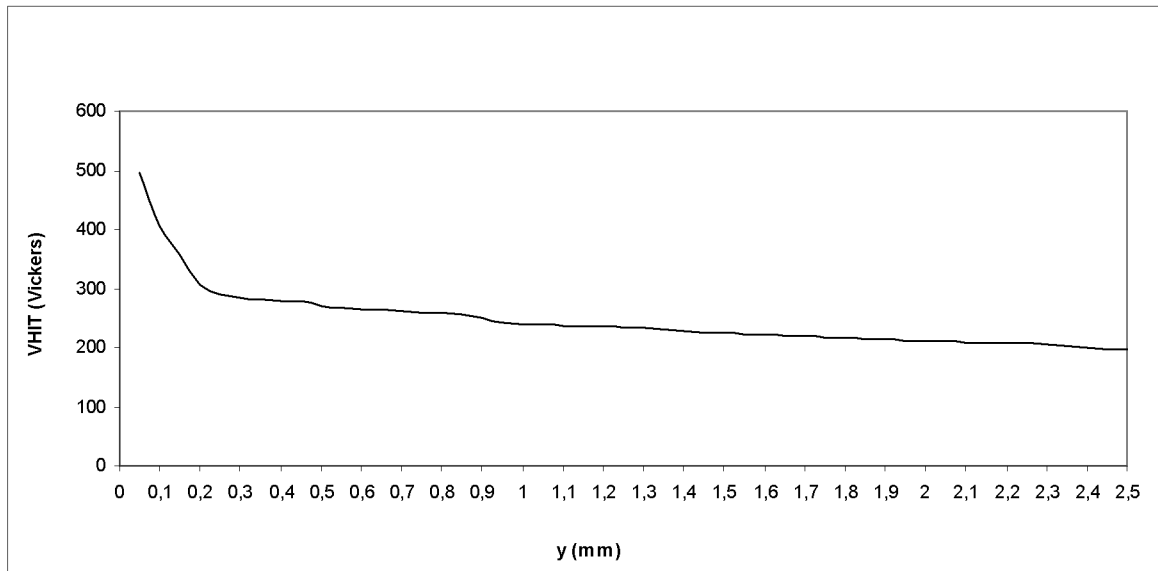
6.2 Oceľ 11 523 – ČSN 41 1523



Obr. 47. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 11 523

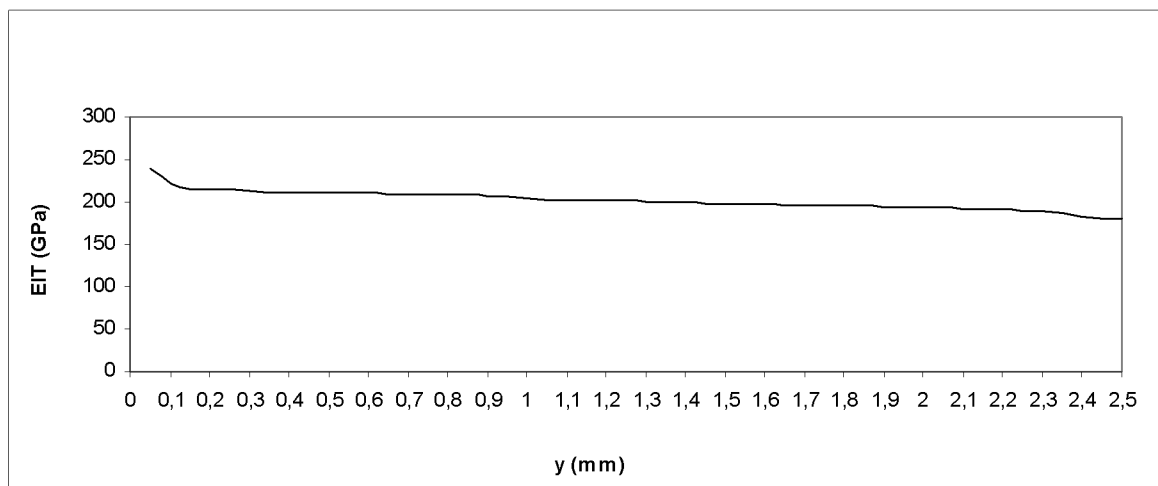
U ocele 11 523 pozorujeme výrazný nárast tvrdosti spojený so vznikom martenzitu. Najvyššia tvrdosť 5356,5 MPa bola nameraná v mieste rezu. Do hĺbky 0,3 mm pozorujeme rýchly

pokles tvrdosti na hodnotu 3058,6 MPa. Od hlúbky 0,3 mm je pokles tvrdosti pozvoľný. Najnižšia tvrdosť 2120,1 MPa bola nameraná v hlúbke 2,5 mm.



Obr. 48. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre ocel' 11 523

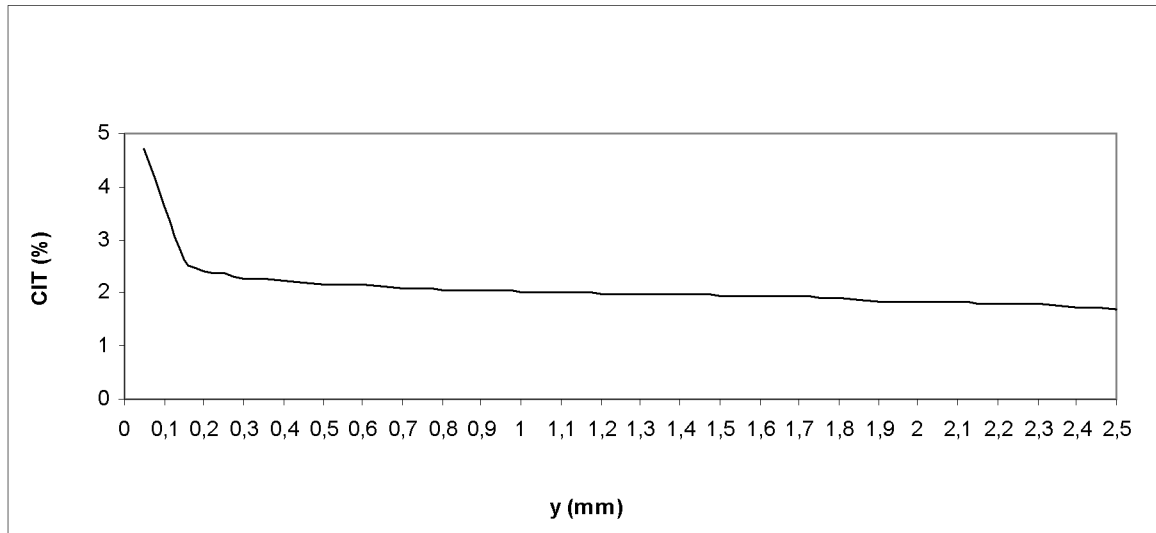
Z výsledkov merania vyplynulo, že v mieste rezu bola nameraná najvyššia tvrdosť 496,07 HV. Do hlúbky 0,3 mm pozorujeme rýchly pokles na hodnotu 283,26 HV. V hlúbke 0,3 mm nastáva zmiernenie poklesu a ďalší pokles tvrdosti je pomalší. Najnižšia hodnota 196,35 HV bola nameraná na konci merania.



Obr. 49. Elastický modul E_{IT} pre ocel' 11 523

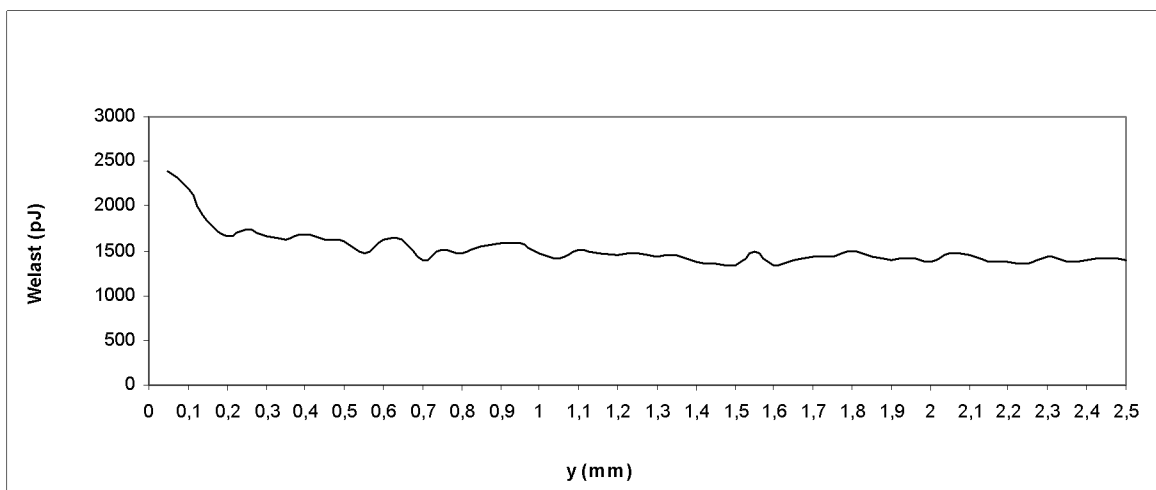
Na obr. 42. je znázornený priebeh elastického modulu u oceli 11 523. Elastický modul dosahuje najvyššiu hodnotu v mieste rezu a to 239,59 GPa. Zvýšenú hodnotu pozorujeme do

hĺbky 0,15 mm. Následne zaznamenávame pomalý pokles až na najnižšiu nameranú hodnotu 179,39 GPa vo vzdialenosti 2,5 mm.



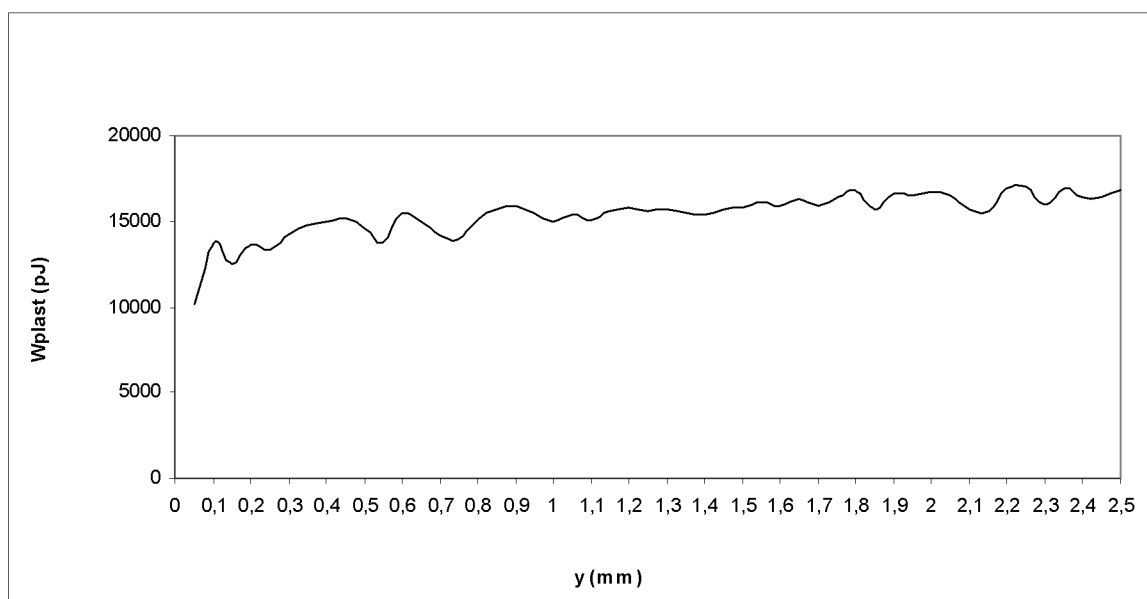
Obr. 50. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 11 523

Z obr.50. je zrejmé, že v mieste rezu dosiahol creep maximálnu hodnotu a to 4,7%. Následne vidíme prudký pokles na hodnotu 2,4%, ktorú dosahuje v hĺbke 0,2 mm. Ďalšia zmena creepu je malá a má klesajúci charakter.



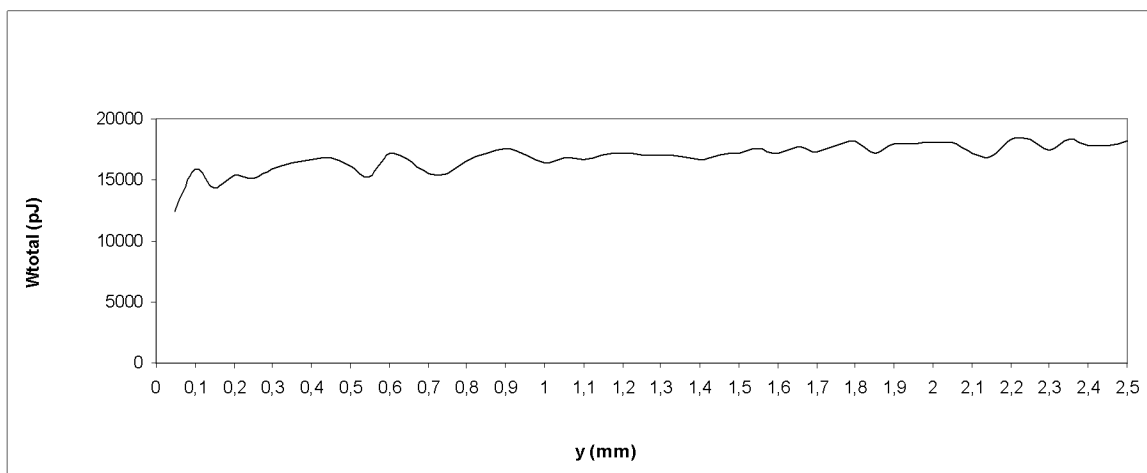
Obr. 51. Elastická práca vtlačku W_{elast} pre oceľ 11 523

Elastická práca dosahuje v mieste rezu svoje maximum a to 2381,08 pJ. Do hĺbky 0,2 mm zaznamenávame pokles na hodnotu 1654,4 pJ. Následne je priebeh nepravidelný ale v konečnom dôsledku je klesajúci.



Obr. 52. Plastická práca vtlačku W_{plast} pre ocel' 11 523

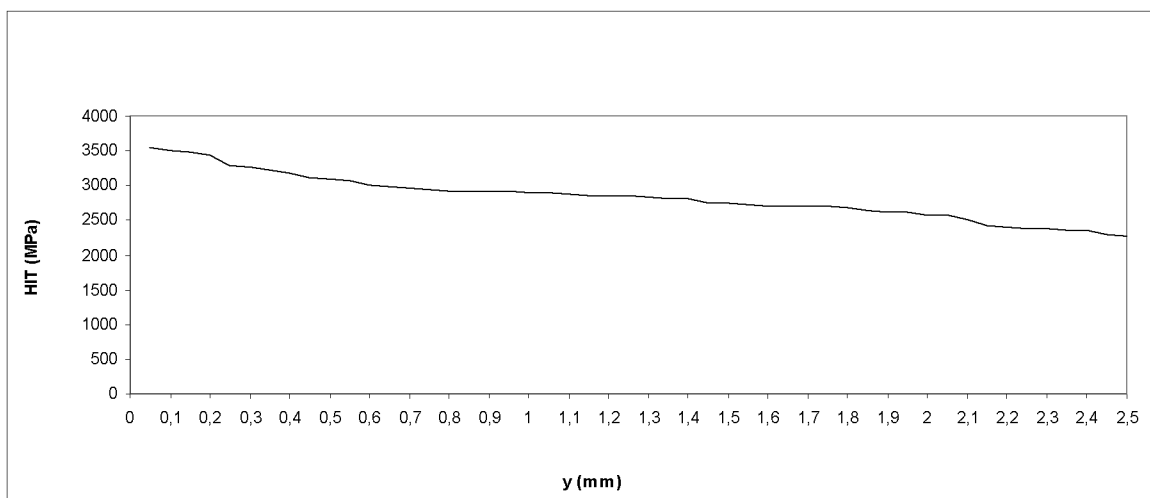
V mieste rezu bola nameraná najnižšia plastická práca 10108,4 pJ. Následne pozorujeme jej nárast do hĺbky 0,1 mm, kde bola nameraná hodnota 13741,4 pJ. Na obr.52. je vidieť, že plastická práca si zachováva rastúci priebeh.



Obr. 53. Celková práca vtlačku W_{total} pre ocel' 11 523

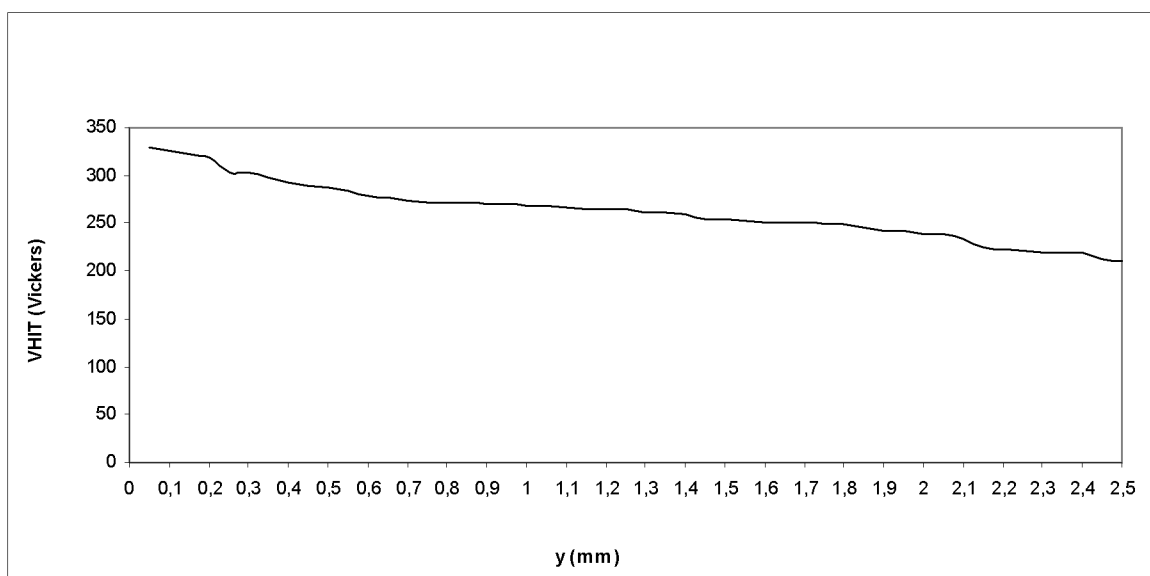
U ocele 11 523 bolo zistené, že v mieste rezu celková práca dosiahla svojho minima a to 12489,4 pJ. Následne bol nameraný nárast práce na hodnotu 15932,5 pJ, ktorá bola nameraná vo vzdialenosti 0,1 mm od miesta rezu. Od tejto vzdialenosti má celková práca nepravidelný priebeh ale charakter krivky je rastúci.

6.3 Ocel' 12 050 – ČSN 41 2050



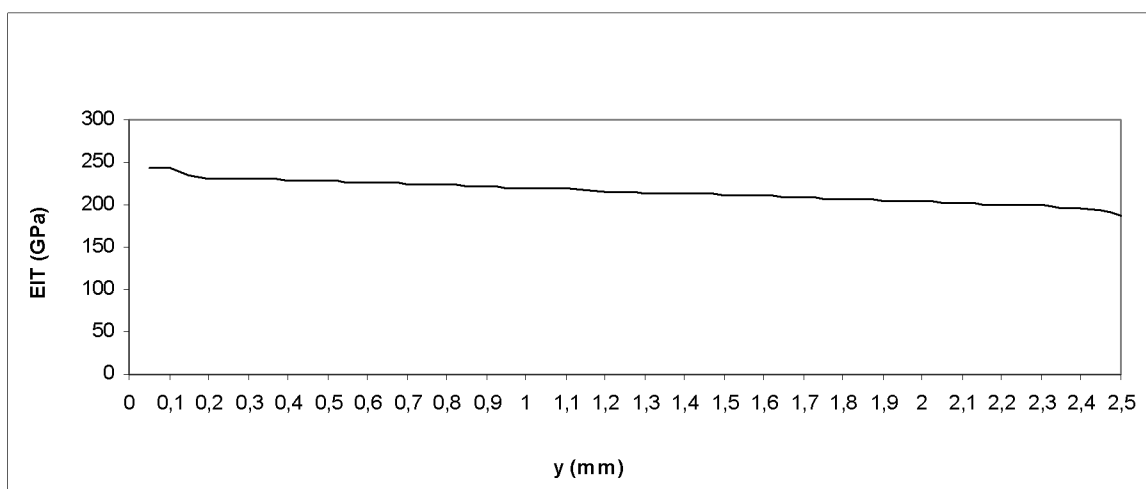
Obr. 54. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre ocel' 12 050

Ako je vidieť na obr.54., najväčšia tvrdosť bola nameraná v mieste rezu a to 3554,9 MPa, ale jej pokles nie je tak rýchly ako u prechádzajúcich vzoriek. Pokles tvrdosti je pozvoľný bez výrazných vychýlení. Klesajúci charakter si zachováva až do vzdialenosti 2,5 mm, kde bola nameraná najnižšia hodnota tvrdosti 2276,4 MPa.



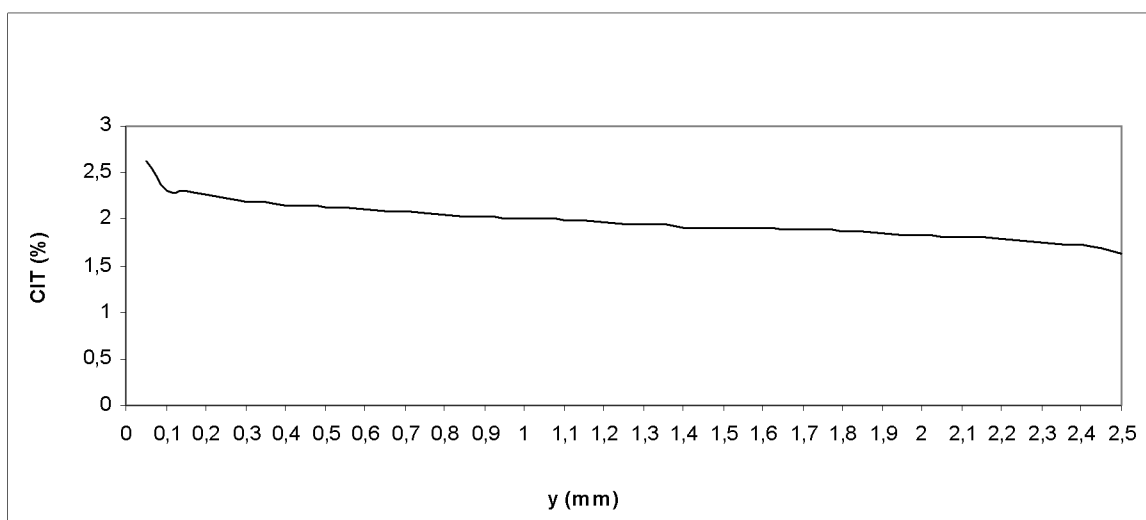
Obr. 55. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre ocel' 12 050

Maximálnu hodnotu 329,22 HV dosiahla tvrdosť v mieste rezu. Tvrdosť klesá takmer konštantne po celej meranej dĺžke. Je to spôsobené vyšším obsahom uhlíka, ktorý spôsobuje horšiu tepelnú vodivosť a s tým spojený menší nárast tvrdosti. Najnižšia tvrdosť 210,82 HV bola nameraná vo vzdialenosti 2,5 mm.



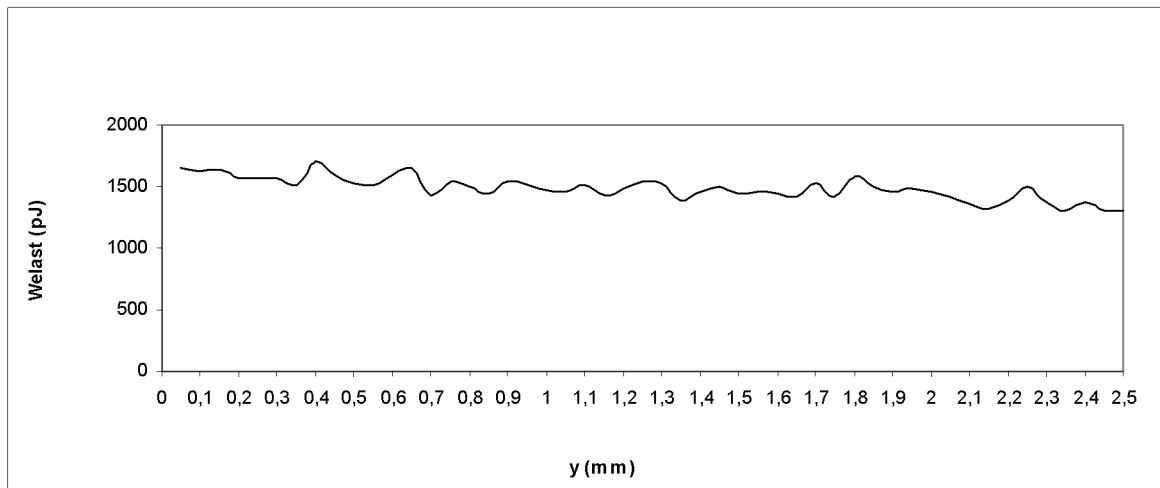
Obr. 56. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 12 050

V mieste rezu bola zaznamenaná najvyššia hodnota elastického modulu 243,61 GPa. Výraznejší pokles je viditeľný do hĺbky 0,2 mm, kde jeho hodnota dosahuje 231,24 GPa. Pokles modulu je následne pomalý a minimálna hodnota, ktorú dosahuje je 184,42 GPa nameraná v hĺbke 2,5 mm.



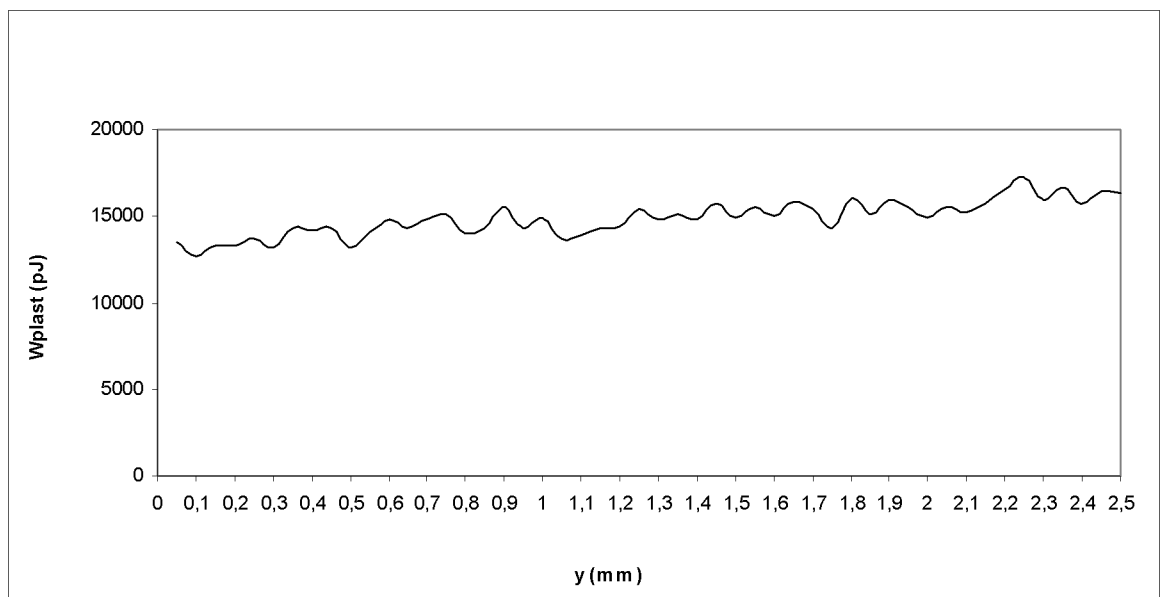
Obr. 57. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 12 050

Najvyššia hodnota creepu bola nameraná v mieste rezu a to 2,63%. Do hĺbky 0,1 mm hodnota creepu klesla na 2,31 % a následne bol jeho pokles pomalý. Najnižšia nameraná hodnota bola nameraná 2,5 mm od miesta rezu a dosahovala 1,63%.



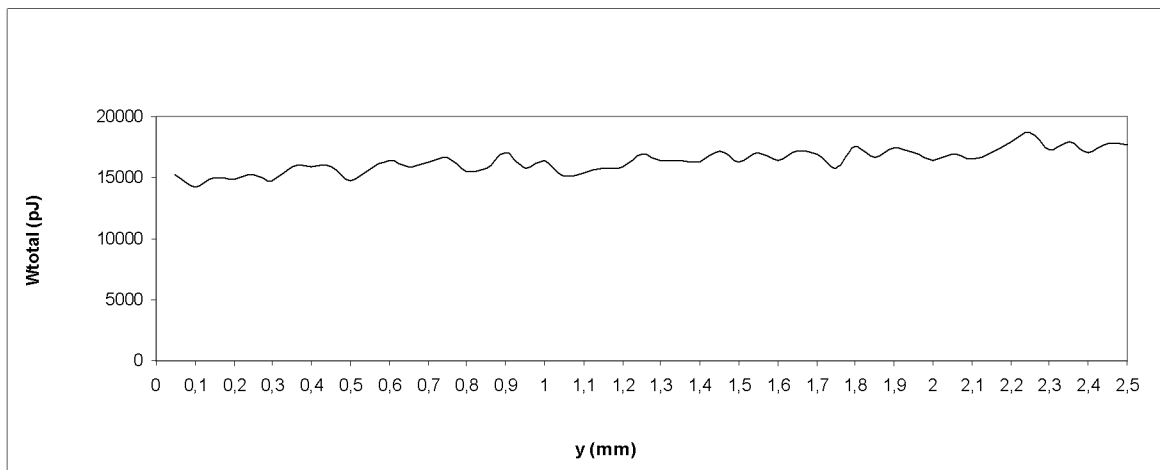
Obr. 58. Elastická práca vlačku W_{elast} pre oceľ 12 050

Elastická práca má po celej meranej dĺžke nepravidelný priebeh. Na začiatku merania dosahovala 1659,6 pJ a na konci merania 1311,82 pJ, čo bola zároveň najnižšia nameraná hodnota elastickej práce.



Obr. 59. Plastická práca vlačku W_{plast} pre oceľ 12 050

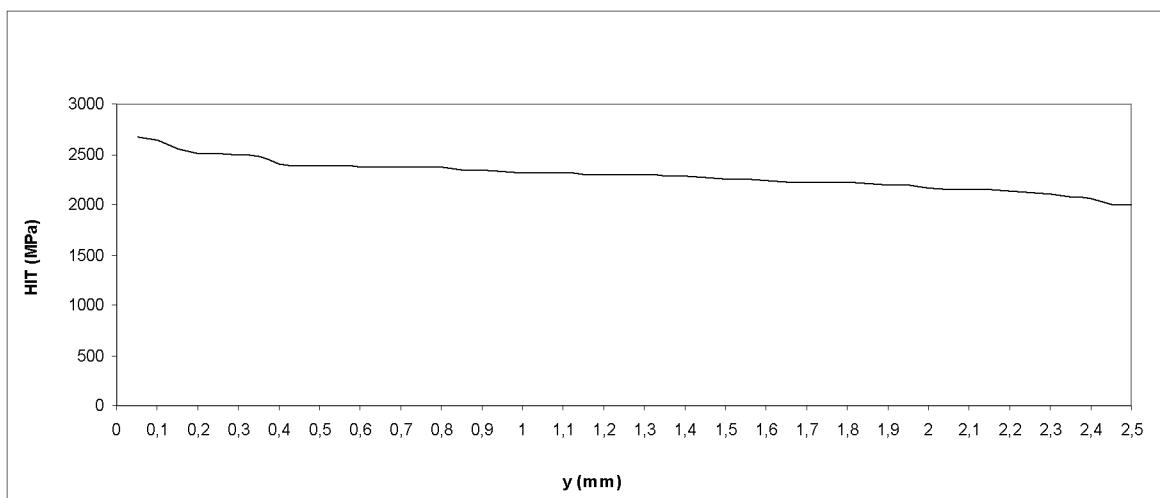
Podobne ako elastická práca aj plastickej práca má po celej meranej dĺžke nepravidelný priebeh. Z obr.59. ja ale zrejmé že má rastúci charakter.



Obr. 60. Celková práca vtlačku W_{total} pre oceľ 12 050

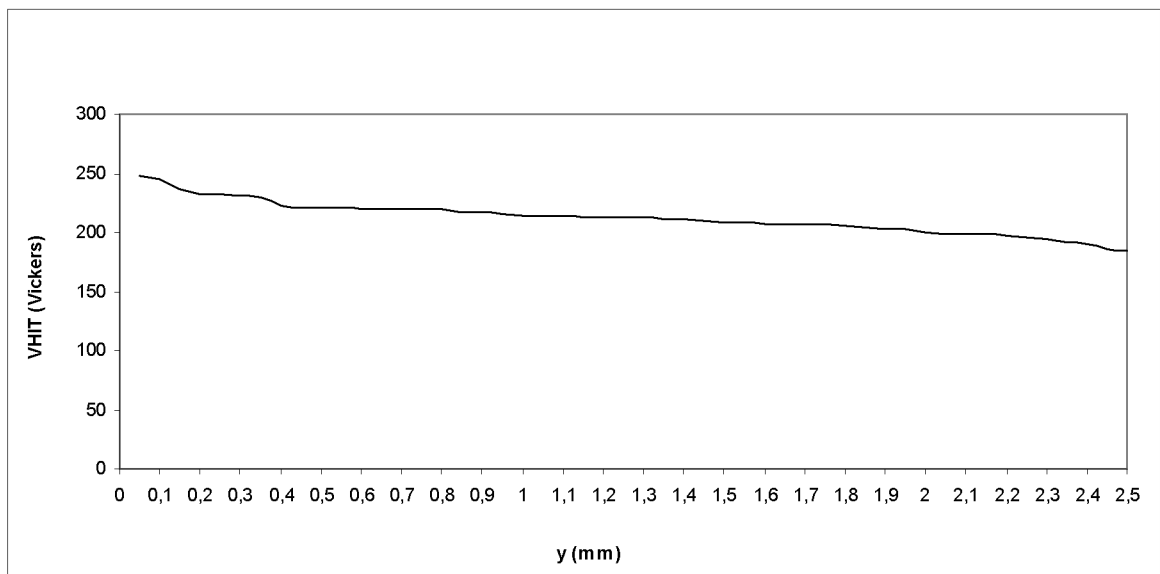
U celkovej práce pozorujeme, rovnako ako pri elastickej a plastickej práci, nepravidelný priebeh. Charakter je mierne rastúci. V mieste rezu dosahuje celková práca 15201,6 pJ.

6.4 Oceľ 14 220 – ČSN 41 4220



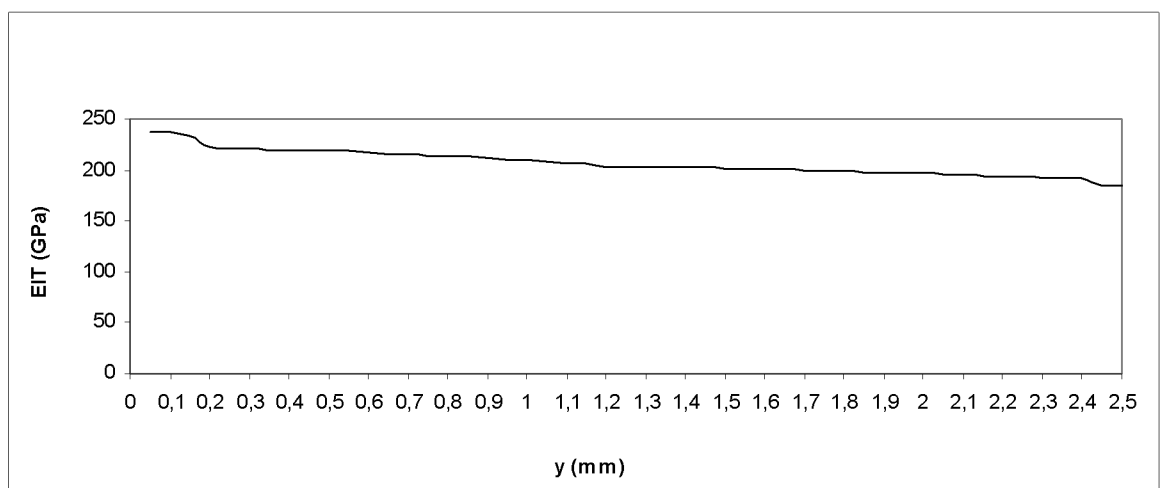
Obr. 61. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 14 220

Hodnota tvrdosti v mieste rezu dosahuje hodnotu 2670,7 MPa, čo je zároveň aj najvyššia nameraná hodnota tvrdosti pre oceľ 14 220. Výraznejší pokles tvrdosti sledujeme až do hĺbky 0,4 mm, kde tvrdosť dosiahla hodnotu 2400,9 MPa. V ďalšom priebehu merania boli zaznamenané len mierny zmeny tvrdosti ocele. Vo vzdialenosti 2,5 mm bola nameraná najnižšia tvrdosť 1999,6 MPa.



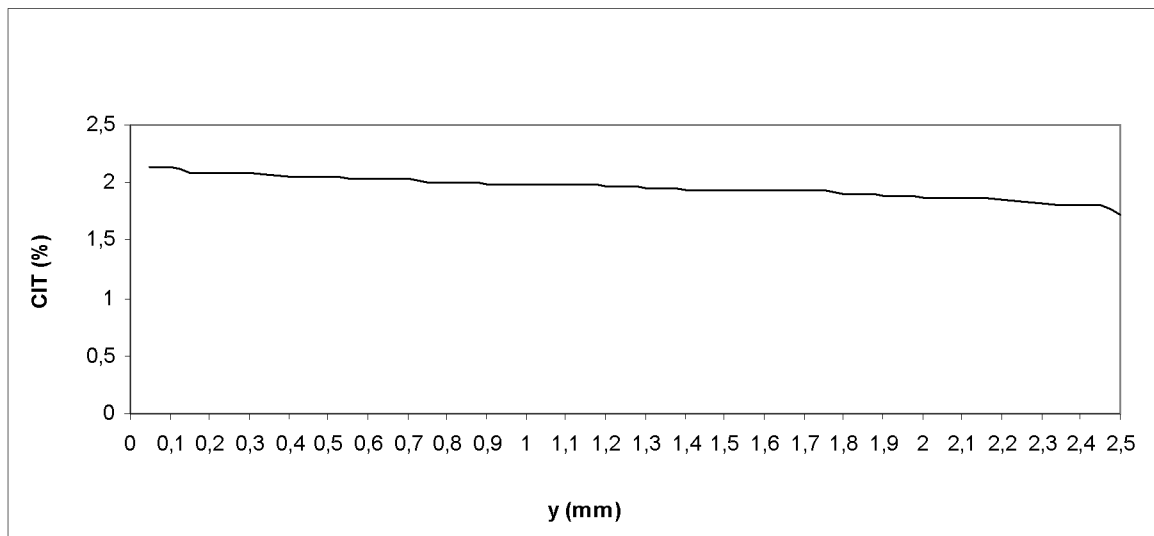
Obr. 62. Tvrdost' Vickers HV_{IT} pre ocel' 14 220

Tepelné ovplyvnenie spôsobilo u ocele 14 220 mierny nárast tvrdosti. Počiatočne zvýšená tvrdosť veľmi pomaly klesá až na tvrdosť základného materiálu. Maximálna nameraná tvrdosť je 247,34 HV. Výraznejšie ovplyvnená vrstva siaha do hĺbky cca 0,4 mm, kde bola nameraná tvrdosť 222,35 HV. Následne je pokles tvrdosti pomalý.



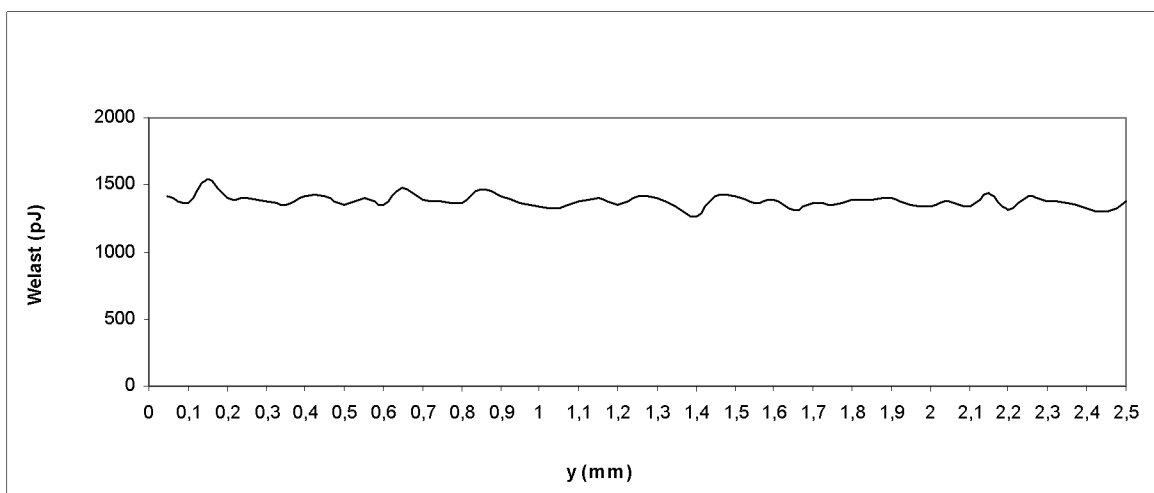
Obr. 63. Elastický modul E_{IT} pre ocel' 14 220

Nárast elastického modulu, spojeného s tepelným ovplyvnením, siaha do hĺbky 0,2 mm. Hodnota elastického modulu v mieste rezu 237,46 GPa výrazne klesá na hodnotu 222,09 GPa vo vzdialenosti 0,2 mm. Najnižšia hodnota bola zistená vo vzdialenosti 2,5 mm a odpovedá 184,3 GPa.



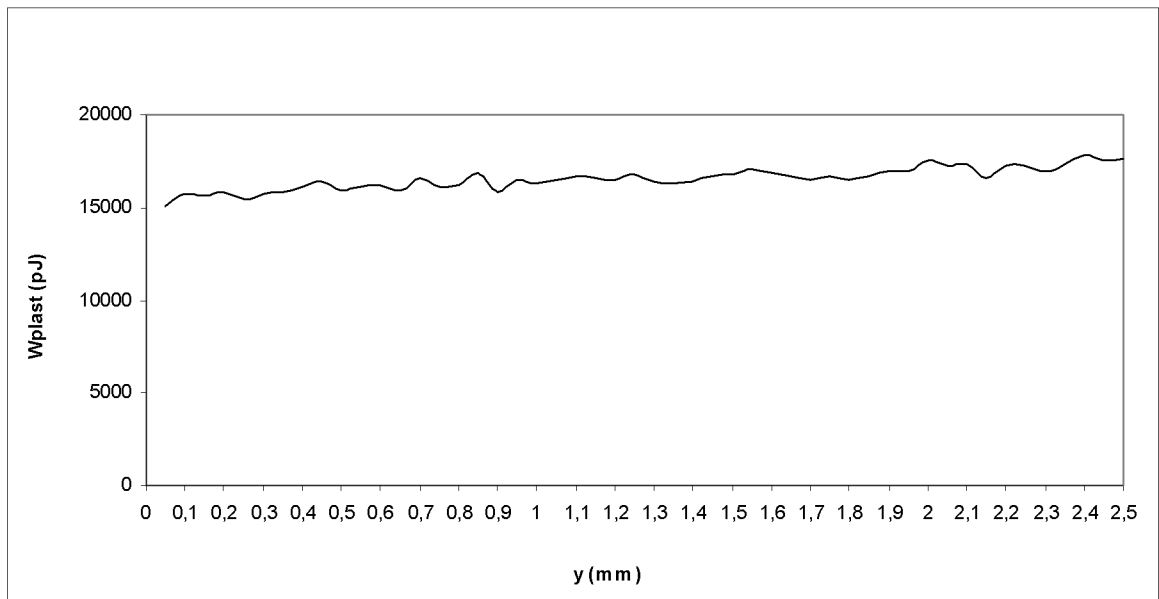
Obr. 64. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 14 220

V hodnotách creepu nepozorujeme výrazný nárast jeho hodnoty v mieste rezu. Jeho maximálne hodnoty 2,14% pozvoľna klesá po celej meranej dĺžke až na minimálnu hodnotu 1,73%.



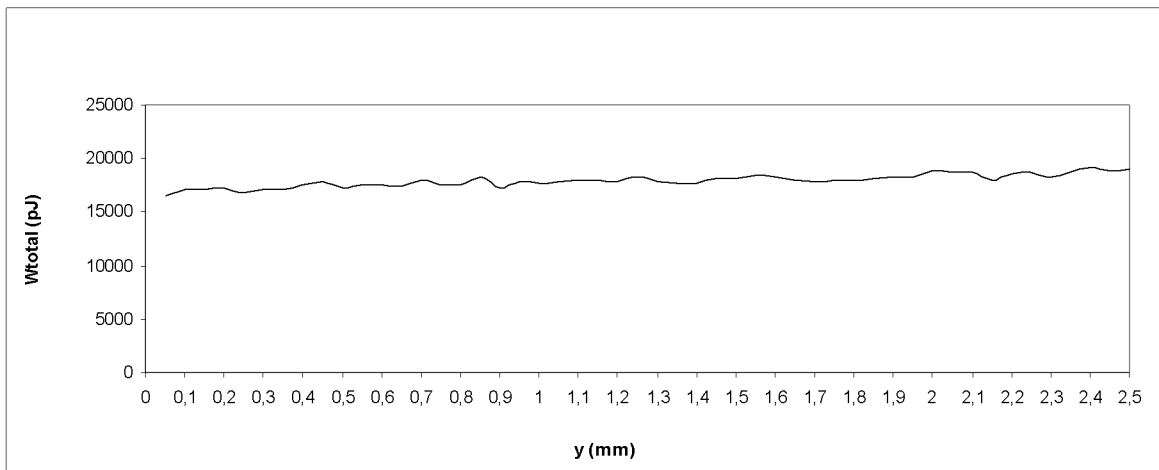
Obr. 65. Elastická práca vtlačku W_{elast} pre oceľ 14 220

U ocele 14 220 tepelne ovplyvnenie nepôsobilo výraznú zmenu elastickej práce. Priebeh práce je nepravidelný ale bez výrazných vychýlených hodnôt. V mieste rezu dosahovala hodnotu elastickej práce 1408,47 pJ.



Obr. 66. Plastická práca vtlačku W_{plast} pre ocel' 14 220

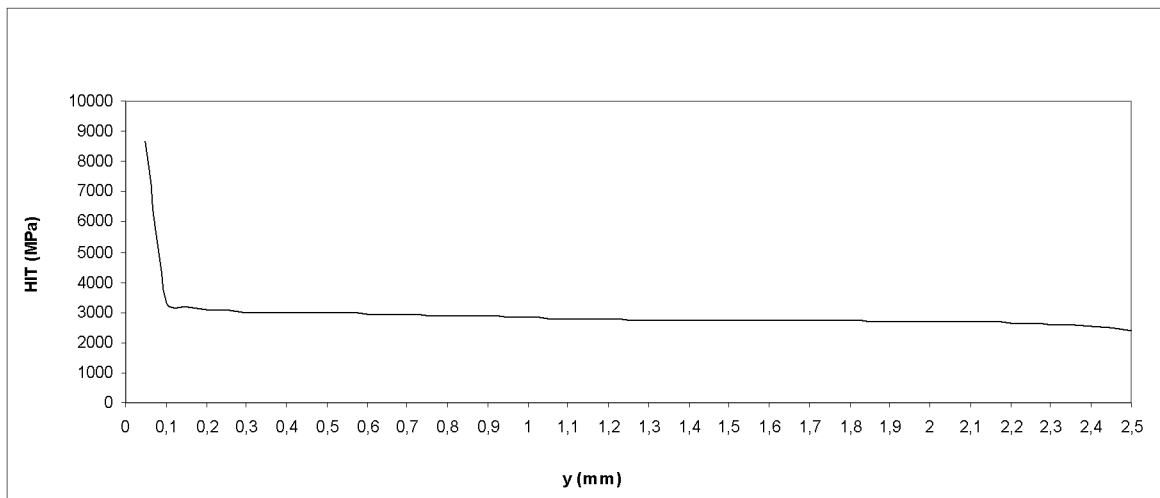
Podobne ako pri elastickej práci, ani u plastickej práce nespôsobilo tepelné ovplyvnenie výraznú zmenu. Na obr.66. je viditeľný mierne rastúci charakter krivky. V mieste rezu bola nameraná najnižšia plastická práca 15114,1 pJ.



Obr. 67. Celková práca vtlačku W_{total} pre ocel' 14 220

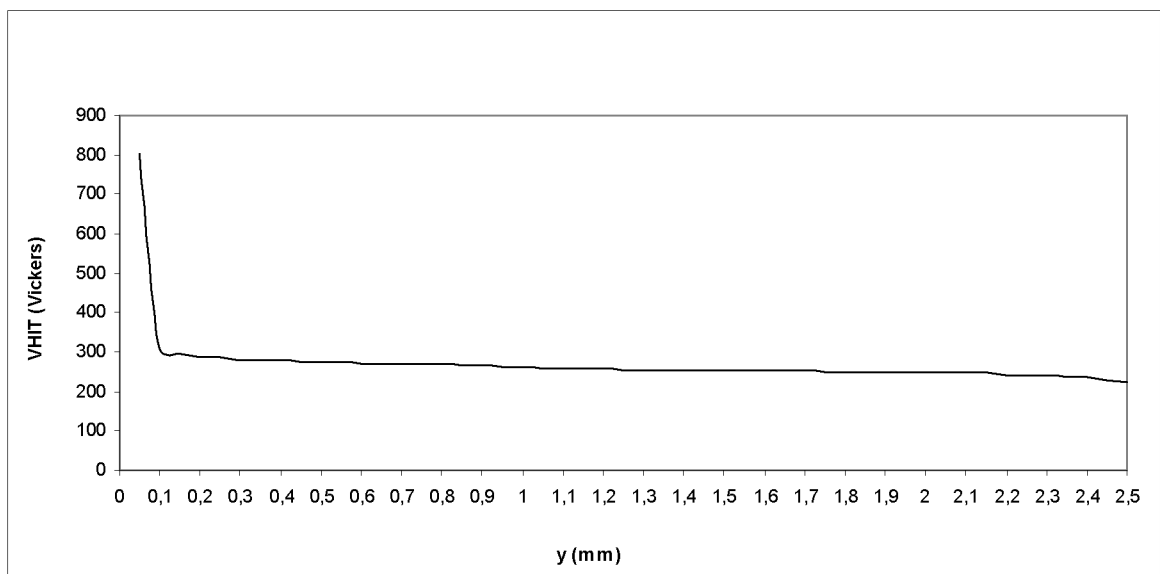
Priebeh celkovej práce, ktorý vidíme na obr.67. nám znázorňuje, že celková práce dosahovala v mieste rezu 16522,6 pJ a postupne rástla. Priebeh je podobne ako pri elastickej aj plastickej práci nepravidelný.

6.5 Ocel' 19 312 - ČSN 41 9312



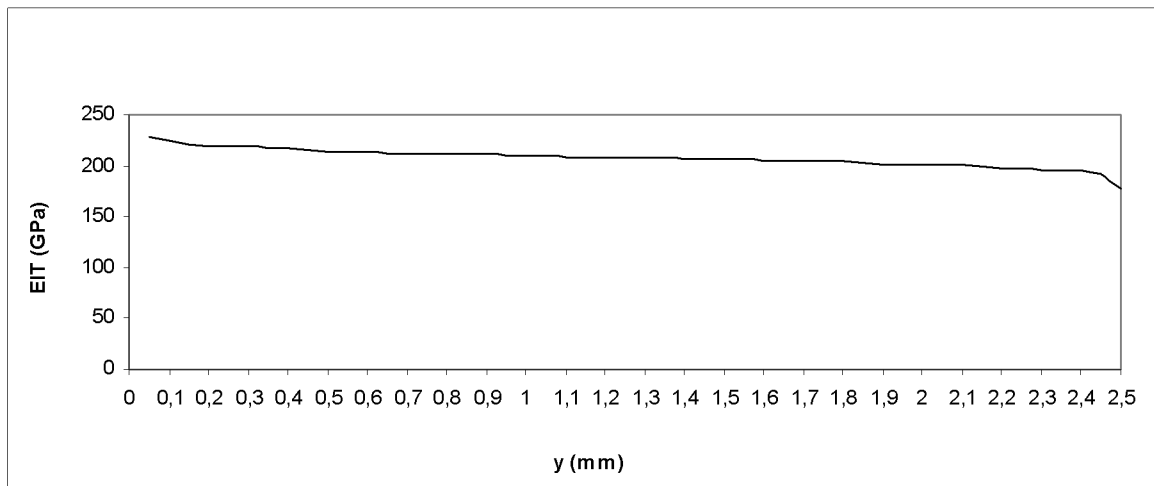
Obr. 68. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre ocel' 19 312

Najväčšiu a najvýznamnejšiu zmenu tvrdosti pozorujeme u ocele 19 312. Na obr. 68. vidíme veľký nárast tvrdosti v mieste rezu až na hodnotu 8657,9 MPa, rýchly pokles na hodnotu 3328,2 MPa, ktorá bola nameraná v hĺbke 0,1 mm a následný pomalý pokles až na tvrdosť základného materiálu.



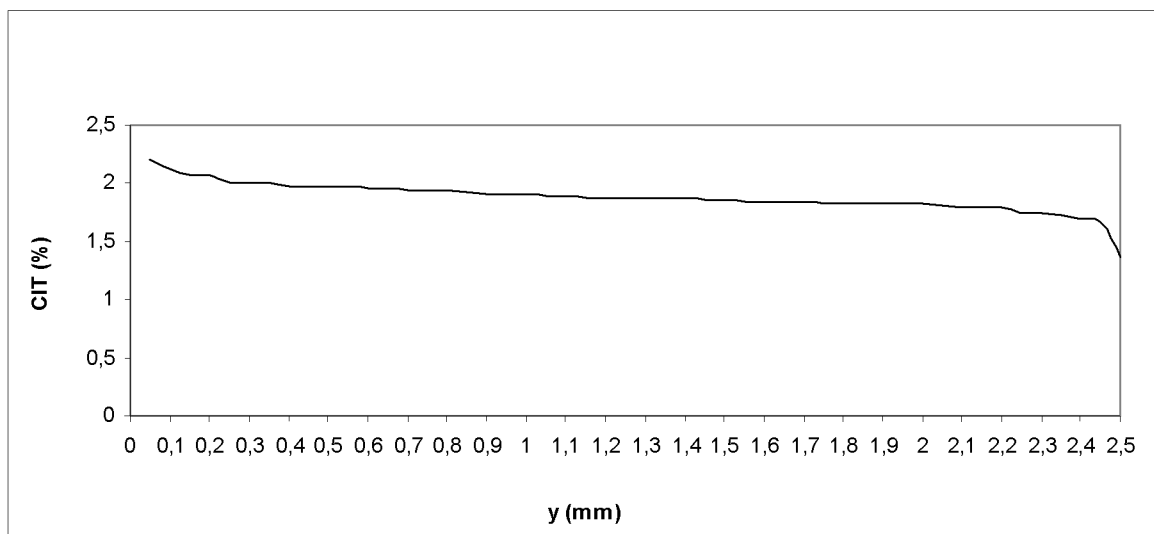
Obr. 69. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre ocel' 19 312

Výrazný nárast tvrdosti je viditeľný aj u Vickersovej tvrdosti. Hodnota tvrdosti v mieste rezu, ktorá je zároveň aj maximálnou hodnotou dosahuje 801,81 HV. Do hĺbky 0,1 mm prudko klesá a dosahuje hodnoty 308,23 HV a následná zmena tvrdosti je len veľmi malá.



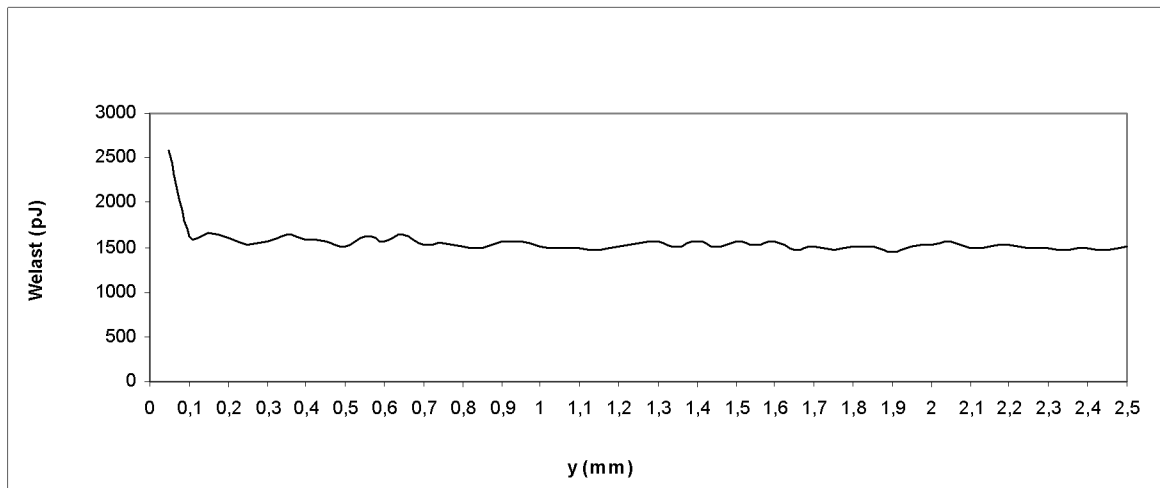
Obr. 70. Elastický modul E_{IT} pre ocel' 19 312

Pokles elastického modulu v porovnaní s tvrdosťou je pomalší. Najvyššia nameraná hodnota bola 228,8 GPa a jeho zmena bola veľmi pomalá. Najnižšia hodnota 177,15 GPa odpovedá vzdialenosti 2,5 mm od miesta rezu.



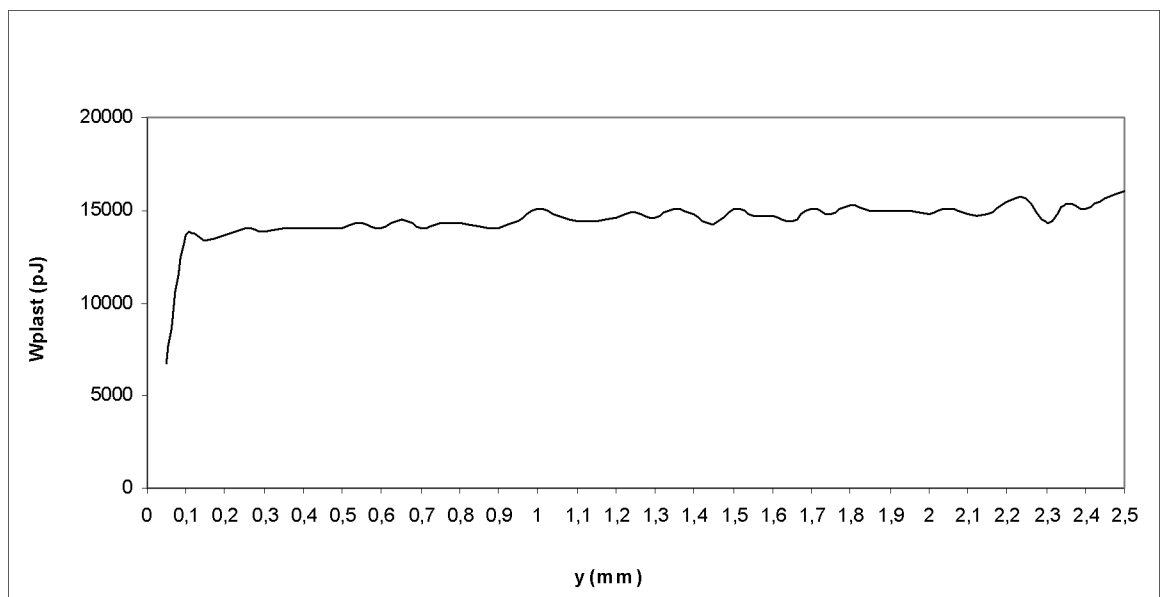
Obr. 71. Vtlačkový creep C_{IT} pre ocel' 19 312

V mieste rezu vidíme, že hodnota creepu dosahuje najvyššej hodnoty, čo odpovedá 2,2%. Následne creep postupne klesá bez výrazne vychýlených hodnôt. Zmenu creepového chovania zaznamenávame až pri poslednom meraní, vo vzdialenosti 2,5 mm, kde hodnota dosahuje 1,37%.



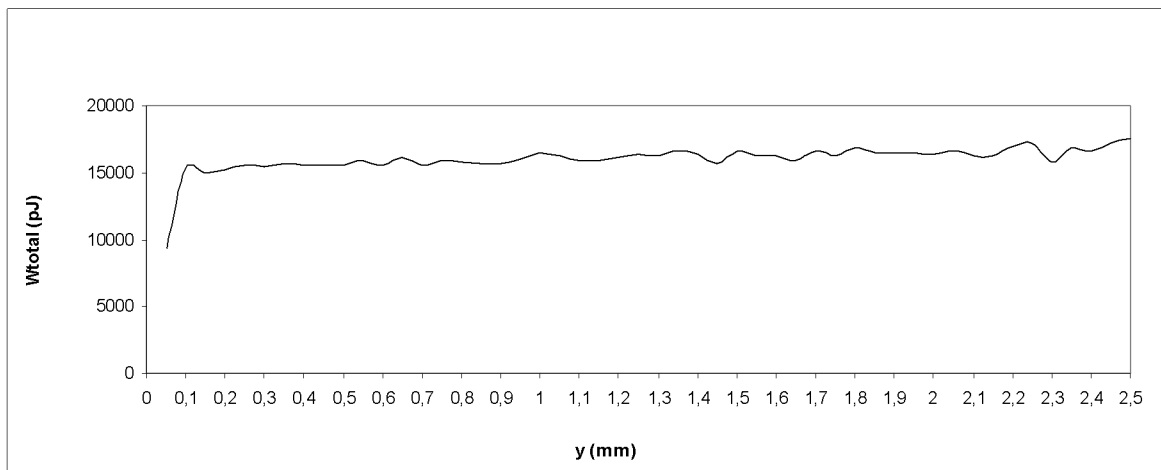
Obr. 72. Elastická práca vlačku $W_{elast.}$ pre oceľ 19 312

Na obr.72. pozorujeme výrazný nárast elastickej práce v mieste rezu. Elastická práca v tomto mieste nadobúda hodnotu 2573,05 pJ. Ďalej vidíme pokles na 1615,46 pJ, čo odpovedá vzdialenosti 0,1 mm. Ďalší priebeh elastickej práce je nepravidelný.



Obr. 73. Plastická práca vlačku $W_{plast.}$ pre oceľ 19 312

V mieste rezu dosahovala plastická práca najnižšej hodnoty a to 6776,75 pJ. Do vzdialenosti 0,1 mm sa práca zvyšovala na hodnotu 13668,5 pJ a následný priebeh bol nepravidelný bez výrazných odchýlok.

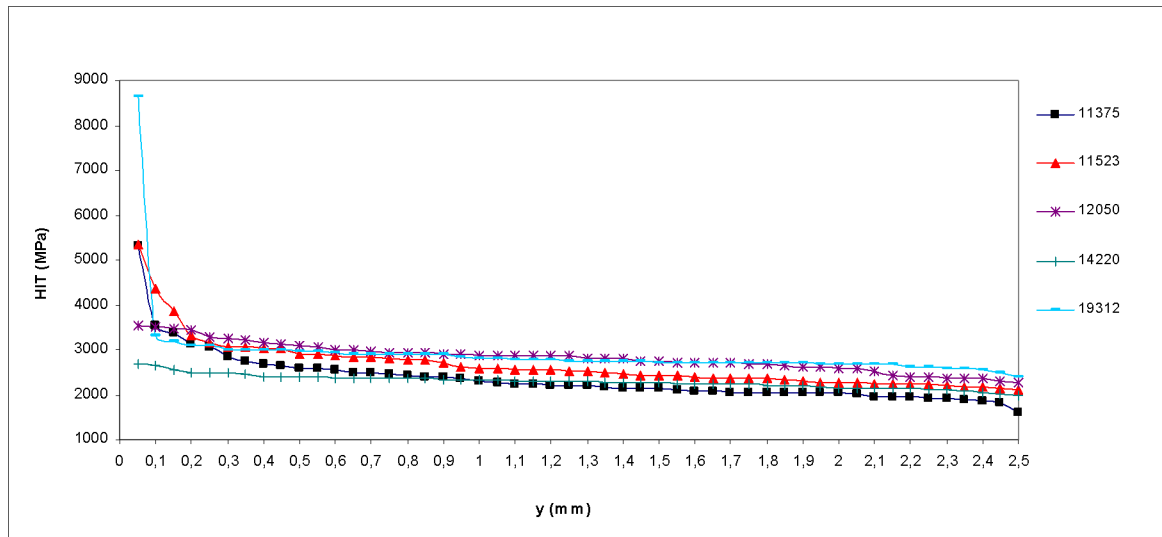


Obr. 74. Celková práca vtlačku W_{total} pre ocel' 19 312

Rovnako ako pri plastickej práci, aj celková práca dosahuje najnižšej hodnoty v mieste rezu (9349,81 pJ). Na obr.74. môžeme vidieť nárast celkovej práce na hodnotu 15283,9 pJ, čo odpovedá vzdialenosti 0,1 mm. Priebeh na zvyšnej meranej dĺžke je podobne ako v predchádzajúcich prípadoch nepravidelný bez výrazných odchýlok.

7 DISKUSIA VÝSLEDKOV

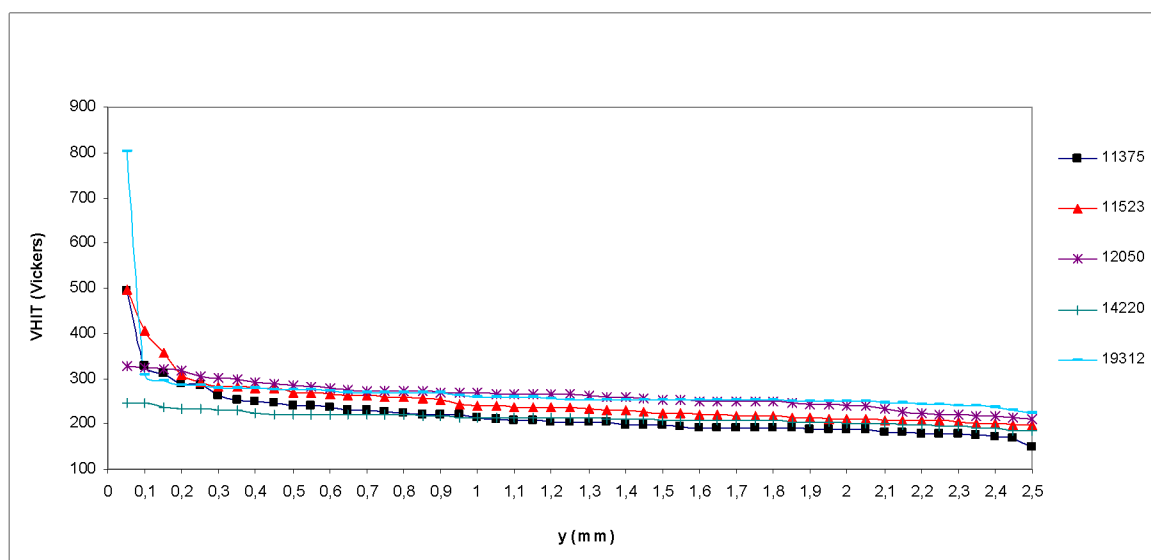
Praktická časť diplomovej práce sa zaoberá meraním ovplyvnenia povrchovej vrstvy pri rezaní laserom. Pre experimentálnu časť bolo vybrané 5 druhov oceli (11 375, 11 523, 12 050, 14 220, 19 312). Miera ovplyvnenia povrchovej vrstvy bola meraná inštrumentálnou skúškou mikrotvrdosti na mikrotvrdometri CSM Instruments.



Obr. 75. Porovnanie vtláčkovej tvrdosti H_{IT} všetkých vzoriek

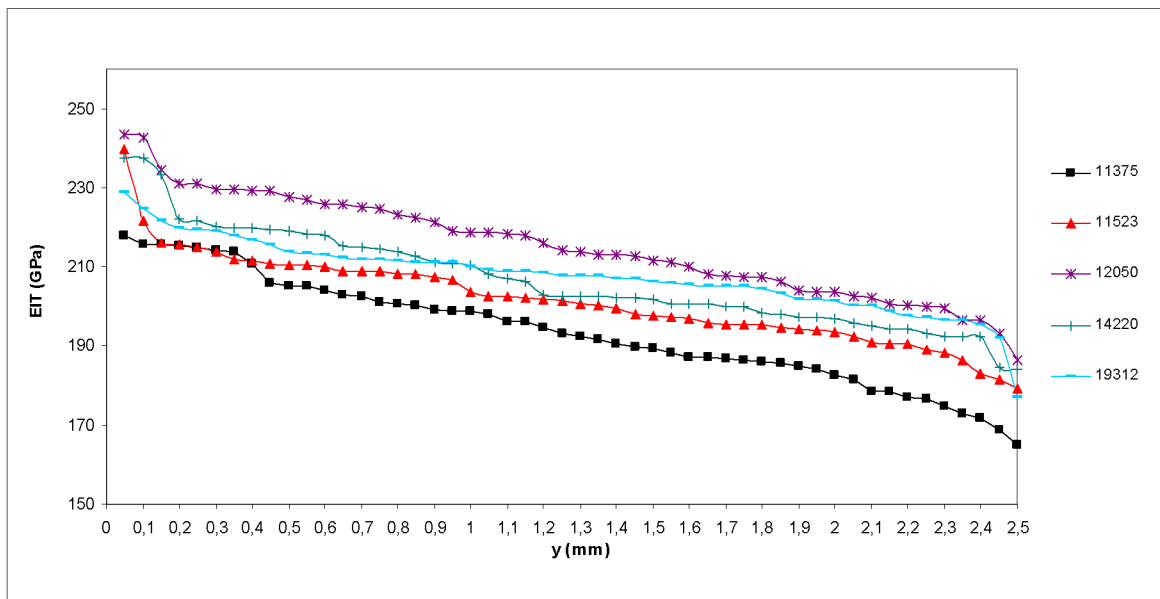
Z nameraných hodnôt mikrotvrdosti povrchových vrstiev u jednotlivých typov meraných ocelí vyplýva (obr.75.), že najväčší nárast tvrdosti môžeme pozorovať u nástrojovej ocele 19 312, u ktorej hodnota tvrdosti v mieste rezu dosahuje 8657,9 MPa. Táto hodnota tvrdosti dokazuje, že štruktúra povrchovej vrstvy bola tvorená martenzitom a austenitom zbytkovým. Táto tvrdosť siaha však do veľmi malej hĺbky. Vo vzdialenosti 0,1 mm bola nameraná hodnota 3328,2 MPa. Do hĺbky 0,1 mm prudko klesá a po dosiahnutí tejto hĺbky sa začína ustáľovať a pokles je pomalší. Výrazný nárast tvrdosti zaznamenávajú aj u ocelí 11 375 a 11 523. U ocele 11 375 jej hodnota dosiahla 5317,6 MPa a u ocele 11 523 to bolo 5356,5 MPa. U ocele 11 523 siaha tepelne ovplyvnená vrstva do väčšej hĺbky (0,2 mm). Štruktúra týchto dvoch bola tvorená martenzitom a austenitom zbytkovým ale tvrdosť martenzitu dosiahla nízkej hodnoty pretože obsah uhlíku v oceli bol veľmi nízky. U ocelí 12 050 a 14 220 nezaznamenávame výrazný nárast tvrdosti. Nárast u týchto vzoriek nemá skokový charakter ale mení sa takmer konštantne. U ocele 14 220 bola nameraná najnižšia tvrdosť v mieste rezu zo všetkých meraných vzoriek a to 2670,7 MPa. Vo väčšej vzdialenosti od miesta rezu nebola štruktúra ovplyvnená laserovým lúčom a bola tvorená perlitom (zmes

feritu a cementitu). Nárast alebo pokles mikrotvrdości môže byť ovplyvnený prestupom tepla u jednotlivých ocelí, ktoré sa od seba vzájomne líšia. Odlišnosť môže byť spôsobená chemickým zložením a štruktúrou, ktorá môže hrať pri prestupe tepla významnú rolu.



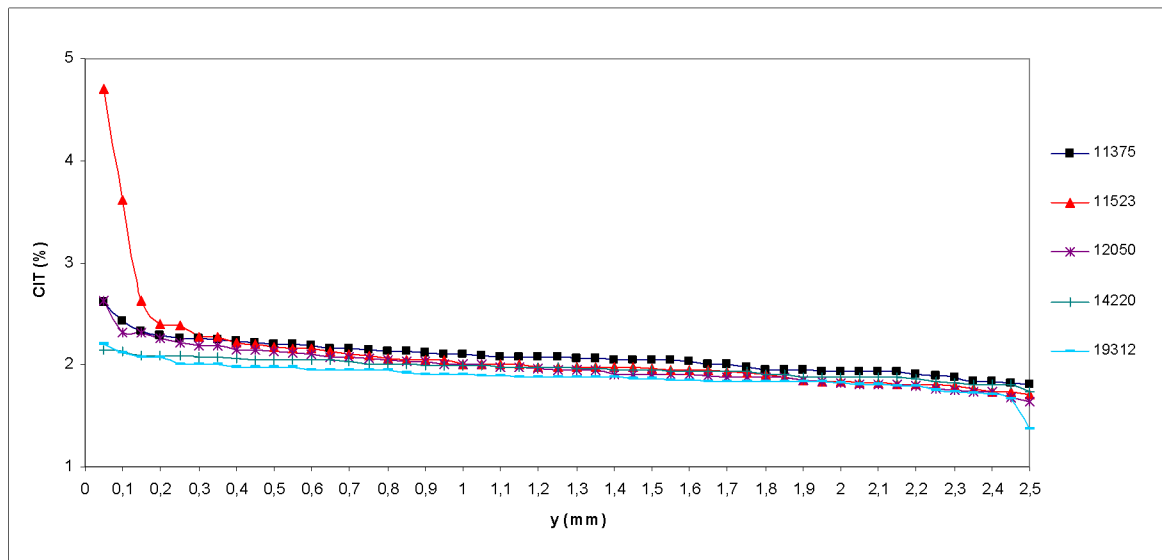
Obr. 76. Porovnanie Vickersovej tvrdości HV_{IT} všetkých vzoriek

Hodnota tvrdości ocele 19 312 dosiahla hranicu 801,81 HV, čo je najvyššia nameraná tvrdość spomedzi všetkých vzoriek. Do vzdialenosti 0,1 mm bola štruktúra tvorená martenzitom a austenitom zbytkovým. Pozorujeme prudký pokles tvrdości na hodnotu 308,23 HV a následne je zmena tvrdości pomalšia. Rýchly pokles sledujeme aj u ocele 11 375, kde tvrdość v mieste rezu dosahovala 492,46 HV a vo vzdialenosti 0,1 mm 326,67 HV. U ocele 11 523 bola zistená tvrdość 496,07 HV a pozorujeme jej miernejší pokles až do hĺbky 0,2 mm, kde dosahuje 307,01 HV. U týchto ocelí štruktúru tvoril austenit zbytkový a martenzit s nízkym obsahom uhlíku, čo spôsobilo jeho nižšiu tvrdość. U ocelí 12 050 a 14 220 nebola nameraná výrazne zvýšená hranica tvrdości. Vo väčšej vzdialenosti od miesta rezu bola štruktúra tvorená perlitom z čoho vyplýva, že tepelné ovplyvnenie nesiahá do veľkej hĺbky. Nárast alebo pokles mikrotvrdości môže byť ovplyvnený prestupom tepla u jednotlivých ocelí, ktoré sa od seba vzájomne líšia. Odlišnosť môže byť spôsobená chemickým zložením a štruktúrou, ktorá môže hrať pri prestupe tepla významnú rolu.



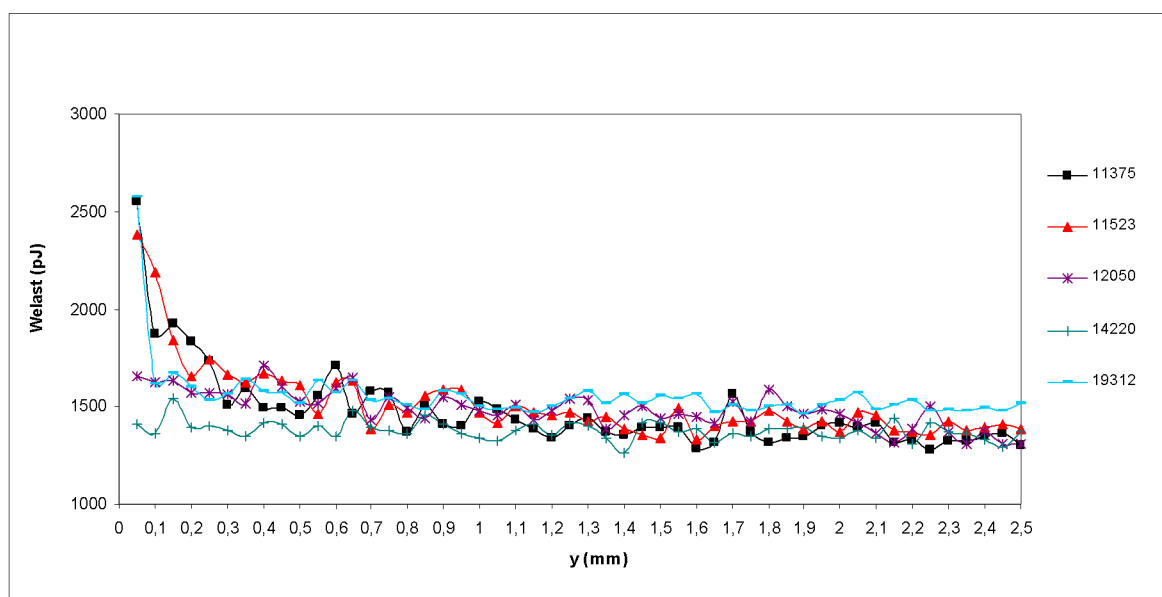
Obr. 77. Porovnanie elastického modulu E_{IT} všetkých vzoriek

U meraných vzoriek bol zaznamenaný nárast elastického modulu v mieste rezu. Najvyššia hodnota elastického modulu bola nameraná u ocele 12 050 a to 243,61 GPa, čo je spôsobené perlitickou štruktúrou. Výrazné zvýšenie môžeme pozorovať aj u ocele 11 523 (239,59 GPa) a 14 220 (237,46 GPa). U ocele 14 220 to bolo taktiež spôsobené perlitickou štruktúrou kdež to u ocele 11 523 to bolo spôsobené prítomnosťou nízkouhlíkového martenzitu a zbytkového austenitu. U týchto ocelí tiež vidíme jeho rýchly pokles. Najnižšia hodnota bola zistená u ocele 11 375 a to 217,88 GPa, kde bola štruktúra tvorená martenzitom a austenitom zbytkovým, pričom obsah uhlíku v martenzite bol nízky. Elastický modul má u všetkých meraných vzoriek klesajúci charakter. Rôzne namerané hodnoty sú spôsobené rozličným chemickým zložením materiálov.



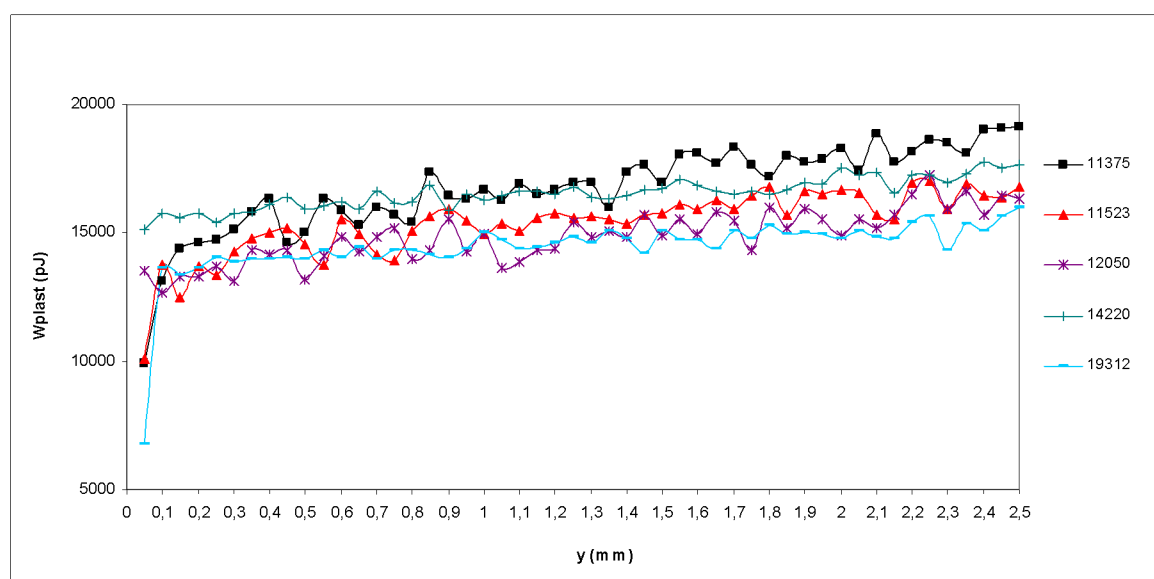
Obr. 78. Porovnanie vlačkového creepu C_{IT} všetkých vzoriek

Prítomnosť martenzitu s nízkym obsahom uhlíku a austenitu zbytkového spôsobil výrazný nárast creepu u ocele 11 523. Jeho hodnota dosahuje 4,7% . Taktiež je vidieť jeho prudký pokles do vzdialenosti 0,2 mm a po dosiahnutí tejto hĺbky sa pokles spomaľuje. U ocelí 11 375 a 12 050 môžeme pozorovať mierne zvýšenie hodnoty creepu v blízkosti miesta rezu, kde tepelné ovplyvnenie spôsobilo štruktúrne zmeny. U ocele 11 375 je to 2,61 % a u ocele 12 050 2,63%. U ocelí 14 220 a 19 312 nebol zaznamenaný výraznejší nárast creepu. Od hĺbky 0,2 mm je pokles creepu u všetkých ocelí takmer rovnaký čo spôsobuje perlitická štruktúra.



Obr. 79. Porovnanie elastickej práce vlačku W_{elast} všetkých vzoriek

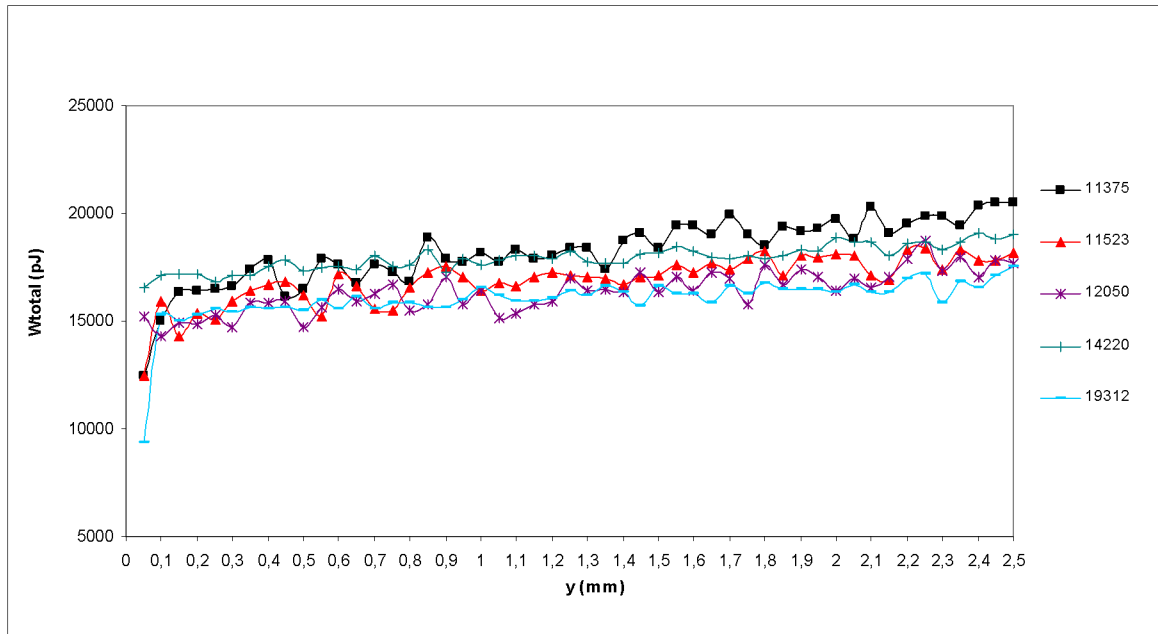
Najvyššia hodnota elastickej práce bola nameraná u ocelí 11 375 a 19 312. U ocele 11 375 dosiahla hodnotu 2551,49 pJ, čo je spôsobená prítomnosťou martenzitu a nízkym obsahom uhlíku a austenitu zbytkového. Tepelné ovplyvnenie spôsobilo štruktúrne zmeny len do malej hĺbky a preto do vzdialenosti 0,1 mm zaznamenávame jej rýchly pokles na hodnotu 1870,8 pJ. U ocele 19 312 bola štruktúra tvorená martenzitom a zbytkovým austenitom a maximálna elastická práca dosahovala 2573,05 pJ. Jej pokles bol taktiež veľmi rýchly a vo vzdialenosti 0,1 mm dosahovala hodnotu 1615,46 pJ. Výrazný nárast je možné vidieť aj pri oceli 11 523, kde hodnota elastickej práce dosahuje hranicu 2381,08 pJ pretože štruktúra je tvorená zbytkovým austenitom a nízkouhlíkovým martenzitom. Rýchly pokles pozorujeme do vzdialenosti 0,2 mm a to na hranicu 1654,4 pJ. U ocelí 12 050 a 14 220 tepelené ovplyvnenie nespôsobilo výrazné štruktúrne zmeny a hodnoty elastickej práce v porovnaní s ostatnými vzorkami sú nízke. Priebeh u všetkých meraných vzoriek je nepravidelný, čo môže byť spôsobené rozdielnym zložením a vlastnosťami jednotlivých materiálov.



Obr. 80. Porovnanie plastickej práce vtláčku $W_{plast.}$ všetkých vzoriek

Na obr.80. je znázornené porovnanie plastickej práce vtláčku všetkých meraných materiálov. Najnižšia hodnotu plastickej práce 6776,75 pJ bola nameraná u ocele 19 312 v mieste rezu, čo spôsobila prítomnosť martenzitu a austenitu zbytkového vo výslednej štruktúre. Nízka hodnota 9940,63 pJ bola zistená aj u ocele 11 375 a 10108,4 pJ u ocele 11 523. Tieto nízke hodnoty sú spôsobené vzniknutou štruktúrou, ktorú tvorí zbytkový austenit a martenzit s nízkym obsahom uhlíku. U ocelí 14 220 a 12 050 nebola zaznamenaná výrazná odchýl-

ka plastickej práce čo je spôsobené perlitickou štruktúrou.. Krivky všetkých meraných ocelí majú rastúcu charakteristiku.



Obr. 81. Porovnanie celkovej práce vtláčku W_{total} .. všetkých vzoriek

Ako je zrejmé z obr.81., najnižšia hodnota celkovej práce bola zistená u ocele 19 312 a to 9349,81 pJ. Táto nízka hodnota je spôsobená prítomnosťou martenzitu a zbytkového austenitu v štruktúre, ktorá vznikla v dôsledku tepelného pôsobenie. Nízke hodnoty boli zistené aj u ocelí 11 375 a 11 523. U ocele 11 375 dosiahla celková práca hodnotu 12492,11 pJ a u ocele 11 523 bola nameraná hodnota 12489,4 pJ. U ocelí 14 220 a 12 050 nebola zaznamenaná výrazná odchýlka plastickej práce, čo je spôsobené prítomnosťou perlitu vo výslednej štruktúre. Rozdielne hodnoty môžu byť spôsobené chemickým zložením a štruktúrou, ktorá môže hrať pri prestupe tepla významnú rolu.

ZÁVER

Predložená diplomová práca sa zaoberá výskumom ovplyvnenia povrchovej vrstvy kovov pri rezaní laserom. Skúmané vzorky boli vyrobené z piatich ocelí (11 375, 11 523, 12 050, 14 220 a 19 312). Následne boli vzorky materiálov zalisované a vyleštené na požadovanú kvalitu povrchu. Meranie prebiehalo na mikrotvrdometri CSM Instruments. Pri meraní bolo použité zaťaženie 50 mN a meranie bolo realizovaná 50-krát na každej vzorke. Namerané hodnoty boli vyhodnotené a graficky znázornené pomocou programu MS Excel.

Z nameraných výsledkov vyplynulo, že najvyššie tvrdosti bolo dosiahnuté u vzorky vyrobenej z oceli 19 312 a to 801,81 HV. Vysoké hodnoty tvrdosti boli spôsobené štruktúrou, ktorá vznikla po reznom procese. Štruktúra boli tvorená martenzitom a austenitom zbytkovým a vysoká tvrdosť bola spôsobená vysokým obsahom uhlíku, ktorá umožnil zakalenie povrchovej vrstvy pri rezaní laserom. Ovplyvnenie povrchovej vrstvy u tejto ocele bolo len 0,1 mm. Naopak najnižšia hodnota tvrdosti v mieste rezu bola namerané u ocele 14 220, kde bola zistená hodnota 247,34 HV. Odlišnosť bola zaznamenaná aj pri ovplyvnení povrchovej vrstvy pri jednotlivých typoch materiálov. Ocele s výraznou mierou nárastu tvrdosti boli ovplyvnené do malej vzdialenosti od miesta rezu (19 312). Ocele s nižšou tvrdosťou v mieste rezu boli ovplyvnené do väčšej hĺbky (11 375, 11 523).

Pri posudzovaní mikrotuhosti reprezentovanej elastickým vtláčkovým modulom povrchovej vrstvy bolo zistené, že najvyššia hodnota bola zistená u ocelí 14 220 a 12 050. Naopak najnižšej hodnoty bolo dosiahnuté u oceli 11 375. Odlišné chovanie jednotlivých vzoriek bolo spôsobené rozličným chemickým zložením a rozdielnou štruktúrou po rezaní laserom.

Pri posudzovaní odolnosti materiálu voči konštantnému zaťaženiu (creep) bolo zistené, že najvyššia hodnota bola nameraná u vzorky vyrobenej z ocele 11 523. Naopak najnižšie hodnoty boli zistené u ocelí 14 220 a 19 312. Odlišné chovanie jednotlivých materiálov bolo ovplyvnené rozličným chemickým zložením a rozdielnou štruktúrou, ktorá vznikla po rezaní laserom.

Pri porovnaní elastickej práce vtláčku bolo zistené, že najvyššie hodnoty dosahujú ocele 11 375 a 19 312. Pomerne vysoká hodnoty boli namerané aj u ocele 11 523. Najnižšie hodnoty boli zistené u vzorky vyrobenej z ocele 14 220. Nepravidelný priebeh je spôsobený rozdielnym chemickým zložením a rozličnou štruktúrou jednotlivých ocelí.

Pri posudzovaní plastickej práce vtlačku bolo zistené, že najnižšie hodnoty boli namerané u ocele 19 312. Naopak najvyššia hodnota plastickej práce vtlačku bola nameraná u ocele 14 220. Rozdielne chemické zloženie a štruktúra spôsobili odlišnosti v chovaní jednotlivých materiálov.

Z nameraných výsledkov vyplývajú zaujímavé výsledky z hľadiska ďalšieho spracovania použitých materiálov. Hlavne pre rezné procesy a výrobu závitov je žiaduce predvídať chovanie povrchových vrstiev obrábaných materiálov v návaznosti na správnu voľbu rezných nástrojov a podmienok. Práca bude ďalej rozvíjaná a rozšírená o ďalšie metódy rezania, ktoré sa v priemyselnej sfére bežne používajú napr. plazma, plameň a pod.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] TILLOVÁ,E.-BELAN,J.,2010: *Skúšky tvrdosti, predľad základných metód merania tvrdosti*. Považská Bystrica
- [2] VELES,P., 1985: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, Alfa Bratislava
- [3] ZÁBAVNÍK,V.-BURŠÁK,M.,2009: *Materiál, tepelné spracovanie, kontrola kvality*, Tlač-Emilena, ISBN 9788055301396
- [4] IŽDINSKÁ, Z., 2006, Skúšky tvrdosti. MATNET SLOVAKIA. *Strojnícka fakulta STU: Katedra materiálov a technológií* [online]. [cit. 2012-10-19]. Dostupné z: <<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=531> >
- [6] METROTEST, s.r.o. Kladno., 2010, [online]. [cit. 2012-10-19]. Dostupné z: <http://www.metrotest.cz/files/zkousky_tvrdosti.pdf >
- [7] GORDON ENGLAND, 2008, [online].[cit 2012-10-20]. Dostupné z: <<http://www.gordonengland.co.uk/hardness/microhardness.htm>>
- [8] MIČIETOVÁ, Anna., 2007, *Nekonvenčné metódy obrábania I - učebné texty I*. Prvé. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-969391-8-3.
- [9] PLŠKOVÁ, Markéta.,2011, *Stanovení pracovních podmínek na laseru ILS 3NM*. Zlín. bakalářská práce (Bc.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíne. Fakulta technologická
- [10] FRYŠ,J. QUIDO, 2005 ,[online]. [cit 2013-01-01]. Dostupné z: <<http://www.quido.cz>>
- [11] SKOČOVSKÝ,P.-BOKŮVKA,O.-KONEČNÁ,R.-TILLOVÁ,E., 2001: *Náuka o materiály pre obory strojnícke*, EDIS Žilina
- [13] TEPELNÉ SPRACOVANIE KOVOV, 2009 ,[online]. [cit. 2012-04-11]. Dostupné z: <<http://www.htsbb.eu/de/kalennie.pdf> >
- [14] ISO 6506-1, 2005,*Kovové materiály – Brinellova skúška tvrdosti, Časť 1: Skúšobná metóda*, Brusel: CEN- Európsky výbor pre normalizáciu, ICS 77.040.10
- [15] ISO 6508-1, 2005, *Kovové materiály – Rockwellova skúška tvrdosti, Časť 1: Skúšobná metóda (stupnice A,B,C,D,E,F,G,H,K,N,T*, Brusel: CEN- Európsky výbor pre normalizáciu, ICS 77.040.10

- [16] ISO 6507-1, 2006, *Kovové materiály- Skúška tvrdosti podľa Vickersa, Časť 1: Skúšobná metóda*, Brusel: CEN- Európsky výbor pre normalizáciu, ICS 77.040.01
- [17] MATULA, Radek., 2011, *Mikrotvrdosť kovov*. Zlín. diplomová práca (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíne. Fakulta technologická
- [18] DOLEŽAL, Pavel a Bohumil PACAL., 2005, *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálu*. In: [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/hmsm/Mikrotvrdost.pdf>
- [18] STRUERS., 2012 *Historie měření mikrotvrdosti* [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=0&main_id=0&sub_id=0&doc_id=470&admin_language=19&fb_source=message
- [19] UNIVERSITY OF NEBRASKA-LINCOLN., 2010, College of Engineering. *Biomechanics, Biomaterials and Biomedicine Instrumentation Facility* [online]. [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://www.engineering.unl.edu/research/bm3/Nanoindenter.shtml>
- [20] SAVKOVA, Jarmila., 2010, *Experimental approaches to contact mechanics*. [online]. [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: http://mms2.ensmp.fr/tribo_paris/lectures/Exp_contact_mechanics.pdf
- [21] FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI. *Oddelení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [22] LAPŠANSKÁ, Hana., *Laserové technologie v praxi*. In: Portál moderní fyziky [online]. [cit. 2012-11-03]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [23] VISELKA, Ján., 2010 *Vliv technologie dělení materiálu na tvrdost v místě řezu*. Zlín., diplomová práca (Ing.). Univerzita Tomáše Bati ve Zlíne. Fakulta technologická
- [24] Fakulta špeciálnej techniky TnUAD v Trenčíne., 2008 Na stiahnutie: *Študijne materiály* [online]. [cit. 2012-11-17]. Dostupné z: <http://fst.tnuni.sk/?q=sk/clanok/preuchadzacov/fakulta/katedry/kstam/na-stiahnutie>

- [25] MORAVČÍK, Roman, Marián HAZLINGER, Mária HUDÁKOVÁ, Maroš MARTINKOVIČ a Roman ČIČKA., 2010, STU V BRATISLAVE. *NÁUKA O MATERIÁLOCH I*. Prvé. Trnava: AlumniPress. ISBN 978-80-8096-123-7.
- [26] Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni: Oddelení povrchového inženýrství. In: *Rozpad austenitu: Strojnírenské materiály* [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tep_zprac.pdf
- [27] Buehler, 2013.: *Manufacturer of Material Preparation & Analysis Equipment*. [online]. [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.buehler.com>
- [28] Bohdan Bolzano, 2004.: *Přehled vlastností oceli S235JR* [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprir/tycovaocel/EN10025/S235JRG2/>
- [29] CZ FERRO - STEEL, spol. s r.o., 2011. *ČSN 11375 – konstrukční ocel* [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11375.pdf>
- [30] LEINVEBER, Jan., , 2006, *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: ALBRA, xiv, 914 s. ISBN 80-736-1033-7.
- [31] CZ FERRO - STEEL, spol. s r.o., 2011. *ČSN 12050 – ocel k zušlechťování* [online]. [cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-12050.pdf>
- [32] JKZ Bučovice, a.s., 2010.[online].[cit. 2013-03-25]. Dostupné z: <http://www.jkz.cz/produkty>
- [33] DUŠEK, Jiří., 2008 . *Tvrдость, mikrotvrдость, nanotvrдость - čisté kovy měřené metodou DSI* [online]. [cit. 2013-04-16]. Disertační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Dostupné z: <http://theses.cz/id/j7r7r3/>.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

F	Celkové zaťaženie [N]
h	Hĺbka vtlačku [mm]
D	Priemer guľôčky [mm]
d	Priemer vtlačku príp. dĺžka uhlopriečky [mm]
S	Plocha vtlačku [mm ²]
t	Čas [s]
d ₁	Dĺžka uhlopriečky [mm]
d ₂	Dĺžka uhlopriečky [mm]
d _{1,2}	Aritmetický priemer uhlopriečok d ₁ a d ₂ [mm]
m	Hmotnosť [kg]
F ₀	Predbežné zaťaženie [kg]
F ₁	Prídavné zaťaženie [kg]
W	Deformačná práca [J]
H _{IT}	Vtlačková tvrdosť [MPa]
A _p	Priemet kontaktnej plochy indentoru [mm]
h _p	Kontaktná hĺbka vtlačku [mm]
E _{IT}	Vtlačkový elastický modul [GPa]
E _r	Redukovaný modul [GPa]
r	Polomer [mm]
E	Youngov modul [MPa]
v	Poissonovo číslo
C _{IT}	Vtlačkový creep [%]
y	Vzdialenosť od miesta rezu [mm]

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr.1. Princíp skúšky podľa Brinella.....	14
Obr.2. Priebeh skúšobného zaťaženia.....	17
Obr.3. Schéma meracieho zariadenia- Brinell	17
Obr.4. Princíp skúšky podľa Rockwella	18
Obr.5.Priebeh skúšobného zaťaženia.....	20
Obr.6. Schéma meracieho zariadenia- Rockwell	21
Obr.7. Diamantový ihlan Vickers	22
Obr.8. Meranie vtlačkov- Vickers	23
Obr.9. Schéma tvrdomeru Vickers	26
Obr.10. Princíp skúšky.....	27
Obr.11. Vtlačok po skúške Vickers.....	28
Obr.12. Vnikacie teliesko Knoop	29
Obr.13. Tvar vtlačku pri Knoopovej skúške	29
Obr.14. Vnikacie teliesko Berkovich.....	31
Obr.15. Vtlačok po skúške Berkovich.....	32
Obr.16.Vnikacie teliesko Grodzinski.....	32
Obr.17. Schéma mikrotvrdomeru Hanemann.....	34
Obr. 18. Atóm čistého železa	35
Obr. 19. Modifikácie železa	35
Obr.20. Štruktúry kovov.....	37
Obr.21. Diagram Fe-Fe ₃ C	39
Obr. 22.Oblasť peritektickej premeny.....	40
Obr. 23.Oblasť eutektickej premeny.....	40
Obr. 24.Oblasť eutektoidnej premeny.....	41
Obr. 25. Diagram Fe-C	42
Obr.26. IRA diagram podeutektickej, nadeutektickej a eutektickej ocele.....	43
Obr.27. ARA diagram.....	44
Obr.28. Oblasť perlitickej premeny	45
Obr.29. Mechanizmus tvorby bainitu.....	45
Obr.30. Oblasť bainitickej premeny	46
Obr.31. Princíp laserového zariadenia	47

Obr.32. Schéma laserového zariadenia	51
Obr.33. Konštrukcia Nd:YAG laseru	52
Obr.34. Konštrukcia polovodičového laseru	53
Obr.35. Konštrukcia He-Ne laseru	53
Obr.36. Konštrukcia CO ₂ laseru	54
Obr.37. Buehler SimpliMet 1000	61
Obr.38. Buehler AutoMet 250	61
Obr. 39. Mikrotvrdomer CSM Instruments	62
Obr. 40. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 11 375	65
Obr. 41. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre oceľ 11 375	65
Obr. 42. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 11 375	66
Obr. 43. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 11 375	66
Obr. 44. Elastická práca vtlačku $W_{elast.}$ pre oceľ 11 375	67
Obr. 45. Plastická práca vtlačku $W_{plast.}$ pre oceľ 11 375	67
Obr. 46. Celková práca vtlačku $W_{total.}$ pre oceľ 11 375	68
Obr. 47. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 11 523	68
Obr. 48. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre oceľ 11 523	69
Obr. 49. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 11 523	69
Obr. 50. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 11 523	70
Obr. 51. Elastická práca vtlačku $W_{elast.}$ pre oceľ 11 523	70
Obr. 52. Plastická práca vtlačku $W_{plast.}$ pre oceľ 11 523	71
Obr. 53. Celková práca vtlačku $W_{total.}$ pre oceľ 11 523	71
Obr. 54. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 12 050	72
Obr. 55. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre oceľ 12 050	72
Obr. 56. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 12 050	73
Obr. 57. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 12 050	73
Obr. 58. Elastická práca vtlačku $W_{elast.}$ pre oceľ 12 050	74
Obr. 59. Plastická práca vtlačku $W_{plast.}$ pre oceľ 12 050	74
Obr. 60. Celková práca vtlačku $W_{total.}$ pre oceľ 12 050	75
Obr. 61. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 14 220	75
Obr. 62. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre oceľ 14 220	76
Obr. 63. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 14 220	76

Obr. 64. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 14 220.....	77
Obr. 65. Elastická práca vtlačku $W_{elast.}$ pre oceľ 14 220.....	77
Obr. 66. Plastická práca vtlačku $W_{plast.}$ pre oceľ 14 220.....	78
Obr. 67. Celková práca vtlačku $W_{total.}$ pre oceľ 14 220.....	78
Obr. 68. Vtlačková tvrdosť H_{IT} pre oceľ 19 312.....	79
Obr. 69. Tvrdosť Vickers HV_{IT} pre oceľ 19 312.....	79
Obr. 70. Elastický modul E_{IT} pre oceľ 19 312.....	80
Obr. 71. Vtlačkový creep C_{IT} pre oceľ 19 312.....	80
Obr. 72. Elastická práca vtlačku $W_{elast.}$ pre oceľ 19 312.....	81
Obr. 73. Plastická práca vtlačku $W_{plast.}$ pre oceľ 19 312.....	81
Obr. 74. Celková práca vtlačku $W_{total.}$ pre oceľ 19 312.....	82
Obr. 75. Porovnanie vtlačkovej tvrdosti H_{IT} všetkých vzoriek.....	83
Obr. 76. Porovnanie Vickersovej tvrdosti HV_{IT} všetkých vzoriek.....	84
Obr. 77. Porovnanie elastického modulu E_{IT} všetkých vzoriek.....	85
Obr. 78. Porovnanie vtlačkového creepu C_{IT} všetkých vzoriek.....	86
Obr. 79. Porovnanie elastickej práce vtlačku $W_{elast.}$ všetkých vzoriek.....	86
Obr. 80. Porovnanie plastickej práce vtlačku $W_{plast.}$ všetkých vzoriek.....	87
Obr. 81. Porovnanie celkovej práce vtlačku $W_{total.}$ všetkých vzoriek.....	88

ZOZNAM TABULIEK

Tab.1. Skúšobné zaťaženia pre Brinellovu metódu	15
Tab.2. Hodnoty pomeru zaťaženia a priemeru guľôčky pre rôzne materiály- Brinell	16
Tab.3. Stupnice tvrdosti pre metódu podľa Rockwella	19
Tab.4. Spôsob výpočtu Rackwellovej tvrdosti.....	20
Tab.5. Skúšky podľa Vickersa	24
Tab.6. Skúšobné zaťaženia pre Vickersovu metódu	24
Tab.7. Skúšobné zaťaženia pre Knoopovu metódu.....	30
Tab.8. Skúšobné zaťaženia pre Hanemannovu metódu	34
Tab.9. Rozdelenie laserov podľa aktívneho prostredia a oblasti použitia.....	50
Tab.10. Chemické zloženie ocele 11 375 v hmot. %.....	57
Tab.11. Tepelné spracovanie ocele 11 523	58
Tab.12. Chemické zloženie ocele 11 523 v hmot. %.....	58
Tab.13. Tepelné spracovanie ocele 12 050	58
Tab.14. Chemické zloženie ocele 12 050 v hmot. %.....	58
Tab.15. Tepelné spracovanie ocele 14 220	59
Tab.16. Chemické zloženie ocele 14 220 v hmot. %.....	59
Tab.17. Tepelné spracovanie ocele 19 312	59
Tab.18. Chemické zloženie ocele 19 312 v hmot. %.....	60
Tab.19. Parametre použitého laseru	60