

Vplyv technológie delenia materiálu na tvrdosť v mieste rezu

Bc. Ján Viselka

Diplomová práca
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ján VISELKA**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv technologie dělení materiálu na tvrdost v místě řezu**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava vzorků pro zkoušky mikrotvrdomosti
3. Provedení zkoušek mikrotvrdomosti
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. David Maňas, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

19. února 2010

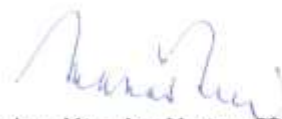
Termín odevzdání diplomové práce:

19. května 2010

Ve Zlíně dne 19. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce požít na své náklady výpis, 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 výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práca rieši problematiku tepelného ovplyvnenia ocelí pri delení materiálu laserom. V priebehu delenia materiálu laserom dochádza k jeho intenzívnemu tepelnému ovplyvneniu a tým aj ovplyvneniu tvrdosti povrchovej vrstvy. V teoretickej časti je popísané základné rozdelenie ocelí, spôsoby delenia materiálu, meranie tvrdosti a mikrotvrdosti. V praktickej časti sú štatisticky spracované a následne vyhodnotené namerané hodnoty. Vplyv tepelného žiarenia na zmenu tvrdosti zadaných materiálov v mieste rezu je skúmaný pomocou merania mikrotvrdosti a to metódou podľa Vickersa.

Kľúčové slová: Rozdelenie ocelí, Metódy delenia materiálu, Tvrdosť, Mikrotvrdosť, Vickers, Knoop,

ABSTRACT

This thesis studies issues related to thermal influence of steel caused by splitting the material by laser. In the process of splitting the material by laser, intensive thermal influences occur, affecting hardness of the surface layer. In the theoretical part, main classification of steels, different methods of material splitting and methods of measurement of hardness and microhardness are described. In the practical part of the paper, measured data are statistically processed and evaluated. The effect of thermal radiation on the change of hardness on section cuts of studied materials is examined through measurement of microhardness according to the Vickers method.

Keywords: Classification of steels, Methods of material splitting, Hardness, Microhardness, Vickers, Knoop

PodĎakovanie:

Na úvod tejto diplomovej práce by som sa chcel poĎakovať vedúcemu svojej diplomovej práce Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za pomoc, odborné vedenie, ochotne poskytnuté rady a čas, ktorý mi venoval pri vypracovaní tejto diplomovej práce. Taktiež sa chcem poĎakovať aj ostatným ľuďom, ktorí mi pri vypracovaní mojej diplomovej práce pomohli.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronicky nahratá do IS/STAG sú totožné. Taktiež prehlasujem, že som na diplomovej práci pracoval samostatne a použitú literatúru som citoval. Súhlasím s tým, že s výsledkami mojej práce môže byť naložené podľa uváženia vedúceho diplomovej práce a riaditeľa ústavu. V prípade publikácie výsledkov, ak je to uvedené na základe licenčnej zmluvy, budem uvedený ako spoluautor.

V Zlíne:

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČASŤ	12
1 ZÁKLADNÉ ROZDELENIE OCELÍ	13
1.1 ROZDELENIE OCELÍ PODĽA CHEMICKÉHO ZLOŽENIA	13
1.2 ROZDELENIE OCELÍ PODĽA HlavnÝCH SKUPÍN AKOSTI	14
1.2.1 Hlavné skupiny akosti nelegovaných ocelí	14
1.2.2 Hlavné skupiny akosti legovaných ocelí	14
1.3 OZNAČOVANIE OCELÍ	15
1.3.1 Číselné označovanie ocelí	15
1.3.2 Farebné označovanie ocelí	17
1.4 TRIEDY OCELÍ	17
1.4.1 Oceľ triedy 11	17
1.4.2 Oceľ triedy 12	18
1.4.3 Oceľ triedy 14	19
2 SPÔSOBY DELENIA MATERIÁLU	20
2.1 ZÁKLADY OBRÁBANIA (ZÁKLADNÉ POJMY).....	20
2.2 TEPLA A TEPLOTA VZNIKAJÚCA PRI OBRÁBANÍ.....	21
2.3 DELENIE MATERIÁLU REZANÍM	22
2.4 DELENIE MATERIÁLU ROZBRUSOVANÍM	27
2.5 DELENIE MATERIÁLU STRIHANÍM	27
2.6 DELENIE MATERIÁLU VODNÝM LÚČOM	29
2.7 DELENIE MATERIÁLU PLAZMOU.....	31
2.8 DELENIE MATERIÁLU LASEROM.....	35
3 MERANIE TVRDOSTI A MIKROTVRDOSTI	38
3.1 MERANIE TVRDOSTI	38
3.1.1 Skúšky tvrdosti podľa Brinella.....	38
3.1.2 Skúšky tvrdosti podľa Rockwella	39
3.1.3 Skúšky tvrdosti podľa Vickersa	40
3.2 MERANIE MIKROTVRDOSTI	41
3.2.1 Meranie mikrotvrdoosti podľa Vickersa	42
3.2.2 Meranie mikrotvrdoosti podľa Knoopu.....	43
3.2.3 Meranie mikrotvrdoosti podľa Meincka a Attingerga	45
3.2.4 Meranie mikrotvrdoosti podľa Chruščova a Berkoviča	46
3.2.5 Meranie mikrotvrdoosti na dvojkuželi	46
II PRAKTICKÁ ČASŤ	48
4 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE	49
5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	50
5.1 PRÍSTROJE POUŽITÉ PRI PRÍPRAVE VZORIEK A MERANÍ MIKROTVRDOSTI.....	50
5.1.1 Popis prístroja na delenie materiálov laserom.....	50
5.1.2 Popis prístroja na leštenie vzoriek.....	51
5.1.3 Popis prístroja na meranie mikrotvrdoosti	52

5.2	SKÚŠOBNÉ VZORKY	53
5.2.1	Tvar, rozmery a triedy ocelí skúšobných vzoriek	53
5.2.2	Materiály použitých vzoriek	55
5.3	PREMENA ŠTRUKTÚRY POVRCHU PRI TEPELNOM OVPLYVNEŇÍ NA PRÍKLADE JEDNÉHO VZORKU OCELE TRIEDY 12 050 (VZORKA 2)	55
5.4	POSTUP MERANIA	58
5.4.1	Príprava vzoriek	58
5.4.2	Meranie mikrotvrdości	59
5.4.3	Vyhodnotenie	61
6	VYHODNOTENIE NAMERANÝCH VELIČÍN	62
6.1	VZORKA 1 (MATERIÁL 14 260)	62
6.1.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 14 260	62
6.1.2	Grafické vyhodnotenie	62
6.1.3	Záver a diskusia výsledkov	62
6.2	VZORKA 2 (MATERIÁL 12 050)	63
6.2.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 12 050	63
6.2.2	Grafické vyhodnotenie	64
6.2.3	Záver a diskusia výsledkov	64
6.3	VZORKA 3 (MATERIÁL 11 523)	65
6.3.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 523	65
6.3.2	Grafické vyhodnotenie	65
6.3.3	Záver a diskusia výsledkov	65
6.4	VZORKA 4 (MATERIÁL 11 373)	66
6.4.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373	66
6.4.2	Grafické vyhodnotenie	67
6.4.3	Záver a diskusia výsledkov	67
6.5	VZORKA 5 (MATERIÁL 14 260)	68
6.5.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 14 260	68
6.5.2	Grafické vyhodnotenie	68
6.5.3	Záver a diskusia výsledkov	68
6.6	VZORKA 6 (MATERIÁL 11 373)	69
6.6.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373	69
6.6.2	Grafické vyhodnotenie	70
6.6.3	Záver a diskusia výsledkov	70
6.7	VZORKA 7 (MATERIÁL 11 373)	71
6.7.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373	71
6.7.2	Grafické vyhodnotenie	71
6.7.3	Záver a diskusia výsledkov	71
6.8	VZORKA 8 (MATERIÁL 12 050)	72
6.8.1	Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 12 050	72
6.8.2	Grafické vyhodnotenie	73
6.8.3	Záver a diskusia výsledkov	73
7	ZÁVER	74
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	76
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	77

ZOZNAM OBRÁZKOV	79
ZOZNAM TABULIEK	82

ÚVOD

V dnešnej dobe sa používajú okrem klasických metód stále dokonalejšie a účinnéjšie metódy delenia materiálov. S vývojom modernej elektronickej technológie uplatnenej i pri samotnom obrábaní a obrábacích technológiách sa tiež vyvíjajú a vyrábajú stále nové generácie rôznych nových produktov. Rozvoj týchto produktov priamo zasahuje i do výrobných procesov. V súčasnosti sú na výrobky kladené čoraz prísnejšie podmienky na kvalitu, a to v rôznych oblastiach strojárenského priemyslu. Splňať tieto podmienky a obstať v tvrdej konkurencii nie je jednoduché.

Výber a delenie materiálu sú jedny z prvých operácií, ktoré je nutné previesť pri výrobe súčastí. U jednotlivých spôsobov delenia materiálov sa používajú rôzne nástroje. Pri rezaní dochádza rezným nástrojom priamo k ovplyvňovaniu povrchovej vrstvy obrábaného materiálu, a to či už mechanicky alebo tepelne. Výnimkou nie je ani rezanie laserom.

V tejto diplomovej práci sa priamo zaoberám tepelným ovplyvnením vrstvy materiálov, ktoré boli rezané laserom a následne vyhodnocujem hrúbku ovplyvnenej vrstvy zadaných materiálov. Toto ovplyvnenie je skúmané metódou merania mikrotvrdoosti, konkrétne metódou podľa Vickersa. Táto diplomová práca sa zaoberá základným rozdelením použitých ocelí, štúdiom jednotlivých metód delenia materiálov ako i metódami merania tvrdosti a mikrotvrdoosti.

Všetky metódy delenia materiálov nás nútia skúmať ich vplyv na opracovaný materiál, pochopenie samotných metód a vyhodnocovanie tohto ovplyvnenia. S týmito skúsenosťami tak môžeme zaistiť čo najlepšiu kvalitu polotovarov a určiť najvýhodnejší spôsob delenia pre konkrétny materiál.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 ZÁKLADNÉ ROZDELENIE OCELÍ

Pre svoje mechanické a technologické vlastnosti je oceľ dodnes najdôležitejším technickým materiálom. Jej všestrannosť ako materiálu pre stavbu strojov, zariadení, nástrojov a pod. vedie k výrobe oceli o najrôznejších vlastnostiach. Doterajšie ČSN stanovujúce klasifikáciu, zloženie a vlastnosti ocelí sú prepracovávané a upravované z hľadiska medzinárodných a európskych noriem (ISO a EN). Zmyslom toho je dosiahnuť hlavne podstatného zlepšenia stavu noriem na základe skúseností zhromaždených v minulosti a najnovšieho vývoja v hutnom a oceliarskom priemysle, prispôsobenie noriem ČSN normám ISO a EN. Ocele k tváreniu sú materiály, ktorých hmotnostný podiel železa je väčší než ktoréhokoľvek iného prvku a ktoré všeobecne majú obsah uhlíku $C < 2\%$ a obsahujú i iné prvky. [1]

1.1 Rozdelenie ocelí podľa chemického zloženia

Ocele nelegované – Určujúce obsahy jednotlivých prvkov nedosahujú medzných obsahov podľa tab. 1.

Ocele legované – Obsahy jednotlivých prvkov, minimálne jedného, dosahujú alebo prekračujú medzné obsahy podľa tab. 1. [1]

Tab .1. Medzné obsahy legovacích prvkov pre rozdelenie ocelí na legované a nelegované

Prvok		Medzný obsah	Prvok		Medzný obsah
Al	hliník	0,10	Ni	nikel	0,30
B	bór	0,0008	Pb	olovo	0,40
Bi	bizmut	0,10	Se	selén	0,10
Co	kobalt	0,10	Si	kremík	0,50
Cr	chróm	0,30	Te	telúr	0,10
Cu	meď	0,40	Ti	titán	0,05
La	lanthanidy	0,05	V	vanád	0,10
Mn	mangán	1,65	W	volfrám	0,10
Mo	molybdén	0,08	Zr	zirkónium	0,05
Nb	niob	0,06	ostatné vždy		0,05

1.2 Rozdelenie ocelí podľa hlavných skupín akosti

1.2.1 Hlavné skupiny akosti nelegovaných ocelí

Ocele obvyklých akostí – Sú to tie druhy nelegovaných ocelí, kde požiadavky na akosť nevyžadujú zvláštne opatrenia pri výrobe, musia však spĺňať tieto podmienky:

- a) nie sú určené pre tepelné spracovanie,
- b) požiadavky, ktoré je nutné dodržať pre nespracovaný alebo normalizačný žihavý stav,
- c) nie sú predpísané ďalšie zvláštne kvalifikačné charakteristiky,
- d) s výnimkou obsahu Si a Mn nie sú predpísané žiadne ďalšie obsahy legovacích prvkov.

Nelegované akostné ocele – Sú to druhy nelegovaných ocelí, pre ktoré všeobecne nie je predpísaná rovnomerná reakcia na tepelné spracovanie ani požiadavky na stupeň čistoty. Sú však na ne kladené prísnejšie alebo dodatočné požiadavky než na ocele obvyklých akostí, takže výroba ocelí vyžaduje väčšiu pozornosť.

Nelegované ušľachtilé ocele – Sú to druhy ocelí, ktoré vykazujú na rozdiel od akostných ocelí vyšší stupeň čistoty. Sú určené hlavne pre zušľachtovanie alebo povrchové kalenie. Majú rovnomernejšiu reakciu na tepelné spracovanie a presné chemické zloženie. Týchto vlastností je dosiahnuté zvláštnymi podmienkami výroby a skúšaniami. Patria sem:

- a) ocele s požiadavkami na nárazovú prácu v zušľachtenom stave,
- b) ocele s požiadavkami na hĺbku zakalenej vrstvy alebo povrchovú tvrdosť,
- c) ocele s požiadavkami na obzvlášť nízke obsahy nekovových častí,
- d) ocele s predpísaným max. obsahom fosforu a s min. obsahom síry (napr. drôty pre vysoko namáhané pružiny, prídavné zvaracie drôty, drôty na kordy pneumatík atď.),
- e) ocele s hodnotami nárazovej práce min. $KV > 27 \text{ J}$ pri $-50 \text{ }^\circ\text{C}$,
- f) ocele pre jadrové reaktory,
- g) ocele s predpísanou hodnotou elektrickej vodivosti,
- h) feriticko – perlitické ocele s predpísaným obsahom uhlíku,
- i) ocele pre predpínaciu výstuž do betónu. [1]

1.2.2 Hlavné skupiny akosti legovaných ocelí

Legované akostné ocele – Ide o ocele určené pre podobné účely ako nelegované akostné ocele. Aby ale vyhovovali zvláštnym podmienkam použitia, obsahujú legovacie prvky

v obsahoch, ktoré z nich ďalej robia legované ocele. Nie sú všeobecne určené pre zušľachťovanie alebo povrchové kalenie. Patria sem:

- a) zvarateľné jemnozrnné konštrukčné ocele pre oceľové konštrukcie vrátane tlakových nádob a potrubí,
- b) ocele legované iba kremíkom alebo kremíkom a hliníkom so zvláštnymi požiadavkami na magnetické a elektrické vlastnosti,
- c) ocele určené na výrobu koľajníc,
- d) ocele pre ploché výrobky valcované za tepla alebo za studena, ktoré sú určené pre náročnejšie tvárenie za studena a legované jednotlivo alebo v kombinácií bór, niob, titan, vanád alebo zirkón,
- e) ocele legované iba meďou. [1]

Legované ušľachtilé ocele – Ide o ocele, u ktorých je dosahované požadovaných spracovateľských a úžitkových vlastností. Patria sem hlavne nehrdzavejúce ocele, žiaruvzdorné a žiaropevné ocele, ocele na valivé ložiská, nástrojové ocele, ocele pre oceľové konštrukcie a pre stavbu strojov, ocele so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami a iné. Rozdeľujeme ich na nasledovné skupiny:

- a) nehrdzavejúce ocele s obsahom uhlíku $C \leq 1,20 \%$ a obsahom chrómu $Cr \geq 10,5 \%$.
Podľa obsahu niklu $Ni < 2,5 \%$ alebo $Ni \geq 2,5 \%$,
- b) rýchlorezné ocele so stanoveným obsahom $C \geq 0,6 \%$ a $Cr = (3 \text{ až } 6) \%$,
- c) ostatné legované ušľachtilé ocele. [1]

1.3 Označovanie ocelí

Ocele sú podľa normy označované ako aj číselne, tak aj farebne.

1.3.1 Číselné označovanie ocelí

Číselné označovanie ocelí na tvárenie sa skladá zo základnej číselnej značky a spravidla ešte z doplnkových číslíc (tab. 2). Uvádza sa aspoň prvá doplnková číslica. Základná číselná značka oceli je päťmiestne číslo. Je to označenie základného materiálu.

Prvá číslica – V základnej päťmiestnej číselnej značke je 1 (jednotka) a vyjadruje, že ide o oceľ na tvárenie.

Druhá číslica – Označuje v spojení s prvou číslicou triedu akosti ocele.

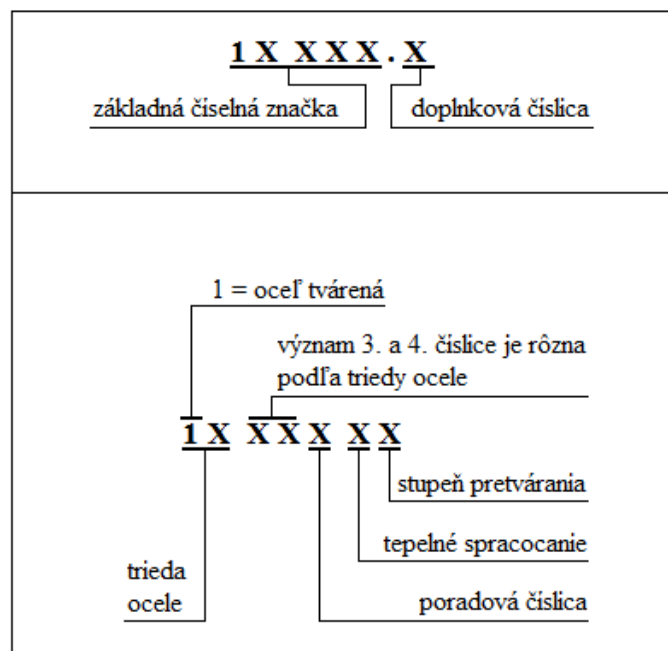
Tretia a štvrtá číslica – Význam je rôzny podľa triedy ocele.

Piata číslica – Má poradový význam.

Číslo normy akosti – Vytvára číslo šesťmiestne. Vytvorí sa tým, že sa predradí k základnej číselnej značke oceli číslica 4 (napr. 10 370 => ČSN 41 0370).

Doplnkové číslice – Sú oddelené od základnej číselnej značky bodkou. Prvá doplnková číslica vyjadruje konečný stav ocele, tj. druh tepelného spracovania (tab. 3). Druhy tepelného spracovania sa uvádzajú v materiálových listoch. Druhá doplnková číslica vyjadruje konečný stupeň pretvárania u oceľových plechov a pásov. [1]

Tab. 2. Číselné označenie ocelí



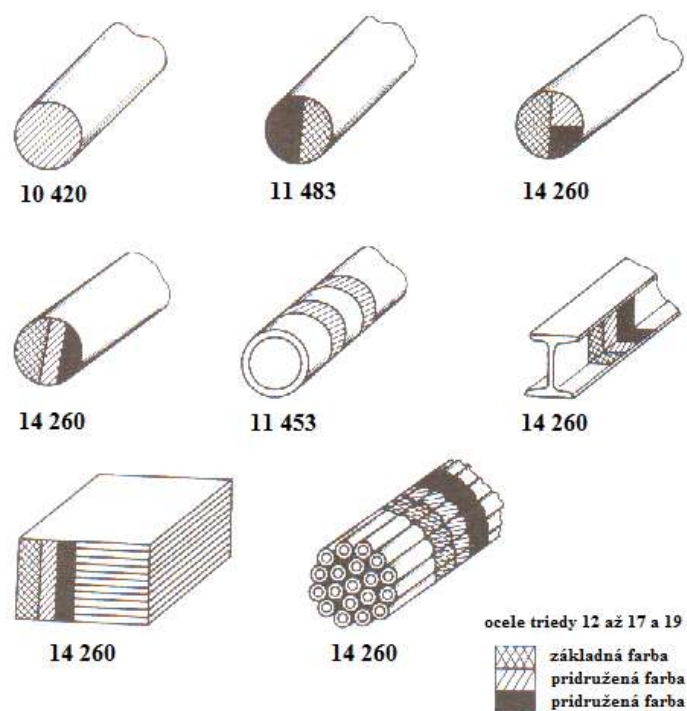
Tab. 3. Medzné obsahy legovacích prvkov pre rozdelenie ocelí na legované a nelegované

Prvá doplnková číslica	Konečný stav oceli (druh výsledného tepelného spracovania)
1X XXX.0	tepelne nespracovaný
1X XXX.1	normalizačné žíhanie
1X XXX.2	žíhanie (s uvedením druhu žíhania)
1X XXX.3	žíhanie na mäkko
1X XXX.4	kalený, kalený alebo nízko popúšťaný pri nízkych teplotách
1X XXX.5	normalizačné žíhanie a popúšťanie
1X XXX.6	zušľachtený na dolnú pevnosť obvyklú u príslušnej ocele
1X XXX.7	zušľachtený na strednú pevnosť obvyklú u príslušnej ocele
1X XXX.8	zušľachtený na hornú pevnosť obvyklú u príslušnej ocele
1X XXX.9	stavy po tepelnom spracovaní, ktoré nemožno označiť číslicami 1 až 8

1.3.2 Farebné označovanie ocelí

Normalizované hutné výrobky z ocelí tried 10 až 19 sa označujú jedným až tromi farebnými pruhmi. Norma rozoznáva dva spôsoby označovania, a to pre ocele triedy 10 a 11 a pre ocele triedy 12 až 17 a 19. U ocelí triedy 12 až 17 a 19 sú použité tri farebné odtiene. Každá trieda má potom svoj základný odtieň rovnaký pre celú triedu. Jednotlivé druhy ocelí tej istej triedy majú ďalšie dve rôzne pridružené farby. Farebných odtieňov je 13. Jednotlivé hutné výrobky sa farebne označujú na čele alebo na konci polotovaru. (Obr. 1)

[1]



Obr. 1. Príklady farebného označovania ocelí

1.4 Triedy ocelí

Ocele k tváreniu sú rozdelené do deviatich tried akosti podľa chemického zloženia. Sú to triedy 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 a 19. Rozdelenie ocelí do tried a chemického zloženia ocelí jednotlivých tried je uvedené v Strojníckych tabuľkách.

1.4.1 Ocele triedy 11

Sú to konštrukčné nelegované ocele s predpísanými mechanickými vlastnosťami a zaručenými hodnotami uhlíku, síry a fosforu. Oproti oceliam triedy 10 majú predpísanú čistotu, zaručenú pevnosť v ťahu, medzu sklzu a ťažnosť. Niekedy sa zaručujú i iné vlast-

nosti. Vyžaduje sa od nich, aby neboli náchylné k lámavosti za studena i za červeného žiariu. Sú odstupňované podľa obsahu uhlíku, s najmenšou pevnosťou v ťahu od 280 MPa do 900 MPa. Ich vlastnosti sú dané obsahom uhlíku, ktorý neprevyšuje 0,7 %. Čím je obsah uhlíku vyšší, tým úmerne rastie pevnosť a tvrdosť ocele, zároveň klesá húževnatosť, ťažnosť a tvárnosť. Vyrába sa i ako automatová oceľ. Sú dodávané vo forme tvarovaných profilov, drôtov, plechov a výliskov. Používajú sa v stave normalizačne žíhanom, poprípade i v stave inak tepelne spracovanom. Používa sa na výrobu klincov, skrutiek, kolíkov, strojových súčiastok, konštrukčných dielcov, nitov, reťazí, oceľ na mierne alebo hlboké ťahanie, svorníky, čapy, matice, kľukové hriadele, menej namáhané ozubené kolesá a iné.

[1,2]

Ocele pevnostnej rady 34 až 45 – S max. obsahom uhlíku $C = 0,24 \%$ sú väčšinou zaručene zvárateľné, dobre tvárne za studena i za tepla. Vyrábajú sa z nich výlisky, výkovky a výťažky. Najvýznamnejšie sú ocele 11 343, 11 373, 11 423, z ktorých sa vyrábajú všetky druhy polotovarov. Používajú sa na zvárané konštrukcie strojov, ktoré sú namáhané staticky, poprípade mierne dynamicky (čapy, páky, puzdra, súčasti parných kotlov a vodných turbín, na hriadele, osy, ozubené kolá atď. Niektoré ocele sa hodia i na súčasti pre nízke teploty (do $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ocele pevnostnej rady 50 – S obsahom uhlíku $C \leq 0,45 \%$ majú pevnosť v ťahu od 500 do 650 MPa. Niektoré možno zušľachtovať, poprípade zvärať. Sú to najrozšírenejšie ocele pre strojné súčasti hlavne namáhané staticky i dynamicky, ako sú hriadele, čapy, skrutky, kolíky, matice, málo namáhané ozubené kolá a iné.

[1]

1.4.2 Ocele triedy 12

Je to ušľachtilá uhlíková oceľ určená pre zušľachtovanie a povrchové kalenie. V porovnaní s ocelami triedy 10 a 11 majú nižší obsah fosforu a síry, obsah uhlíku je od 0,06 do 0,9 %. Pretože ide o ocele nelegované, majú všetky v značke tretiu číslicu 0. Výnimkou je oceľ 12 140 na hriadele veľkých rozmerov. Používa sa na ozubené kolesá, cementované a povrchovo kalené výrobky, pružiny, menej namáhané kľukové a vačkové hriadele automobilov atď. Sú to jedny z najviac používaných ocelí a tvoria niekoľko podskupín: 1. Ocele

le k cementovaniu, 2. ocele k zušľacht'ovaniu, 3. ocele k povrchovému kaleniu, 4. Ocele na patentované drôty. [1,2]

1.4.3 Ocele triedy 14

Sú ocele legované Cr, Mn, Si, poprípade ešte Ni, Al, Ti. Je to ušľachtilá, zliatinová, nízko legovaná ocel', určená pre ďalšie tepelné spracovanie. Je vhodná k cementovaniu, nitrídovaniu, zušľacht'ovaniu alebo povrchovému kaleniu. Má zvýšenú prekaliteľnosť. Patrí medzi najdôležitejšie legované ocele. Používa sa na nitrídované súčiastky s veľkou povrchovou odolnosťou, stredne namáhané súčiastky motorových vozidiel a leteckých motorov.

[1,2]

2 SPÔSOBY DELENIA MATERIÁLU

V strojárskych závodoch sa materiál spravidla delí (prípravná operácia) priamo v skladoch materiálu. Mechanické dielne dostanú už do výroby pripravené polovýrobky. Okrem toho sa rôzne metódy delenia materiálu používajú na narezávanie valcovaných profilov pri výrobe oceľových konštrukcií, na odrezávanie náliatkov v zlievniach a na delenie valcovaného materiálu v hutníckej výrobe. Spôsobov delenia materiálu je mnoho. Používa sa vždy ten, ktorý vyhovuje technickým požiadavkám a je hospodárnejší. Kde je to možné, použije sa delenie beztrieskové, napríklad strihanie plechov a kruhových i iných profilov nožnicami alebo na lise, vystrihovanie tvarových súčiastok z plechov, rezanie kyslíkom a podobne. Z metód obrábania sa používa upichovanie sústružením, rezanie pilami rámovými, kotúčovými, alebo pásovými a rozbrusovanie tenkým brúsnym kotúčom. Ďalšie používané spôsoby delenia materiálu sú elektroerozívne delenie plechovým kotúčom, pásom alebo drôtom s pôsobením elektrického prúdu a tavné delenie materiálu oceľovým kotúčom alebo pásom pri veľkej obvodovej rýchlosti. Medzi vysoko progresívne spôsoby delenia materiálu patrí rezanie laserovým, plazmovým alebo kvapalinovým (vodným) lúčom. Delenie materiálu je väčšinou prvou operáciou, ktorú je nutné previesť pri výrobe súčastí. [5]

2.1 Základy obrábania (základné pojmy)

Obrábanie – Je technologický proces, pri ktorom je prebytočná časť materiálu oddeľovaná z obrobku vo forme triesky britom rezného nástroja. Obrábanie sa uskutočňuje v sústave stroj - nástroj - obrobok, kde je stroj zastúpený iba symbolicky univerzálnym skľúčidlom a operným hrotom. [3]



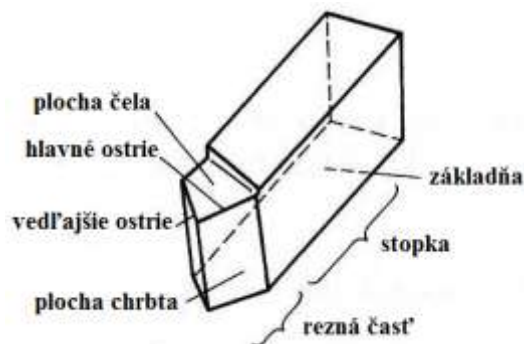
Obr. 2. Sústava stroj – nástroj - obrobok

Obrobok – Je obrábaný alebo už čiastočne obrobeneý predmet. Predmet, ktorý sa bude najskôr obrábať, je polotovar. Predmet, ktorý už je obrobeneý je výrobok. Obrábaná plocha je tá časť povrchu obrobku, z ktorého je odoberaný materiál. Plocha vzniknutá obrábaním je obrobeneý plocha. Plocha vzniknutá tesne za britom nástroja je rezná plocha. [3]



Obr. 3. Obrobok

Rezný nástroj – Je to aktívny prvok obrábania. Rezná časť nástroja obsahuje činnú časť brit. Brit má tvar klinu, ktorý je ohraničený plochou čela (po ktorej odchádza trieska) a plochou chrbta. Priesečnica plôch čela a chrbta sa nazýva ostrie. Rezná časť nástroja má spravidla hlavné ostrie a vedľajšie ostrie. Časť za ktorú je nástroj upínaný, je stopka nástroja. U nožov je to spravidla pravouhlé teleso štvorcového alebo obdĺžnikového prierezu. U niektorých nástrojov (vrtákov, výstružníkov, fréz a pod.) má stopka podobu valcovú alebo kužeľovú. [3]



Obr. 4. Rezný nástroj

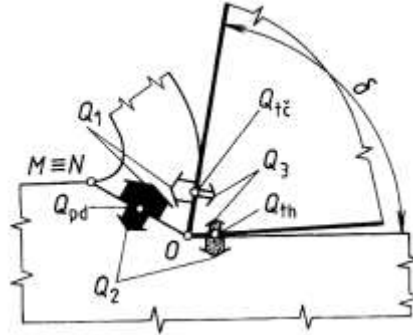
2.2 Teplo a teplota vznikajúca pri obrábaní

Takmer všetka mechanická práca vynaložená na premenu odrezávanej vrstvy v triesku a odvedenie triesky z miesta rezu sa premieňa na teplo. Teplo sa vyvíja v pomerne malej oblasti a je príčinou vysokej teploty. Teplota má nepriaznivý vplyv na opotrebenie nástroja, na presnosť obrábania a akosť obrobenej plochy.

Tepelná bilancia – Ku vzniku tepla dochádza pri obrábaní premenou prác v jednotlivých miestach zdrojov:

- v oblasti primárnych plastických deformácií - premenou práce plastických deformácií (Q_{pd}),

- na styčnej ploche čela - premenou práce trenia ($Q_{tč}$),
- na styčnej ploche chrbta - premenou práce trenia (Q_{th}).



Obr. 5. Zdroje tepla

Celkové množstvo tepla Q sa s vyhovujúcou presnosťou určí z práce vykonanej zložkou reznej sily F_z podľa rovnice $Q = A \approx F_z v t$. Celkové teplo vznikajúce pri obrábaní je z podstatnej časti odvádzané trieskou – Q_1 , z menšej časti obrobkom - Q_2 a nástrojom – Q_3 . Časť tepla je vyžarovaná priamo do okolia – Q_4 . Podiel jednotlivých zložiek odvádzaného tepla je závislý na:

- tepelnej vodivosti materiálov obrobku a nástroja,
- rezných podmienkach, predovšetkým reznej rýchlosti,
- reznom prostredí a spôsobe chladenia a mazania,
- geometrií britu nástroja.

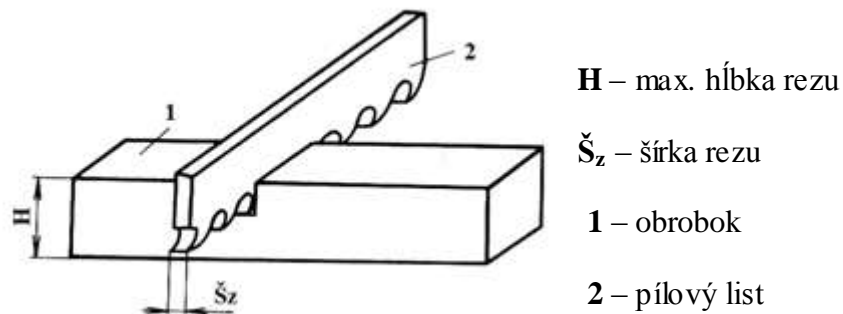
$$\text{Rovnica tepelnej bilancie : } Q_{pd} + Q_{tč} + Q_{th} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad [3]$$

Teplota rezania – Vývin tepla pri obrábaní má za následok zvýšenie teploty v miestach zdrojov tepla a v ich okolí. Teplota má výrazný vplyv na stav britu, predovšetkým na intenzitu jeho otupovania. Pretože teploty na čele nástroja sú o 50 až 100% vyššie než na chrbte nástroja, sú z hľadiska opotrebenia nástroja, a teda i z dôvodov ekonomických, teploty na čele významnejšie. [3]

2.3 Delenie materiálu rezaním

Jedná sa o najpoužívanejší spôsob delenia tyčového materiálu. Podľa konštrukcie a rezného nástroja používame rámové, kotúčové a pásové píly. Rezanie pilou je operácia, pri ktorej sa odber materiálu deje britmi nástroja. Odobratý materiál odchádza v tvare triesok. Táto definícia platí obecné pre všetky spôsoby obrábania reznými nástrojmi. [4,5]

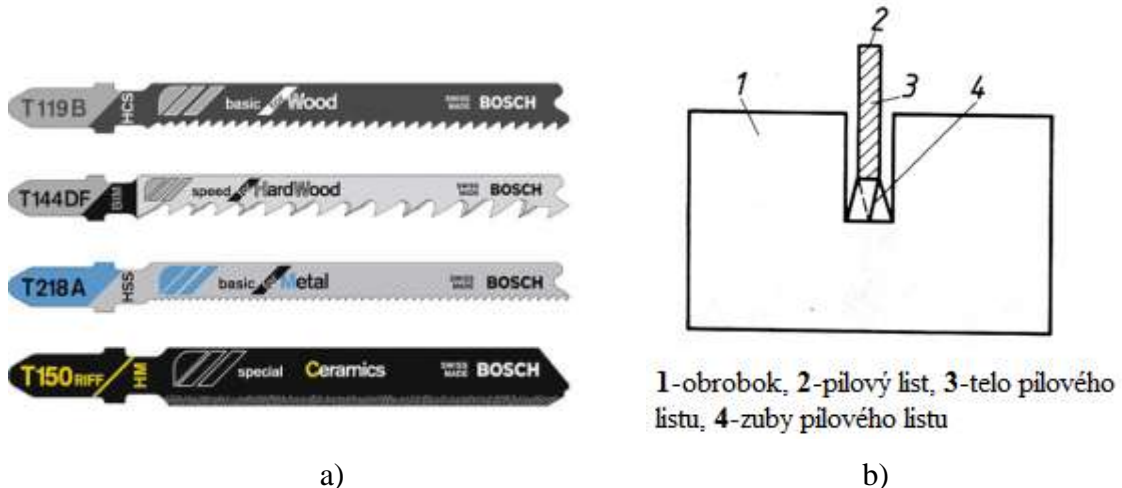
Princíp metódy – Princíp rezania materiálu pilami spočíva vo vnikaní britu nástroja (píly) do materiálu obrobku, kedy nástroj (píla) koná priamočiary vratný, plynulý priamočiary alebo otáčavý pohyb a obrobok koná priamočiary posuvný pohyb (prísun). U rámových píl koná prísun nástroj a obrobok je nehybný. Na rozdiel od frézovania je u rezania pilou maximálna hĺbka rezu H v podstate väčšia než šírka rezu \check{S}_z . [4]



Obr. 6. Rezanie pilou

Rezné nástroje – Pre delenie materiálu rezaním sa používajú pílové listy, pílové kotúče a pílové pásy.

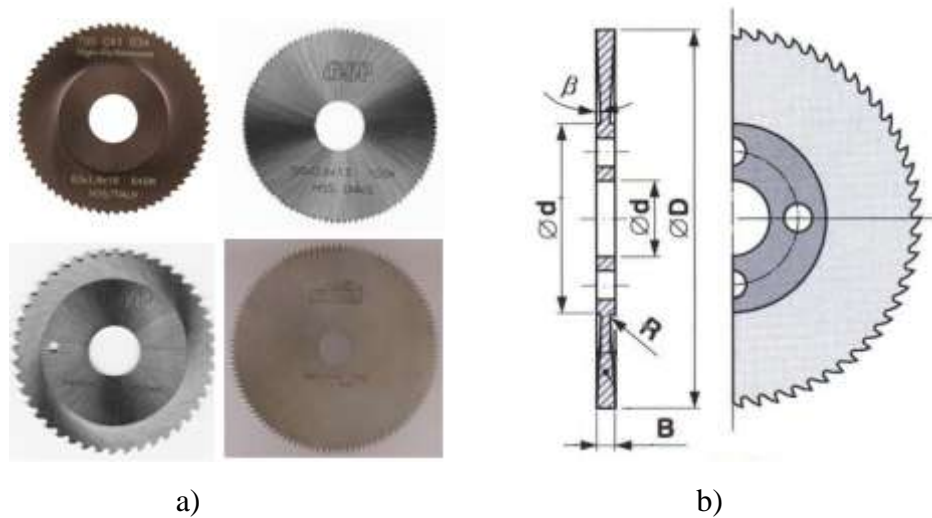
- *Pílové listy* – Sú oceľové pásy opatrené na jednej strane zubami. Vyrábajú sa z rýchloreznej ocele, v dĺžkach 300 až 700 mm. Šírka pílových listov je podľa dĺžky 25 až 50 mm, hrúbka 1,25 až 2,5 mm, rozteč zubov 1,8 až 6,3 mm. Ako je zrejmé z obrázku, zuby majú jednoduchý tvar a sú rozvedené, aby telo pílového listu nedrelo o steny rezaného materiálu. [4]



Obr. 7. a) Pílové listy, b) Pílový list v reze

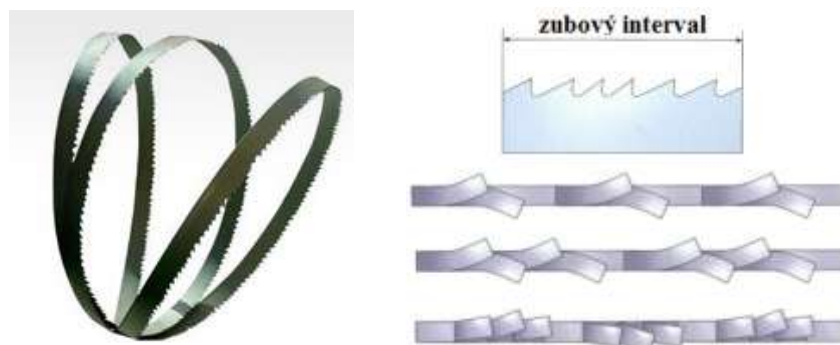
- *Pílové kotúče* – Sú oceľové kotúče so zubami na obvode. Vyrábajú sa ako celistvé, segmentové alebo s letovanými britovými doštičkami zo zlinutého karbidu. Celistvé pí-

lové kotúče sa vyrábajú z nástrojovej alebo rýchloreznej ocele v rozsahu priemerov 20 až 400 mm, o hrúbkach 0,2 až 6 mm. Pílové kotúče väčších priemerov sa vyrábajú ako segmentové. Segmenty sú vyrobené z rýchloreznej ocele a na oceľové teleso pílového kotúča sa upevňujú na osadenie alebo do drážky pomocou nitov. Segmentové pílové kotúče sa vyrábajú v priemeroch 250 až 1870 mm, o šírke zubov 3,5 až 15 mm. Pílové kotúče s britmi zo zlinutých karbidov sa vyrábajú o priemeroch 280 až 1650 mm, o šírke zubov 4 až 11,5 mm. Britové doštičky zo zlinutého karbidu sú na teleso píly naletované. [4]



Obr. 8. a) Pílové kotúče, b) Pílový kotúč v reze

• *Pílové pásy* – Sú dlhé oceľové pásy opatrené na jednej strane zubami. Šírka pásu je 4 až 32 mm, hrúbka 0,65 až 1,1 mm. Od výrobcu sú dodávané buď zvarené ako nekonečný pás, alebo nezvarené v štandardnej dĺžke 25 až 100 metrov. Väčšina výrobcov dodáva pílové pásy v prevedení bimetal, to znamená, že telo píly je vyrobené z konštrukčnej ocele a zuby z nástrojovej ocele. Spojenie oboch častí je prevedené napr. zvarom laserom. [4]

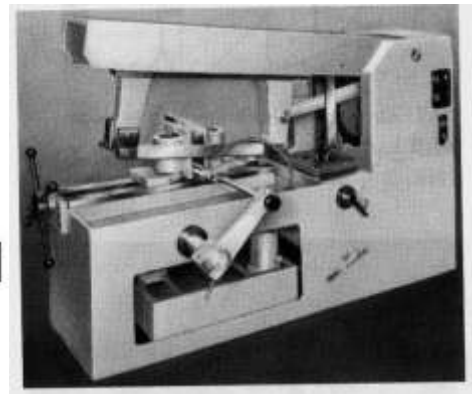
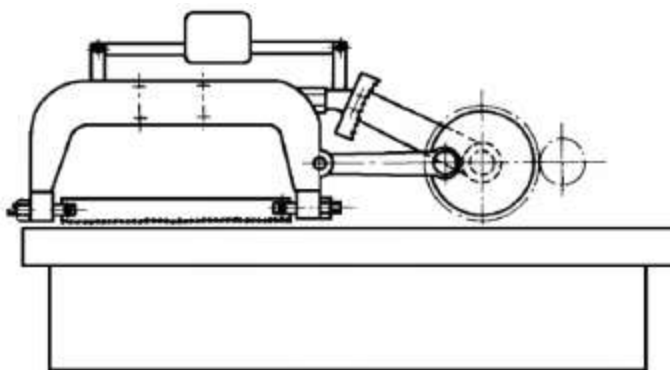


Obr. 9. Pílové pásy

Rezacie prístroje (píly) – Píly sú obrábacie stroje na delenie materiálu rezaním. Pracujú na rovnakom princípe, ako frézovačky. Podľa ich konštrukcie a používaného nástroja ich rozdeľujeme na píly rámové, kotúčové a pásové.

- *Rámová píla* – Pílový list je napnutý v ráme, ktorý je uložený v priamočiariom vedení výkyvného ramena. Rám s pílou sa pohybuje priamočiarym vratným pohybom a je do-tláčaný do rezu závažím alebo hydraulicky. Veľkosť posuvu sa mení prestavením závažia alebo u hydraulických píl zmenou tlaku oleja. Píla reže len pri pohybe v jednom zmysle. Pri spätnom pohybe sa rám zdvihne, aby sa pílový list netrel o materiál. Zdvíhanie rámu môže byť hydraulické alebo pomocou vačky, resp. výstredníka. Počet zdvihov píly za minútu (rezná rýchlosť) sa mení presuvnými alebo výmennými kolesami. Materiál sa upína do skrutkového zveráku. Výhodou rámových píl je malá šírka rezu (1 až 3,5 mm), ich kinematická jednoduchosť a spoľahlivosť. Nevýhodou je malý výkon.

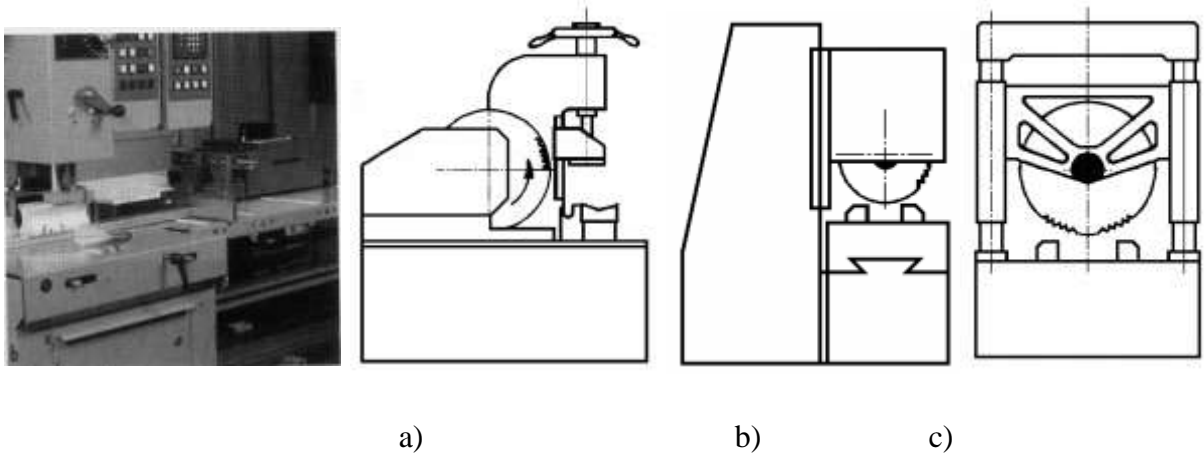
[4]



Obr. 10. Rámová píla

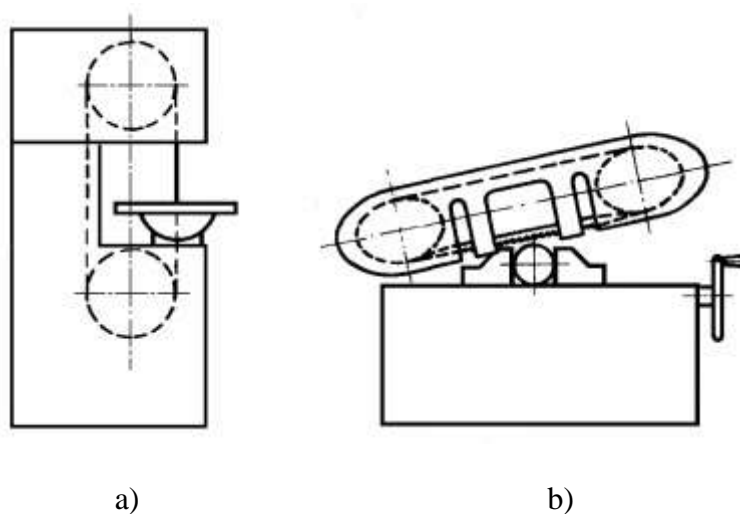
- *Kotúčová píla* – Kotúčové píly sa vyznačujú v porovnaní s rámovými pílamí omnoho väčším výkonom. Ich nevýhodou je ale väčšia šírka rezu (4 až 12 mm). Podľa smeru posuvu pílového kotúča rozdeľujeme kotúčové píly na vodorovné a zvislé, ktoré môžu byť jednojstojanové alebo dvojstojanové. Posuv pílového kotúča do rezu je hydraulický, čo umožňuje samočinnú reguláciu veľkosti posuvu podľa hrúbky rezu. Pílový kotúč je upnutý na vretene a koná otáčavý pohyb. Veľkosť stroja je daná minimálnym a maximálnym priemerom pílového kotúča, ktorý možno na stroji použiť. Píly môžu mať automatické podávanie materiálu, prípadne je automaticky riadený celý pracovný cyklus.

[4,5]



Obr. 11. Kotúčová píla - a) vodorovná, b) zvislá jednojstojanová, c) zvislá dvojstojanová

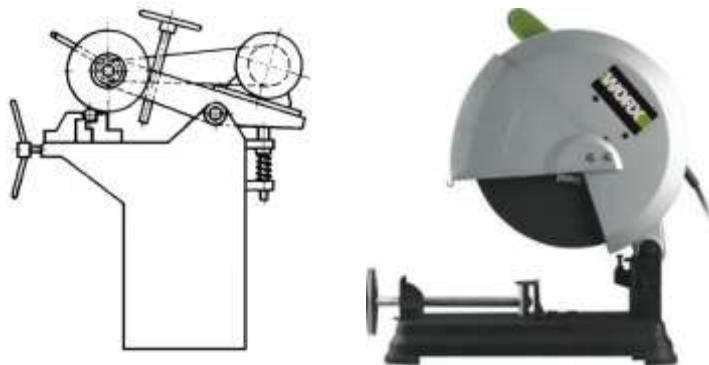
• *Pásová píla* – Pásové píly majú v porovnaní s rámovými píľami väčší výkon a v porovnaní s kotúčovými píľami zase menšiu šírku rezu. Používajú sa jednak na tvarové vyrezávanie z plechu alebo na rezanie tyčového materiálu pre ďalšie obrábanie na sústruhoch, pričom úspešne nahrádzajú píly rámové a kotúčové. Píly na tvarové rezanie majú kotúče nad sebou, pás prebieha zvisle. Spodný kotúč je hnací, horný napínací. Materiál je položený na stole a ručne sa privádza k pílovému listu podľa obrysu, ktorý sa má rezať. Spodný kotúč sa poháňa elektromotorom cez prevody v prevodovej skrini na zmenu reznej rýchlosti. Na píľach určených na rezanie materiálu prebieha pílový pás šikmo. Rezacia časť je v mieste pred záberom s rezaným materiálom skrútená do zvislej roviny. Posuv sa vykonáva nakláňaním rámu okolo osi dolného kotúča, a to buď závažím alebo hydraulicky. [5]



Obr. 12. Pásová píla - a) na tvarové vyrezávanie, b) na rezanie tyčového materiálu

2.4 Delenie materiálu rozbrusovaním

Na rozrezávanie tvrdého materiálu sa často používajú rozbrusovacie brúsky. Tieto stroje sa vyznačujú veľkým výkonom. Pre delenie materiálu rozbrusovaním sa používajú tenké rezacie a drážkovacie brúsiace kotúče nevystužené alebo vystužené sklotextilom (Flex). Brúsiacim materiálom sú zrná karbidu kremíku (SiC) alebo syntetického korundu (Al_2O_3), šírka kotúča je 1 až 3,2 mm, rezná rýchlosť 40 až 80 $m \cdot s^{-1}$ a posuv je ručný. Pre rezanie veľmi tvrdých materiálov, ako sú napr. zlinuté karbidy, sa používajú diamantové rezacie kotúče. Na obrázku je zobrazená jednoduchá stolná rozbrusovacia brúska. Brúsny vreteník je uložený na výkyvnom ramene, hnací elektromotor predstavuje na stroji protizávažie. Posuv do rezu je v naznačenom prípade ručný. Do miesta rezu sa musí privádzať chladiaca kvapalina. Rozbrusovacie stroje sa stavajú aj s mechanickým, resp. hydraulickým pohonom posuvu brúsneho vreteníka do rezu. [4,5]



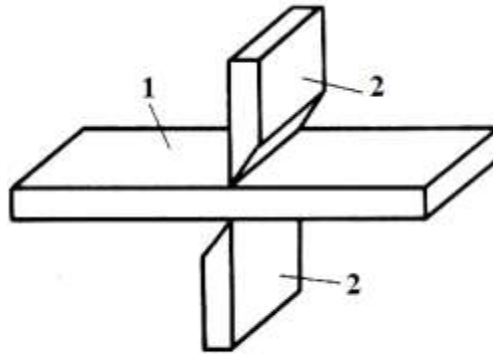
Obr. 13. Rozbrusovacia brúska

2.5 Delenie materiálu strihaním

Strihanie je technológia delenia materiálu pôsobením dvoch britov pohybujúcich sa oproti sebe. Pri strihaní nevznikajú žiadne triesky.

Princíp metódy – Pri strihaní sa materiál oddeľuje šmykovým pôsobením dvoch nožov. Tento spôsob delenia sa preto používa pre mäkké tvárne materiály menších hrúbok. Táto operácia sa v lisovniach používa na prípravu polovýrobovkov (strihanie tabúl plechov na pásy, rozdelenie zvitkov na tabule, strihanie profilov), na vystrihovovanie predliskov, ďalšiemu spracovaniu a pod. Britý nástroja pôsobiace na materiál vyvolávajú v rovine strihu šmykové napätia väčšie než je pevnosť v šmyku strihaného materiálu, čím dôjde k jeho porušeniu a prestrihnutiu. [4,5]

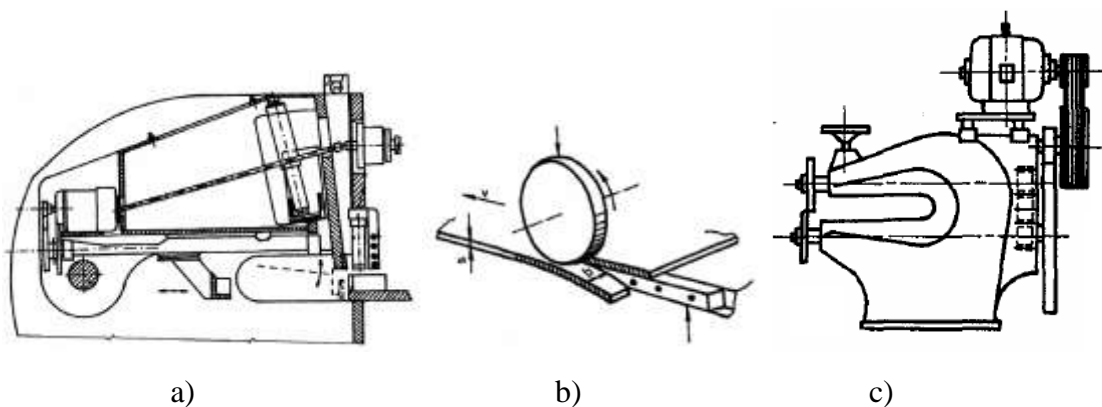
Rezné nástroje – Strihací nástroj je tvorený dvoma nožmi, ktoré sú vyrobené z nástrojovej alebo rýchloreznej ocele a sú tepelne zušľachtené na tvrdosť HRC 52 až 60. Dĺžka nožov je rôzna, môže dosahovať až 6 metrov. Pre tvarové strihanie sa používajú lisovacie alebo vysekávacie nástroje. Vysekávacie nástroje majú obdobný tvar ako nože na strihanie, rozdiel je v tom, že šírka britu je u vysekávacích nástrojov iba 2 až 10mm. [4]



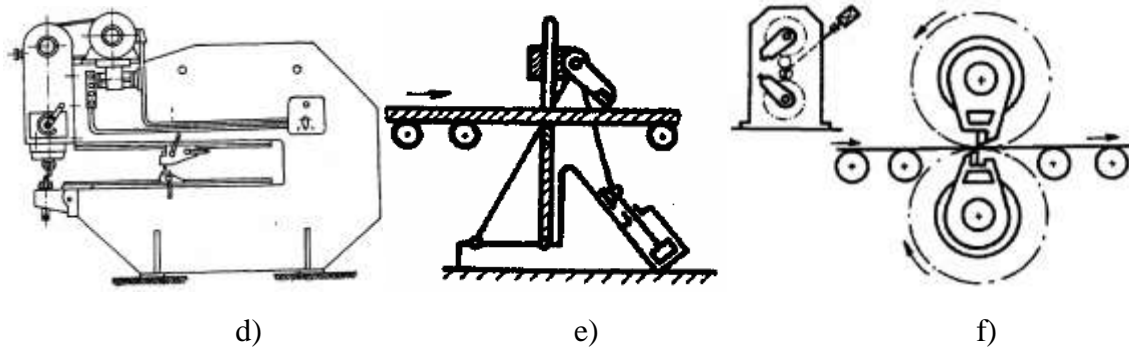
1-obrobok, 2-brit nástroja

Obr. 14. Nástroj na strihanie (princíp)

Rezacie prístroje (nožnice) – Podľa konštrukčných a technologických znakov rozoznávame nožnice na strihanie plechu, profilov, alebo hutníckych polovýrobovkov. Nožnice na plech môžu byť s rovnými nožmi (pákové, kmitacie, tabuľové), s kotúčovými nožmi (jednokotúčové, dvojkotúčové na pásy, dvojkotúčové okružné alebo krivkové a viackotúčové). Nožnice na strihanie profilov môžu byť konštruované ako ručné, strojové a kombinované. Ostatné druhy nožníc sú napríklad: rotačné nožnice na rúrky, nožnice na strihanie stavebnej ocele, nožnice na strihanie predkovkov, letmé nožnice na strihanie plechu a drôtov a aligátorové nožnice na strihanie šrotu. [5]



Obr. 15. a) Tabuľové nožnice, b) Jednokotúčové nožnice, c) Dvojkotúčové nožnice



Obr. 16. d) Kmitacie nožnice, e) Letmé nožnice pákové, f) Letmé nožnice dvojkotúčové

2.6 Delenie materiálu vodným lúčom

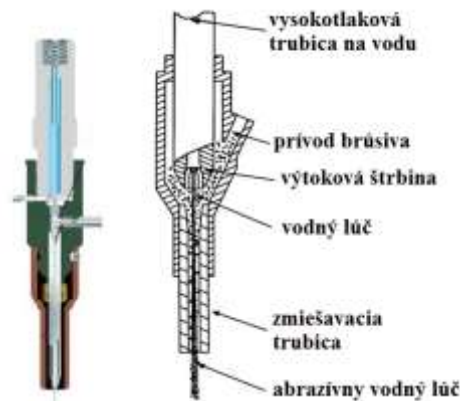
Je to metóda presného tvarového rezania s vysoko progresívnou a ekologickou technológiou. Obrábanie vodným prúdom je pôsobenie kinetickej energie vodného prúdu malého priemeru, ktorý vychádza z dýzy na obrobok, čo má za následok odber materiálu. Kvapalinový lúč pri pracovných tlakoch až 350 MPa získava rýchlosť až 4-krát väčšiu ako rýchlosť zvuku, pričom sa správa ako pevné teleso a svojím energetickým účinkom delí všetky zatiaľ známe druhy prírodných a technických materiálov. Pri opracovaní tvrdých a húževnatých materiálov alebo na zvýšenie účinnosti rezania sú do prúdu kvapaliny pridávané brúsne zrná (brusivo). Táto metóda sa nazýva obrábanie abrazívnym vodným lúčom. Technológia rezania rozličných materiálov vysokotlakovým vodným či hydroabrazívnym lúčom bola vyvíjaná od prelomu sedemdesiatych a osemdesiatych rokov v USA. Už v 2. polovici osemdesiatych rokov bola široko uplatňovaná. Obrábanie vodným prúdom sa využíva najmä na delenie, vyrezávanie, vrtanie a vyvrtávanie. V špecifických prípadoch môže nahradiť operáciu odhrotovania, pieskovania, gravírovania a sústruženia.

- *Vodným prúdom sa obrábajú (WJM):* kompozitné materiály, pórovité materiály, betón, plasty, drevo, koberec, pena, potraviny, koža, guma, linoleum.
- *Abrazívnym vodným prúdom sa obrábajú (AWJ):* kovy, keramika, sklo, stavebné materiály, zliatiny, volfrám, nehrdzavejúca oceľ, hliník, keramické dlaždice, oceľ, laminát, kameň, invar (zliatina), titán. [6,7,8]

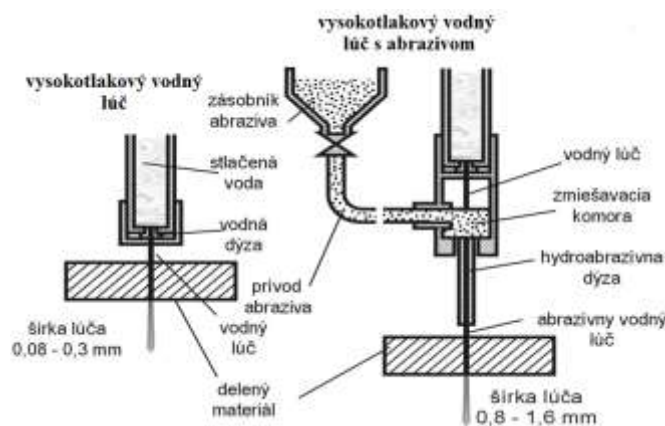
Princíp metódy – Princíp metódy spočíva v tom, že vysokotlakové čerpadlo so špeciálnym zosilňovačom tlaku (tzv. generátor vodného tlaku) dodáva vysokotlakovým potrubím vodu do rezacej hlavy. Tá je opatrená tryskou, ktorej priemer diery je 0,1 až 0,4 mm a prúdi

z nej vodný lúč pod tlakom 410 MPa výtokovou rýchlosťou väčšou než trojnásobok rýchlosti zvuku. Pridaním jemného brúsiva sa zvýši účinnosť rezania a rozšíri jeho využitie.

[6]



Obr. 17. Hlavica pre obrábanie vodným lúčom



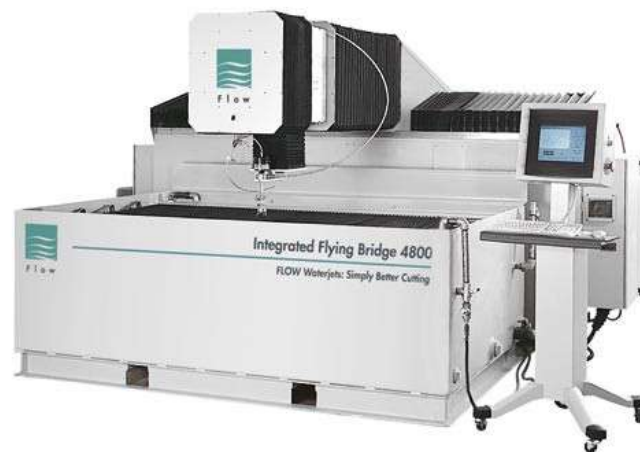
Obr. 18. Princíp WJM a AWJ

Rezací prístroj – Základom systému sú vysokotlakové čerpadlá, ktoré prostredníctvom multiplikátorov generujú tlak vody cca 80-380 MPa s objemovým výkonom 1,2 až 7,6 l/min pri výkone 9 až 75 kW. Vysokotlakovým vedením je voda dopravovaná k rezacej hlave, kde je systémom trysiek vytvorený vlastný "rezací nástroj". Pre rezanie mäkkých materiálov ako sú plasty, guma, drevo, korok a pod. sa používa asi 0,15-0,30 mm široký vodný lúč. Pre rezanie tvrdých materiálov sa používa asi 0,9-1,5 mm široký hydroabrazívny lúč s prímiesou brúsneho prášku. Ten je potom vďaka svojej vysokej energii schopný rezať kovy, kameň, sklo a iné materiály hrúbok až 150 mm. Pohyb rezacej hlavy a celá dráha rezu je riadená riadiacim počítačom podľa vopred stanoveného programu. Preto je možné prevádzať i tvarovo zložité rezy behom jednej operácie. Studeným rezom nie je delený materiál pri rezaní silovo namáhaný a rezná hrana tým nie je nijako tepelne ovplyv-

nená. Táto skutočnosť je veľmi dôležitá a rozhodujúcim spôsobom sa tak odlišuje od ostatných technológií na delenie materiálu, zvlášť pri laseri, plazme, plameni a pod. [8]



Obr. 19. Schéma prístroja na rezanie vodným lúčom



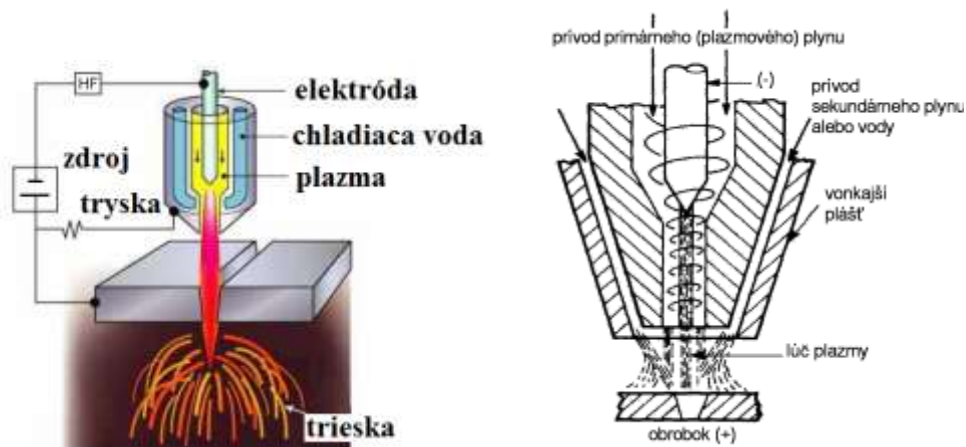
Obr. 20. Zariadenie pre rezanie vodným lúčom

2.7 Delenie materiálu plazmou

Plazmové spôsoby rezania sa začali používať začiatkom 50tych rokov 20. storočia ako alternatívne spôsoby rezania hliníkových a iných neželezných materiálov. Ak má plazma vplyvom väčšieho tlaku a množstva privádzaného plynu do horáku väčšiu výstupnú rýchlosť, má i väčší dynamický účinok a dochádza k rezaniu materiálu. Vysoká teplota plazmy umožňuje rezať prakticky všetky kovové materiály. Predovšetkým sa ale používa na rezanie a pretavovanie kovov a zliatin s vysokou teplotou topenia. Výkon rezania v porovnaní s rezaním kyslíkom je 3 až 5 násobný. Základom obrábania plazmou je ohrev alebo tavenie materiálu za extrémne vysokých teplôt (nad 1000°C), ktoré vznikajú rozkladom molekúl plynu pri ich priechode elektrickým oblúkom. Pracovný cyklus stroja pre rezanie materiálu plazmovým horákom je ovládaný CNC riadiacim systémom, ktorý riadi všetky pracovné

parametre stroja. Obecne je kvalita rezu a maximálna hrúbka rezaného materiálu závislá na metóde plazmového rezania, na napájacom prúde a napätí, na rýchlosti rezania a na druhu rezaného materiálu. Maximálna hrúbka rezaného materiálu je 130 mm, u zliatin hliníku a medi až 150 mm. [6,8]

Princíp metódy – Princíp spočíva v tom, že sa medzi rezaným materiálom a tryskou po privedení elektrického napätia vytvorí elektrický oblúk. Oblúk horí medzi netaviacou sa katódou (vyrobenou z volfrámu) a anódou, ktorá môže byť tvorená opracovaným materiálom alebo telesom horáku. Z trysky vyletuje vysokou rýchlosťou veľmi horúci ionizovaný plyn, ktorý je do trysky vháňaný z tlakových fliaš. Teplota plazmy pri úniku z trysky môže dosahovať až 20 000°C a rýchlosť až rýchlosti zvuku. Tryska je chladená kolujúcou vodou a pri niektorých procesoch sa dokonca rezaný materiál umiestňuje pod vodu. Voda chráni trysku pred roztečením, bráni hluku a nepríjemnému dymu. Zloženie plynu, ktorý prúdi do trysky a ktorý je následne oblúkom zahrievaný sa líši podľa použitia, ale najčastejšie sa používa argón, dusík, vodík, kyslíka ich zmesi. [9]



Obr. 21. Schéma plazmového rezania a princíp tvorby plazmy v horáku

Rezací prístroj – Každé technologické zariadenie pracujúce s plazmou sa skladá z plazmového horáku, zdroja elektrického prúdu, riadiacej jednotky a manipulačného zariadenia. Stroje sú vybavené systémom číslicového riadenia. Jednotlivé diely sú navrhované počítačovým programom CAC pre CNC systém, ktorý ovláda plazmový horák. Pre každú naprogramovanú operáciu možno všetky vystrihované diely, pre ich neskoršiu identifikáciu popísať atramentovou tryskovou tlačiarňou, riadenou tiež systémom CNC. V Plazmovom horáku, ktorý je základnou súčasťou, dochádza k premene elektrickej energie na tepelnú energiu usmerneného prúdu plazmy. Plazmové zariadenia sa delia na dva základné typy,

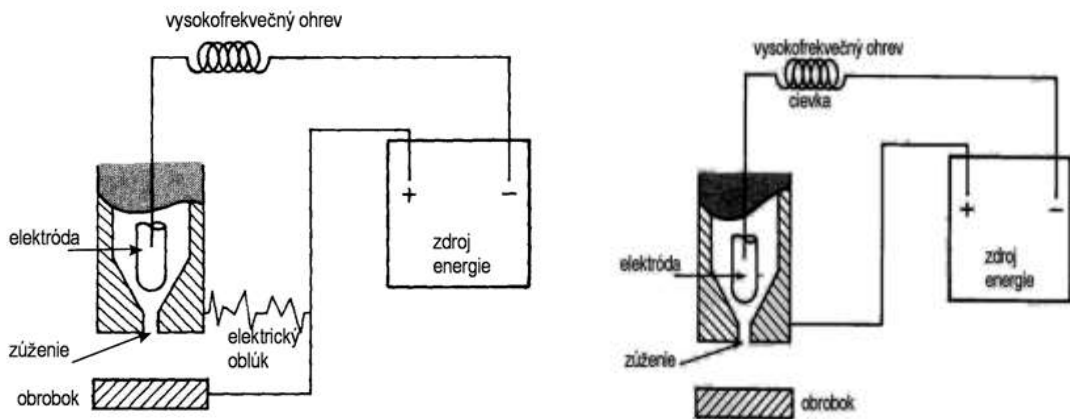
ktoré používajú prenesený (transferovaný) alebo neprenesený (netransferovaný) plazmový oblúk. Dôležitým parametrom plazmového horáku je stabilizácia elektrického oblúku. Podľa druhu stabilizačného média sa plazmové horáky delia na: [6,8]

- *Plazmové horáky s plynovou stabilizáciou s transferovým oblúkom* – Elektrický oblúk horí medzi vnútornou elektródou umiestnenou v horáku a obrábaným materiálom. Používa sa pre opracovanie elektricky vodivých materiálov, napríklad pre rezanie ocelí a neželezných kovov.
- *Plazmové horáky s plynovou stabilizáciou s netransferovým oblúkom* – Elektrický oblúk horí medzi vnútornou elektródou umiestnenou v horáku a výstupnou tryskou, ktorá tvorí anódu. Používa sa pre obrábanie nevodivých materiálov a k nanášaniu povlakov.
- *Plazmové horáky s vodnou stabilizáciou* – Rezná tryska plazmového horáku má prídavné kanáliky, ktorými sa vstrekuje voda do plazmového horáku. Tieto horáky sa používajú pre rezanie ocelí a neželezných kovov a k nanášaniu povlakov. Výhodou je možnosť rezať pod vodou, čím sa znižuje hlučnosť, prašnosť a vplyv UV žiarenia na obsluhu. [8]

Používané plazmové plyny – U plazmových technológií sa používajú tieto druhy plynov:

- *Plazmové plyny* – Sú privádzané do elektrického oblúku, kde dochádza k ich ionizácii a disociácii. Ako plazmový plyn môže byť používaný jednoatómový argón alebo dvojatómové plyny vodíka, dusíka, kyslíka a vzduchu.
- *Fokusačné plyny* – Zaostrujú lúč plazmy po jej výstupe z trysky horáku. Používa sa argón, dusík alebo zmes argónu a vodíka, poprípade argónu a dusíka.
- *Asistentné plyny* – Obklopujú lúč plazmy a pracovné miesto na obrobku a chránia ho pre účinkom atmosféry. Používa sa argón a dusík.

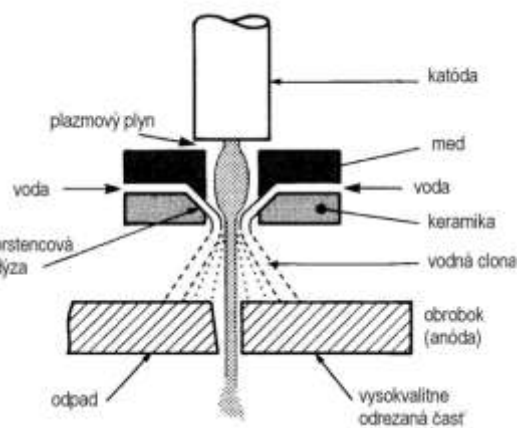
Voľba plazmového a asistenčného plynu je závislá na type rezaného materiálu a jeho hrúbke. Kombinácia obidvoch plynov je odporúčaná výrobcom zariadení. Plazmový plyn sa volí pre konštrukčné ocele (kyslík, vzduch), vysoko legované ocele (argón – vodík, argón – dusík, vzduch, dusík, argón – vodík – dusík), neželezné kovy (argón – vodík, vzduch), kompozitné materiály (argón – vodík – dusík, vzduch, kyslík). [8]



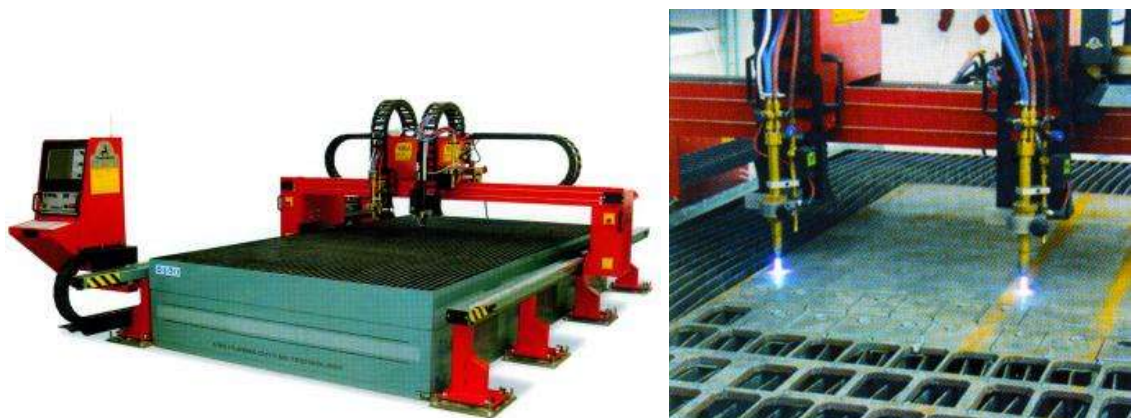
a) s transferovým oblúkom,

b) s netransferovým oblúkom

Obr. 22. Plazmové zariadenia s plynovou stabilizáciou



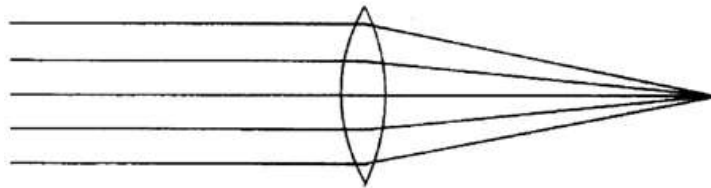
Obr. 23. Plazmový horák s vodnou stabilizáciou



Obr. 24. Stroj pre rezanie Plazmou

2.8 Delenie materiálu laserom

Podstata rezania laserom spočíva v spaľovaní alebo pretavovaní rezného materiálu. Laserový lúč je mierený do miesta rezania (ohniska) a priemeru 0,02 až 0,25 mm a tam ohrievaný na príslušnú pracovnú teplotu. Pri rezaní spaľovaním je ohrev rezaného materiálu uskutočňované laserovým lúčom a vlastným rezaním dôsledkom reakcie rezaného materiálu s kyslíkom. Pri rezaní pretavovaním je roztavený materiál z reznej špáry vyfukovaný neutrálnym rezným plynom. Obrábanie a opracovávanie materiálu laserom je založené na premene svetelnej energie na tepelnú. Deje sa tak pri styku (interakcii) lúča laseru s materiálom obrobku, kedy sa materiál obrobku vplyvom vzniknutej vysokej teploty ohrieva, topí a odparuje. Slovo laser je zložené z počiatočných písmen anglického názvu popisujúceho jeho funkciu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), čo by sa dalo preložiť ako zosilnenie svetla pomocou vynútenej (stimulovanej) emisie žiarenia. Bežné svetelné žiarenie je vlnenie, ktoré sa šíri všetkými smermi, zosilnením je vytvorený úzky zväzok fotónov. Laserové svetlo je monochromatické (jednofarebné), koherentné (usporiadané), má malú rozbiehavosť a vysokú výstupnú intenzitu. [6,8]



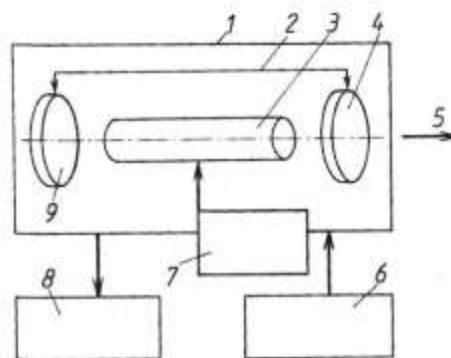
Obr. 25. Laserové svetlo

Princíp metódy – Laser pracuje na princípe indukovanej emisie, t.j. vynúteného žiarenia. Indukovaná emisia je vyvolaná dopadom žiarenia na atóm prvku, kedy žiarenie donúti elektrón obiehajúci okolo jadra prijať energiu a tým stúpať na vyššiu obežnú dráhu. Ďalší príjem energie a rovnováha síl v atóme prinúti elektrón vrátiť sa na svoju pôvodnú obežnú dráhu a vyžiariť prijatú energiu do priestoru. Vzniknuté žiarenie je monochromatické (má jednu, presne definovanú vlnovú dĺžku) a koherentné, čo znamená, že príslušná častica (fotóny) sa v zväzku pohybujú jedným smerom a sú v jeho priereze buď rovnomerne alebo aspoň veľmi pravidelne rozdelené. [10]

Rezačí přístroj – Částami každého laseru je laserová hlavica (1), ktorá obsahuje:

- *laserové médium* (3) – Určuje dĺžku vlny žiarenia. Jedná sa o zmes materiálov, ktorá je priehľadná a má schopnosť odvádzať vzniknuté teplo. Môže byť pevná, tekutá alebo plynná
- *rezonátor* (2) – Je optický systém, umožňujúci sformovať a zosilniť žiarenie. Optický rezonátor tvoria najmenej dve zrkadlá (najčastejšie sférické). Priemer a zakrivenie zrkadiel určuje rozdelenie intenzity žiarenia a energetickú rozbiehavosť laserového žiarenia.
- *budiace zariadenie* (7) – Ktoré ovplyvňuje pracovný režim laseru. Spôsob budenia je daný laserovým médium. Plynné médium je budené elektrickým výbojom, jednosmerným alebo striedavým prúdom. Pevné laserové médium je budené lampami (výbojkami) alebo diódami.
- *zdroj energie budenia* (6) – Ide o špeciálny druh sieťového napájača.
- *chladiaci systém* (8) – Odvádza nevyužitú energiu, ktorá sa nepremení na žiarenie ale tepelnú energiu. Najčastejšie sa používa chladenie vodou. Chladiaci okruh má dve vetvy: vnútornú (používa sa deionizovaná voda) a vonkajšiu (voda z vodovodnej siete alebo zo špeciálneho zásobníku s čerpadlom). Niekedy je vnútorný okruh chladený vzduchom.

[10]

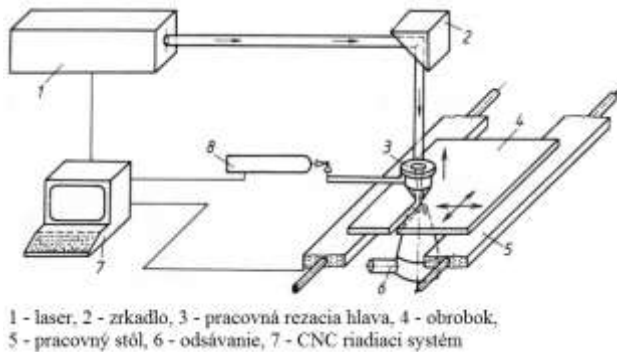


Obr. 26. Schéma zariadenia pre obrábanie laserom

Rezanie laserom – Pri rezaní materiálu laserom je lúč laseru privádzaný do miesta rezu sústavou zrkadiel a v pracovnej hlave je zaostrovaný šošovkou. Rezanie môže byť:

- *sublimačné* – v dôsledku vysokej intenzity laserového žiarenia v mieste rezu je materiál odstraňovaný prevažne odparovaním.

- *tavné* – materiál je v mieste rezania pôsobením lúča laseru roztavený a asistenčným plynom odfukovaný.
- *pálením* – Lúč laseru ohreje materiál na zápalnú teplotu tak, že môže s privádzaným reaktívnym plynom zhorieť v exotermickej reakcii. Vzniknutá trieska je z miesta rezu odstraňovaná asistenčným plynom. [8]



Obr. 27. Schéma zariadenia a zariadenie pre rezanie laserom

Druhy laserov – Najčastejšie rozdelenie laserov je podľa laserového média:

- *Pevnolátkové* – Laserovým médiom je kryštál vybrúsený do tvaru valca, kotúča alebo hranolu, ktorého čelá sú opticky vyleštené. Koherentný lúč pevnolátkových laserov má vlnovú dĺžku $\lambda=1,06\mu\text{m}$, maximálny vstupný výkon 4 kW, pracuje v kontinuálnom i pulznom režime. Účinnosť pevnolátkových laserov je 3 až 8 %.
- *Plynové* – laserovým médiom je zmes plynov. Z technologických laserov majú najväčší význam CO₂ lasery, u ktorých je laserové médium tvorené zmesou kyslíčniku uhlíčitého, dusíku a hélia. Koherentný lúč má vlnovú dĺžku 10,6 μm , maximálny výstupný výkon 25 kW, pracuje v kontinuálnom i pulznom režime. Účinnosť CO₂ laserov je 10 až 15 %.
- *Polovodičové* – funkcia je založená na vzniku stimulovanej emisie žiarenia v aktívnom polovodičovom materiáli. Ako laserové médium sa používa gálium arzenik, kadmium sulfid a kadmium selén. Tieto lasery generujú žiarenie o vlnovej dĺžke 0,3 až 30 μm , pracujú s účinnosťou až 50 %, a výstupným výkonom až 2 kW.
- *Kvapalinové* – laserovým médiom sú roztoky organických farbív alebo špeciálne pripravené kvapaliny nadopované iónmi vzácnych zemín. Výberom vhodného farbiva a zrkadiel rezonátoru je možné získať koherentné žiarenie o akejkoľvek vlnovej dĺžke od 0,3 do 1,3 μm . Účinnosť je radovo desiatky percent. [8]

3 MERANIE TVRDOSTI A MIKROTVRDOSTI

3.1 Meranie tvrdosti

Tvrdosť patrí medzi významné mechanické vlastnosti konštrukčných materiálov a je veľmi často využívaná v technickej praxi. Tvrdosť je definovaná ako odpor proti vnikaniu cudzieho telesa do povrchu skúšaného materiálu. Posudzujeme ju podľa veľkosti stopy, ktorá vznikla vtláčovaním telesa vhodného tvaru (gulôčka, ihlan, kužeľ) a z dostatočne tvrdého materiálu (kalená oceľ, zlinutý karbid, diamant) do skúšaného vzorku určitou silou za definovaných podmienok. Meranie je rýchle a jednoduché. Výhodou je i možnosť skúšať hotové výrobky bez ich deštrukcie alebo znehodnotenia. Skúšky tvrdosti sa členia na *vrypové*, *vnikajúce* a *odrazové*, podľa charakteru zaťažujúcej sily na *statické* a *dynamické*. Medzi najrozšírenejšie a najvýznamnejšie skúšky tvrdosti patria skúšky vnikajúce. Základnými skúškami tejto skupiny sú skúšky podľa *Brinella*, *Rockwella* a *Vickersa*. Odtlačok sa vytvára pozvoľným vtláčovaním príslušného vnikajúceho telieska plynule so zväčšujúcou silou kolmo do skúšaného povrchu. [11,12]

3.1.1 Skúšky tvrdosti podľa Brinella

Pri tejto skúške sa do skúšaného materiálu zatlačuje určitou silou F oceľová kalená gulôčka o priemere D . Tvrdosť sa vyjadruje pomerom zaťaženia k ploche gulovitého odtlačku a stanoví sa zo vzťahu:

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

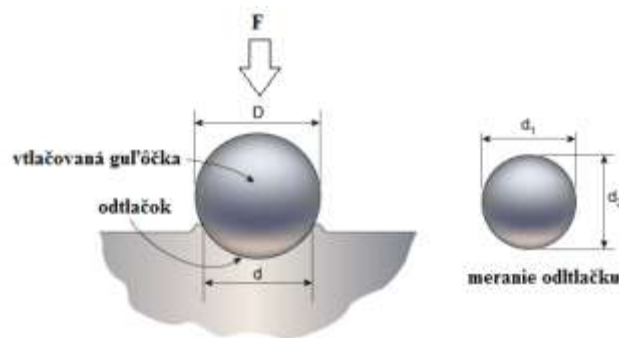
prípadne

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

Kde: F – záťažová sila (N), A – plocha odtlačku (mm^2), d – priemer odtlačku (mm).

Ako vnikajúce telieska sa používajú gulôčky o priemere $D = 10, 5, 2.5, 2$ a 1 mm. Do tvrdosti $400 HB$ sa jedná o gulôčky oceľové, pri vyššej tvrdosti o gulôčky zo zlinutých karbidov. Nad tvrdosť $450 HB$ však nie je meranie podľa Brinella vhodné. Zaťaženie sa volí ako násobok štvorca priemeru gulôčky $F = K \cdot D^2$. Bežne býva pre oceľ $K = 30$, pre neželezné kovy a zliatiny $K = 10$ a pre mäkké neželezné kovy $K = 2,5$. Doba zaťažovania sa volí

o ocelí a liatin 10 až 15 sekúnd, u neželezných kovov môže byť podľa meraného materiálu 10 až 180 sekúnd. Výsledok skúšky sa označuje iba číslom tvrdosti a písmenami *HB*, teda napr. 280 *HB*. Priemer odtlačku *d* sa meria vhodným meracím prístrojom v dvoch na seba kolmých smeroch. Rozdiel medzi oboma nameranými hodnotami nesmie prekročiť 5%. Povrch skúšaného predmetu musí byť rovný, hladký a bez nečistôt. Hrúbka predmetu nesmie byť menšia ako osemnásobok hĺbky odtlačku. Vzdialenosť stredu odtlačku od okraja vzorku má byť minimálne 2,5*d* u ocelí a liatin, 3*d* u neželezných kovov, pričom musí byť splnená podmienka $0,25D < d < 0,6D$. K rýchlemu vyhodnoteniu tvrdosti slúžia tabuľky, v ktorých sa pre nameraný priemer odtlačku, užité zaťaženie a priemer guľôčky odčíta tvrdosť *HB*. [12]



Obr. 28. Meranie tvrdosti podľa Brinella

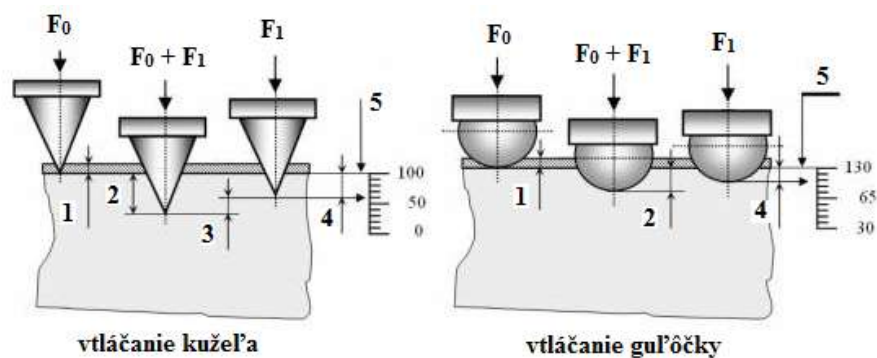
3.1.2 Skúšky tvrdosti podľa Rockwella

Vnikajúcim telieskom je diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° a zaoblením hrotu 0,2 mm alebo kalená ocelová guľôčka o priemere $1/16''$ ($=1,5875$ mm). Meria sa hĺbka odtlačku dosiahnutého za definovaných podmienok vťahovaní vnikajúceho telesa a pri vylúčení vplyvu povrchu skúšaného telesa a jeho odpruženia. Vnikajúce teleso sa najskôr zaťaží predbežným zaťažením F_0 . Stupnica hĺbkomeru sa nastaví v zaťaženom stave do počiatočnej polohy. Potom začne pôsobiť prídavné zaťaženie F_1 (celkové zaťaženie $F = F_0 + F_1$). Po odľahčení na zaťaženie F_0 sa na hĺbkomere odčíta priamo tvrdosť na príslušnej stupnici. Tvrdosť je potom určená zo vzťahov pre rôzne prevedenia skúšky:

$$HRA, HRC, HRD = 100 - \frac{h}{0,002} \quad , \quad HRN, HRT = 100 - \frac{h}{0,001}$$

$$HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK = 130 - \frac{h}{0,002}$$

Meraný povrch musí byť rovný, vzorka musí ležať na nepoddajnej podložke a jej hrúbka musí byť najmenej osemnásobok hĺbky trvalého odtlačku. Vďaka malej hĺbke odtlačku je táto metóda vhodná i pre meranie tvrdosti tenkých povrchových vrstiev a tenko stenných výrobkov. Podľa vnikajúceho telieska a veľkosti zaťaženia sú jednotlivé stupnice tvrdosti podľa Rockwella označené HRC, HRB, HRA, HRN, HRT. Pre tvrdé materiály sú vhodné metódy *HRC*, *HRA*, *HRN*, kedy do materiálu vniká diamantový kužeľ, pričom pre krehké látky (spekané karbidy), tenké vrstvy, alebo tenké vzorky sa volí nižšie zaťaženie. Modifikácie s guľôčkou sú vhodné pre mäkkšie kovy a zliatiny. [12]



Obr. 29. Meranie tvrdosti podľa Rockwella

3.1.3 Skúšky tvrdosti podľa Vickersa

Vnikajúcim telieskom pri skúške tvrdosti podľa Vickersa je diamantový štvorboký ihlan s vrcholovým uhlom 136° . Tvrdosť sa vyjadruje ako pomer zaťaženia vnikajúceho telieska F k ploche odtlačku (plášť ihlanu):

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2}, \quad HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

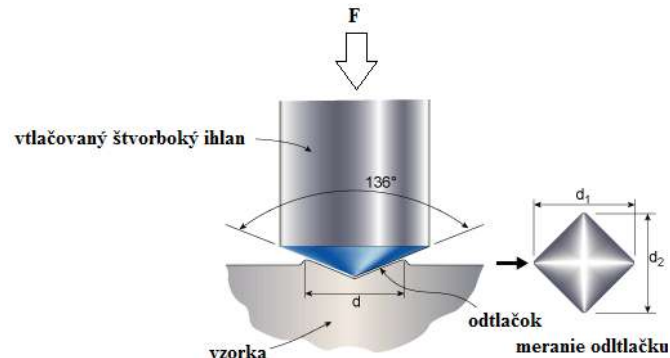
prípadne

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Kde: F – záťažová sila (N), d – aritmetický priemer dĺžky uhlopriečok odtlačku (mm).

Tvrdosť sa označuje bezrozmerným číslom pred písmenami *HV*. Odtlačky pri skúške podľa Vickersa sú i pri rôznom zaťažení geometricky podobné a zaťaženie možno preto voliť ľubovoľne. Prakticky sa používajú zaťaženia odstupňované v desiatich stupňoch od 9,8 do 980 N. Vzhľadom k malým rozmerom odtlačku je často potrebná úprava meraného povrchu brúsením a leštením. Hrúbka predmetu musí byť rovná alebo väčšia než $1,5 d$. Tak-

tiež najmenšia vzdialenosť odtlačku od okraja vzorku je stanovená normou. Uhlopriečky odtlačku sa merajú obvykle mikroskopom s požadovanou presnosťou ($\pm 0,001$ mm pri dĺžke do 0,2 mm a $\pm 0,5$ % pri dĺžke nad 0,2 mm). [12]



Obr. 30. Meranie tvrdosti podľa Vickersa

3.2 Meranie mikrotvrdomerom

Pri štúdiu mikroštruktúry kovov a zliatin je niekedy treba určiť i tvrdosť jednotlivých štruktúrnych zložiek k posúdeniu ich vlastností, prípadne k ich identifikácií. Inokedy je treba merať tvrdosť drobných a tenkých súčastí. To predpokladá vytvorenie veľmi malého presne umiestneného odtlačku a teda i použitie veľmi malých zaťažení. K tomu slúžia mikrotvrdomery, ktoré sú buď súčasťou metalografických mikroskopov alebo sa používajú samostatne. Vnikajúcimi telieskami sú diamantové hroty. Skúšky tvrdosti s malým zaťažením na diamant, aj keď sú zhodné s bežnými skúškami makrotvrdomerom, sa prakticky uplatnili až po roku 1935. Zatiaľ čo pri makrotvrdomerom sa zisťuje tvrdosť kovu ako kryštalického celku, je možno pri mikrotvrdomerom stanoviť tvrdosť jednotlivých štruktúrnych súčastí kovu. Pri použití veľmi malého zaťaženia, akého sa používa pri meraní mikrotvrdomerom, je odtlačok tak malých rozmerov, že nepresiahne oblasť jednej štruktúrnej oblasti. Skúškami mikrotvrdomerom je teda možné určiť tvrdosť jednotlivých štruktúrnych súčastí a z nej určovať nerovnorodosť materiálu v závislosti na jeho chemickom zložení, spôsobe spracovania a mikroskopickom usporiadaní. Sila, ktorou sa vtlačuje skúšobné teliesko do skúšaného vzorku, je v tomto prípade ďaleko menšia, ako je tomu pri skúškach makrotvrdomerom. K tomuto zisťovaniu musí byť skúšaný predmet pripravený ako na mikroskopické pozorovanie to znamená že musí byť vybrúsený, vyleštený a leptaný. Pretože odtlačky pri skúšaní mikrotvrdomerom sú malé, je použitie tejto metódy vhodné pre:

- malé alebo tenké súčastky,

- meranie tvrdosti malých, vybratých oblastí skúšanej vzorky,
- meranie mikrotvrdosti štruktúrnych zložiek a fáz,
- hodnotenie vrstiev po chemicko-tepelnom spracovaní,
- meranie tvrdosti veľmi tenkých kovových a iných anorganických povlakov,
- hodnotenie zvarových spojov,
- pre hodnotenie oduhlčujúcich procesov,
- štúdium difúzných pochodov,
- meranie krehkých materiálov atď.

Oblasť praktického použitia skúšok mikrotvrdosti je veľmi široká. Napríklad pri zisťovaní tvrdosti v brite nástroja, alebo veľmi blízko hrany, zisťovanie tvrdosti jemných drôtov, najjemnejších plechov, povrchových tvrdých vrstiev, pokovovaných predmetov, ochranných náterov atď. [11,12,13]

3.2.1 Meranie mikrotvrdosti podľa Vickersa

Skúška tvrdosti podľa Vickersa je predpísaná európskou normou, a to pre tri rozdielne oblasti skúšobného zaťaženia uvedené v tabuľke 4.

Tab. 4. Tvrdosť podľa Vickersa - oblasti skúšobného zaťaženia pre kovové materiály

Oblasť skúšobného zaťaženia, F (N)	Symbol tvrdosti	Predchádzajúce zaťaženie (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

Mikrotvrdosť s použitím Vickersového ihlanu je určovaná podobne ako bolo popísané u Vickersovho spôsobu pri skúške makrotvrdosti. Podstatou skúšky je vnikanie diamantového telesa v tvare pravidelného štvorbokého ihlanu so štvorcovou základňou a daným vrcholovým uhlom (136°) medzi protíahlými stenami. Teleso je vtlačované do povrchu skúšaného vzorku a následne je meraná uhlopriečka odtlačku, ktorá zostane po odľahčení skúšobného telesa.

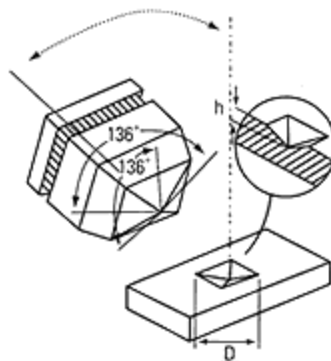
Tvrdosť podľa Vickersa je následne vyjadrená ako pomer skúšobného zaťaženia k ploche odtlačku, ktorý sa uvažuje ako pravidelný štvorboký ihlan so štvorcovou základňou a s vrcholovým uhlom rovnajúcim sa uhlu vnikajúceho telesa (136°):

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2}, \quad HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Pretože pri skúške mikrotvrlosti je vnikajúca sila F malá, uvádza sa v gramoch. Rovnako vzniknutý odtlačok je malých rozmerov, takže uhlopriečka d je meraná v μm (0,001 mm).

K výpočtu tvrdosti možno pri dosadzovaní týchto veličín použiť vzťah: $HV = 189 \cdot \frac{F}{d^2}$.

Takto je možné jednoducho vypočítať hodnotu mikrotvrlosti po určení vtláčovanej sily F [g] a po zmeraní uhlopriečky d [μm] meracím zariadením. [11,13]



Obr. 31. Meranie mikrotvrlosti - dtláčok prevedený metódou podľa Vickersa

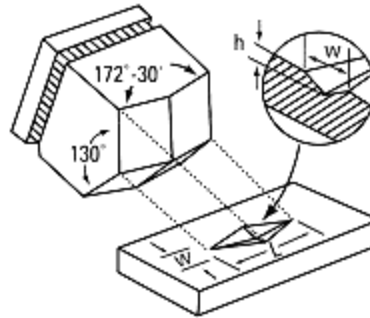
3.2.2 Meranie mikrotvrlosti podľa Knoop

Mikrotvrdomer podľa Knoop sa líši od predchádzajúcich typov mikrotvrdomerov predovšetkým tvarom ihlanu. Knoopov diamantový ihlan je vybrúsený tak, že vytvára podlhovasté kosodĺžnikové odtlačky. Vtláčením diamantového ihlanu tohto tvaru vznikne odtlačok tvaru kosodĺžnika s pomerom uhlopriečok 7,11 : 1. Hĺbka odtlačku je asi 1/30 dĺžky dlhej uhlopriečky. Zaťaženie na diamantový ihlan možno meniť v rozsahu od 25 g do 3600 g. Dĺžka odtlačku v tomto rozmedzí zaťaženia sa pohybuje medzi 20 až 1000 μm . Vnikajúce teleso v tvare diamantového ihlanu s kosoštvorcovou základňou s predpísanými uhlami protihľých strán je vtláčované do povrchu skúšaného telesa. Následne je meraná dlhšia uhlopriečka odtlačku, ktorý zostane po odľahčení skúšobného zaťaženia F . Tvrdosť podľa Knoop je následne vyjadrená ako pomer skúšobného zaťaženia k ploche odtlačku, ktorý

sa uvažuje ako ihlan s kosoštvorcovou základňou a s vrcholovými uhlami rovnajúce sa uhlom vnikajúceho telesa:

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

Kde: l - dĺžka uhlopriečky [mm], F - skúšobné zaťaženie [N], konštanta - $\frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} = 0,102$, konštanta vnikajúceho telesa - $c = \frac{\tan \beta/2}{2 \cdot \tan \alpha/2} = 0,07028$.



Obr. 32. Meranie mikrotvrdości podľa Knoopa

Tvrdość podľa Knoopa sa označuje symbolom HK za ktorým nasleduje číslica charakterizujúca veľkosť skúšobného zaťaženia a doba pôsobenia skúšobného zaťaženia v sekundách, ak sa líši od predpísanej doby (10-15 s).

Pr.: 640 HV 0,1 = tvrdość podľa Knoopa 640 stanovená pri skúšobnom zažití 0,9807 N pôsobiacom po dobu od 10 do 15 s.

Rovnako ako pri meraní tvrdości podľa Vickersa musí byť umožnené presné meranie dĺžky uhlopriečky odtlačku. Hodnotená skúšobná vzorka musí mať hladký a rovný povrch, bez mazadiel a cudzích teliesok. Hodnotená vzorka sa teda pripravuje ako metalografický výbrus, tzn. nesmie dôjsť k deformačnému, alebo tepelnému ovplyvneniu povrchu. Bežne sa príprava prevádza brúsením za mokra a leštením na diamantových pastách, prípadne elektroleštením. Presná metodika prípravy vzorku sa volí podľa príslušného materiálu.

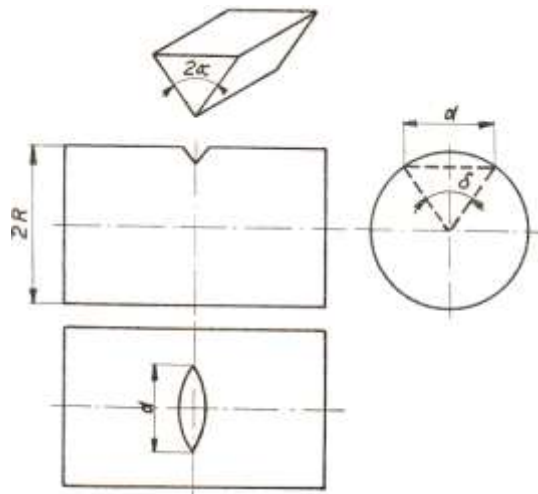
Skúšobné teleso musí byť uložené na tuhej podložke tak, aby sa behom skúšky nepohlo. Vnikajúce teleso sa zatlačuje do skúšobného telesa skúšobným zažitím smerujúcim kolmo k jeho povrchu. Doba od začiatku zažiovania až do jeho plnej hodnoty nesmie prekročiť 10 sekúnd. Rýchlosť približovania vnikajúceho telesa musí byť v rozmedzí od 15 $\mu\text{m/s}$ do 70 $\mu\text{m/s}$. Doba plného skúšobného zažitia musí byť v rozmedzí 10 až 15 sekúnd. Jednotlivé odtlačky musia byť umiestnené tak aby bola splnená podmienka, že vzdialenosť stredov dvoch susedných odtlačkov musí byť najmenej 3násobok kratšej uhlopriečky odtlačku (pre oceľ, meď a zliatiny medi) a najmenej 6násobok v prípade ľahkých

kovov, olova, cínu a ich zliatín. Vzdialenosť stredov každého odtlačku od okraja skúšobného vzorku musí byť najmenej 2,5 násobok kratšej uhlopriečky odtlačku (pre oceľ, meď a zliatiny medi) a najmenej 3 násobok v prípade ľahkých kovov, olova, cínu a ich zliatín.

Výhodou tohto merania je, že dovoľuje skúšanie tvrdosti krehkých materiálov, ako skla, porcelánu a keramiky, ktoré sa pri iných metódach triešťa. Nevýhodou je, že skúšaná vzorka musí byť veľmi dobre vybrúsená a vyleštená, inak nemožno špeciálnym mikroskopom odtlačok presne zmerať. [11,13]

3.2.3 Meranie mikrotvrdosti podľa Meincka a Attingera

Táto metóda je vhodná pre zisťovanie tvrdosti na jemných valcových predmetoch. Vtlačované skúšobné teleso má tvar klina s vrcholovým uhlom 2α a je vybrúsené z diamantu. Vtlačovanie sa prevádza tak, aby hrana klina bola kolmá k povrchovému vláknu predmetu. Tvar vzniknutého odtlačku je zobrazený na nasledujúcom obrázku na predmete o polomere R je dĺžka tohto odtlačku rovná d .



Obr. 33. Meranie mikrotvrdosti podľa Meincka a Attingera

Tvrdosť podľa Attingera je pomer záťažovej sily F k ploche odtlačku A za tých okolností, kedy $d=1/2 R$. Pretože je náročné previesť prakticky odtlačok s touto veľkosťou d , je nutné túto hodnotu získať extrapoláciou z vynesenej závislosti „ $F - d$ “, získanej z niekoľkých odtlačkov. Táto závislosť má v logaritmickej tvare priamkový charakter. Za týchto okolností sa plocha odtlačku približne vypočíta z dĺžky odtlačku d a polomeru skúšobného predmetu R :
$$A = \frac{d^3}{6R \cdot \cos \alpha}$$

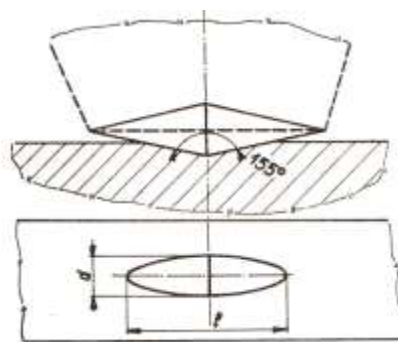
Ak je vrcholový uhol klina $2\alpha=100^\circ$, tak pri $d=1/2*R$ je povrch odtlačku $A=0,033R^2$ a tvrdosť podľa Attingera: $H_A = \frac{F}{0,033.R^2} \left[\frac{kg}{mm^2} \right]$ [13]

3.2.4 Meranie mikrotvrdosti podľa Chruščova a Berkoviča

Metóda Chruščova a Berkoviča je založená na podobnom princípe ako metóda Vickersova. Skúšobné teliesko je vtlačované na rozdiel od tejto metódy tvaru trojbokého ihlanu o uhle 65° medzi bočnými stenami a výškou. Hodnota mikrotvrdosti sa stanovuje zo vzorca: $H_{Ch} = \frac{1570.F}{l^2}$,kde F značí zaťaženie na ihlan v kilogramoch, l výšku zmeranú na trojuholníkovom odtlačku v μ . Výhodou tejto metódy možno vidieť v tom, že výroba odtlačeného telesa uvedeného tvaru z diamantu je jednoduchšia, než je tomu u Vickersovho ihlanu a preto i presnosť vypracovania je tu väčšia. Rovnako pri prevádzkovom namáhaní je tento tvar kryštálu menej citlivý na nárazy a neopatrné zaobchádzanie. [13]

3.2.5 Meranie mikrotvrdosti na dvojkuželi

V poslednej dobe sa dostáva do popredia metóda stanovenia mikrotvrdosti pomocou dvojkužela (Grodzinski). Skúšobné teleso má tvar dvojitého kužela, spojeného základňou a vtlačuje sa do skúšobného materiálu kolmo na smer osi súmernosti (na ležato). Týmto vznikajú odtlačky podobné odtlačkom Knoopovho ihlanu. Plášte oboch kuželov na základni zvierajú uhol 155° , takže vzniknutý odtlačok má pomer dĺžky k šírke 22:1 a pomer dĺžky k hĺbke odtlačku asi 80:1. Tento tvar skúšobného telesa dovoľuje skúšky tvrdosti na veľmi tvrdých materiáloch, ako sú karbidy bóru, kremíka a pod.



Obr. 1. Určovanie mikrotvrdosti metódou dvojkužela

K vyčísleniu tejto tvrdosti je daný vzťah:

$$H_{DC} = \frac{F}{A} \left[\frac{kg}{mm^2} \right]$$

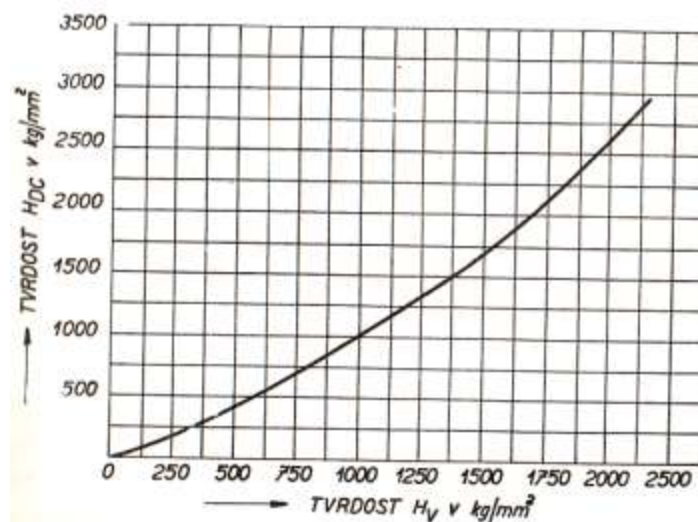
kde stanovenie plochy odtlačku A , ktorý je ohraničený dvomi hyperbolami platí vzťah:

$$A = \frac{l^3}{6r} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = cl^3 [\text{mm}^2]$$

Kde: α - značí uhol plášťa kužeľov, r - polomer základne oboch kužeľov (mm), l - dĺžku odtlačku (mm). Hodnota tvrdosti je potom daná vzťahom:

$$H_{DC} = \frac{F}{cl^3} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$$

Výhodu tejto skúšky mikrotvrdosti možno vidieť vo vhodnom tvare skúšobného telieska, ktoré je ťažko poškodiť, pretože nemá ostré brity a ľahko sa po opotrebení pootočí okolo pozdĺžnej osi, takže je veľmi dlho použiteľné. Zo zrovnania hodnôt tvrdosti rôznych materiálov získaných Vickersovým spôsobom a metódou dvojkužeľa je zrejmé, že pri vyšších tvrdostiach je metóda dvojkužeľa citlivejšia, nakoľko krivka tvrdosti je v tomto úseku strmšia. Uvedený diagram podľa Grodzinského znázorňuje približný priebeh tvrdosti, zistený meraním tvrdosti na 21 rôznych materiáloch od mäkkej elektrolyticky leštenej medi až po veľmi tvrdý karbid kremíka. [13]



Obr. 35. Diagram vzťahu medzi tvrdosťou na Vickersovom ihlane a na dvojkuželi

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

4 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE

Cieľom tejto diplomovej práce je zistiť teplotný vplyv delenia materiálov laserom na povrchovú vrstvu rôznych typov ocelí. Tento vplyv bude skúmaný meraním mikrotvrdości a to metódou podľa Vickersa. Meranie bude prebiehať na ôsmich vzorkách o rôznych rozmeroch a typoch ocelí. Aby sme mohli samotné vzorky ocelí dobre pozorovať a bolo možné skúšku mikrotvrdości previesť, musí byť povrch vzoriek vybrúsený a následne vyleštený, čím dosiahneme dobrú viditeľnosť jednotlivých odtlačkov pri samotnom meraní. Meranie bude prebiehať na digitálnom mikrotvrdomeri DM 2D od firmy Affri. Tvrdość materiálu bude meraná od okraju vzorky smerom k jej stredu. Na každej vzorke bude postupne prevedených pätnásť meraní, pričom prvé začína tesne za okrajom vzorky a ďalšie budú prevádzané po malých vzdialenostiach smerom ku stredu vzorky. Vzájomné vzdialenosti odtlačkov od seba budú približne v desatinách milimetrov v závislosti na konkrétnej kvalite povrchu. Hlavným cieľom je zistiť do akej vzdialenosti od okraju vzorky je materiál pri rezaní laserom tepelne ovplyvnený a ako sa zmení priebežne jeho tvrdość. Po nameraní konkrétnych hodnôt mikrotvrdości budú tieto veličiny vyhodnotené a uvedená ich grafická závislosť tvrdości povrchu na vzdialenosti od okraju vzorky.

Postup riešení:

- Vypracovanie literárnej štúdie na dané téma
- Príprava vzoriek pre skúšky mikrotvrdości – brúsenie, leštenie, ...
- Prevedenie meraní mikrotvrdości všetkých vzoriek na digitálnom mikrotvrdomeri
- Vyhodnotenie nameraných výsledkov v programe Microsoft EXCEL

5 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V experimentálnej časti bolo skúmané tepelné ovplyvnenie povrchu vzoriek, ktoré boli delené pomocou laseru. Samotná príprava vzoriek pomocou delenia laserom bola realizovaná vo firme TAJMAC-ZPS a.s., Zlín. Ostatná príprava vzoriek - brúsenie, leštenie a meranie mikrotvrdości bolo realizované v školských dielňach Ústavu výrobného inžinierstva na UTB v Zlíne v budove U5.

5.1 Prístroje použité pri príprave vzoriek a meraní mikrotvrdości

5.1.1 Popis prístroja na delenie materiálov laserom

Skúšobné vzorky boli pripravené na leseri typu TRUMPF vo firme TAJMAC-ZPS a.s., Zlín. Tento 2D-laserový rezací stroj pracuje na princípe "lietajúcej optiky", čo znamená, že pohybujúca sa rezacia laserová hlava opracováva fixne uložený obrobok na výmennom obrábacom stole. Pracovný rozsah je 1500 x 3000 mm a maximálne hrúbky materiálov k opracovaniu sú 20 mm (konštrukčná oceľ), 15 mm (nerezová oceľ) a 10 mm (hliník). Pre rôzne typy vzoriek, podľa ich hrúbky a typu materiálu, bol pre rezanie použitý adekvátny výkon a rýchlosť posuvu podľa priloženej tabuľky (Tab.5).

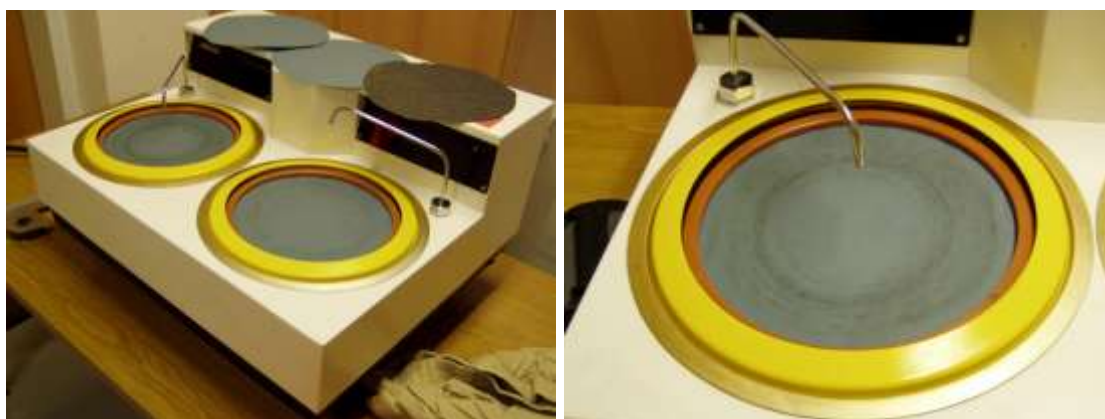


Obr. 36. 2D-laserový rezací stroj typu TRUMPF

Tab. 5. Výkon a posuv laseru pre rôzne hrúbky vzoriek

Hrúbka vzorku	Rýchlosť posuvu [mm/min]	Výkon [W]
2 mm	4755	1004
2,5 mm	3895	961
3 mm	3240	980
4 mm	2090	1837
5 mm	2790	3133
6 mm	2520	3153
8 mm	2050	3163
10 mm	1800	3090
12 mm	1500	3100
15 mm	990	3100
18 mm	808	3104
20 mm	808	3104

5.1.2 Popis prístroja na leštenie vzoriek



Obr. 37. Prístroj MTH na leštenie kovových vzoriek

Požiadavkami pri meraní mikrotvrdoosti je kovový lesk povrchu vzorky ($R_a \leq 0,2$), preto museli byť všetky vzorky dôkladne vyleštené. Leštenie bolo prevádzané na leštiacom prístroji MTH, v budove U5 UTB v Zlíne. Prístroj sa skladá z dvoch rotačných bubnov do ktorých je možné umiestniť leštiace papiere. Po spustení rotácie bola tiež na papiere pomocou sústavy kanálov pripojených na prívod vody rovnomerne nanášaná vrstva vody, ktorá je potrebná na dobré konštantné leštenie a odplavovanie nečistôt vzniknutých oddeľovaním mikročastíc zo vzorky. Na leštiace papiere boli postupne prikladané vzorky plochou, ktorá mala byť leštená. Leštené boli až pokiaľ nemali potrebný lesk.

5.1.3 Popis přístroja na meranie mikrotvrđosti



Obr. 38. Mikrovrđomer DM-2D

Prístroj prevádzajúci skúšku mikrotvrđosti sa nazýva mikrovrđomer. Tento moderný digitálny prístroj môže merať d_1 a d_2 priamo v digitálnej forme, potom priemer týchto hodnôt vypočíta počítač a prevedie sa výpočet HV na ďalšie spracovanie dát, takže je možné uspokojiť rôzne potreby. Súčasne je celý proces testu mikrotvrđosti riadený digitálne, aby sa dosiahlo vysoko efektívneho a presného merania. Mikrotvrđosť vo Vickersovej stupnici je zostatkový odtlačok na povrchu vzorky otláčený diamantovou penetračnou sondou v tvare pyramídy za pôsobenia určitého tlaku (zaťaženia) F , po určitej dobe pôsobenia a uvoľnenia. Táto plocha je A . Potom $HV = F/A$. Nakoľko základňa penetračnej sondy nie je obecné pravouhlá, predo d vo vzorci uvažujeme ako priemernú hodnotu d_1 a d_2 . Požiadavkami pri teste mikrotvrđosti je kovový lesk povrchu vzorky ($R_a \leq 0,2$) a minimálna hrúbka vzorku nesmie byť väčšia ako 1,5-násobok dĺžky diagonály odtlačku.

Použitie: Veľmi rozšírené je použitie pre skúšanie tvrđosti kovových materiálov. Hlavne pre skúšanie vytvrđnutej vrstvy kovových dielov po tepelnom spracovaní.

Tab. 6. Technické parametre mikrotvrdomera DM-2D



Názov	Parameter
Typ prístroja	DM-2D
Skúšobné zaťaženie	100g, 300g, 500g, 1000g
Metóda zaťažovania	Elektrický pohon, automatické zaťažovanie, uvoľnenie skúšobného zaťaženia
Doba trvania zaťaženia	5-60 s
Zmena šošovky	Automatická
Zväčšenie šošovky	Meranie: 40x, Pozorovanie: 10x
Digitálny okulár: znak ryhy	Základná nulová značka a značka zameriavania (ručne)
Digitálny okulár: rozlíšenie digitálneho displeja	Vnútorne: 0,03 μm , Displej: 0,1 μm
Postup merania d_1 a d_2	Ručné otáčanie meracieho okuláru
Maximálny rozmer vzorku	Výška 90 mm
Stôl pre vzorky	Rozmery: 110 x 110 mm, Posuv: 25mm, Minimálny posuv: 0,01mm
Ovládanie prístroja	Panelová klávesnica
Fotografická optická dráha	W
Celkové rozmery	490 x 250 x 395 mm (výška x šírka x hĺbka)
Hmotnosť	40 kg
Zdroj napájania	AC 220 V (+/- 10%), 50 alebo 60 Hz, 50W



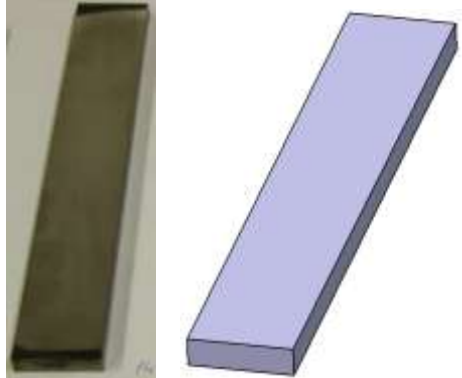
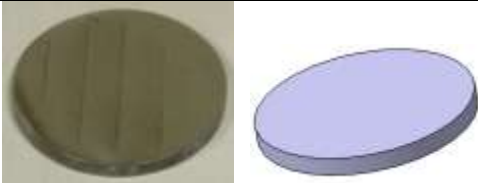
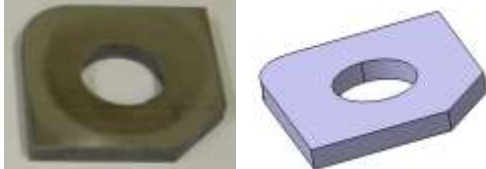
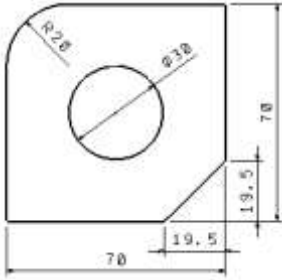

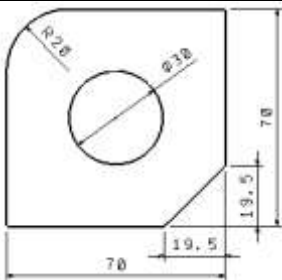
5.2 Skúšobné vzorky

5.2.1 Tvar, rozmery a triedy ocelí skúšobných vzoriek

Pre zisťovanie tepelného ovplyvnenia povrchovej vrstvy ocelí pri delení materiálu laserom bolo zadaných 8 vzoriek o rôznych typoch ocelí (viz. Tab.7). Vzorky u ktorých sa triedy ocelí opakovali mali rôzne rozmery, teda pri ich delení boli použité rôzne intenzity laserového lúču a tým bola rôzne teplotne ovplyvnená ich povrchová vrstva.

Tab. 7. Skúšobné vzorky

Vzorka	Trieda ocele	Tvar vzorku	Rozmery vzorku
1	14 260		Priemer: 49,5 mm Hrúbka: 4 mm
2	12 050		Priemer: 49,5 mm Hrúbka: 4 mm

3	11 523		Priemer: 48,9 mm Hrúbka: 11,8 mm
4	11 373		Priemer: 48,9 mm Hrúbka: 15,2 mm
5	14 260		Dĺžka: 180 mm Šírka: 29,7 mm Hrúbka: 8,3 mm
6	11 373		Priemer: 69,2 mm Hrúbka: 6 mm
7	11 373		 <p>Hrúbka: 7,9 mm</p>
8	12 050		 <p>Hrúbka: 7,9 mm</p>

5.2.2 Materiály použitých vzoriek

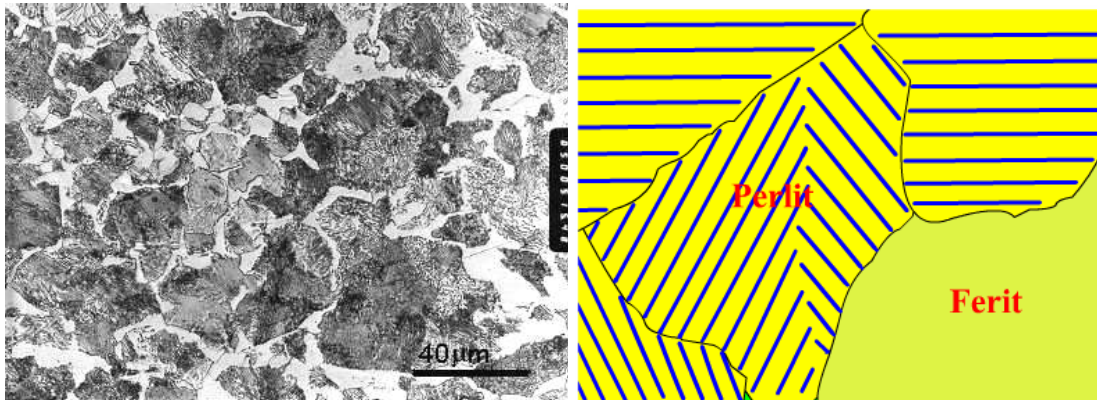
Vzorky boli pripravené z konštrukčných ocelí. Konkrétne boli na prípravu vzoriek použité ocele tried 14 260, 12 050, 11 523 a 11 373. Podľa toho o aký typ materiálu išlo, bola aj hrúbka tepelne ovplyvnenej vrstvy laserom rôzna. Bolo to spôsobené chemickým zložením konkrétnych materiálov a to hlavne podľa obsahu určitého percenta uhlíku. Čím väčšie množstvo uhlíku bolo v oceli obsiahnuté, tým bola tvrdosť HV ovplyvnenej vrstvy väčšia. V tabuľke 8 sú popísané konkrétne vlastnosti a chemické zloženia použitých materiálov.

Tab. 8. Chemické zloženie materiálov vzoriek

Trieda ocele	Chemické zloženie (hmotnosť v %)									
	C (max.)	Mn (max.)	Cr (max.)	Si (max.)	Ni (max.)	Cu (max.)	P (max.)	S (max.)	W (max.)	N (max.)
14 260	0,50-0,60	0,55	1,45	0,65	-	-	-	-	0,6	-
12 050	0,42-0,50	0,50-0,80	0,25	0,17-0,37	0,30	0,30	0,040	0,040	-	-
11 523	0,20	1,60	-	0,55	-	-	0,040	0,040	-	0,009
11 373	0,17	-	-	-	-	-	0,045	0,045	-	0,007

5.3 Premena štruktúry povrchu pri tepelnom ovplyvnení na príklade jedného vzorku ocele triedy 12 050 (vzorka 2)

Na príklade tejto vzorky je zobrazená premena štruktúry povrchu vzorky v závislosti na tepelnom ovplyvnení v mieste rezu. Materiál bol delený na leseri typu TRUMPF. Podľa hodnôt v tabuľke 5 bol podľa hrúbky vzorky (4 mm) použitý na delenie materiálu výkon laseru 1837 W a rýchlosť posuvu 2090 mm/min. Ako je vidieť na obrázku 39, počiatočná štruktúra ocele 12 050 po normalizácii vykazuje lamelárny perlit a feritickú sieť po hranici zrn.



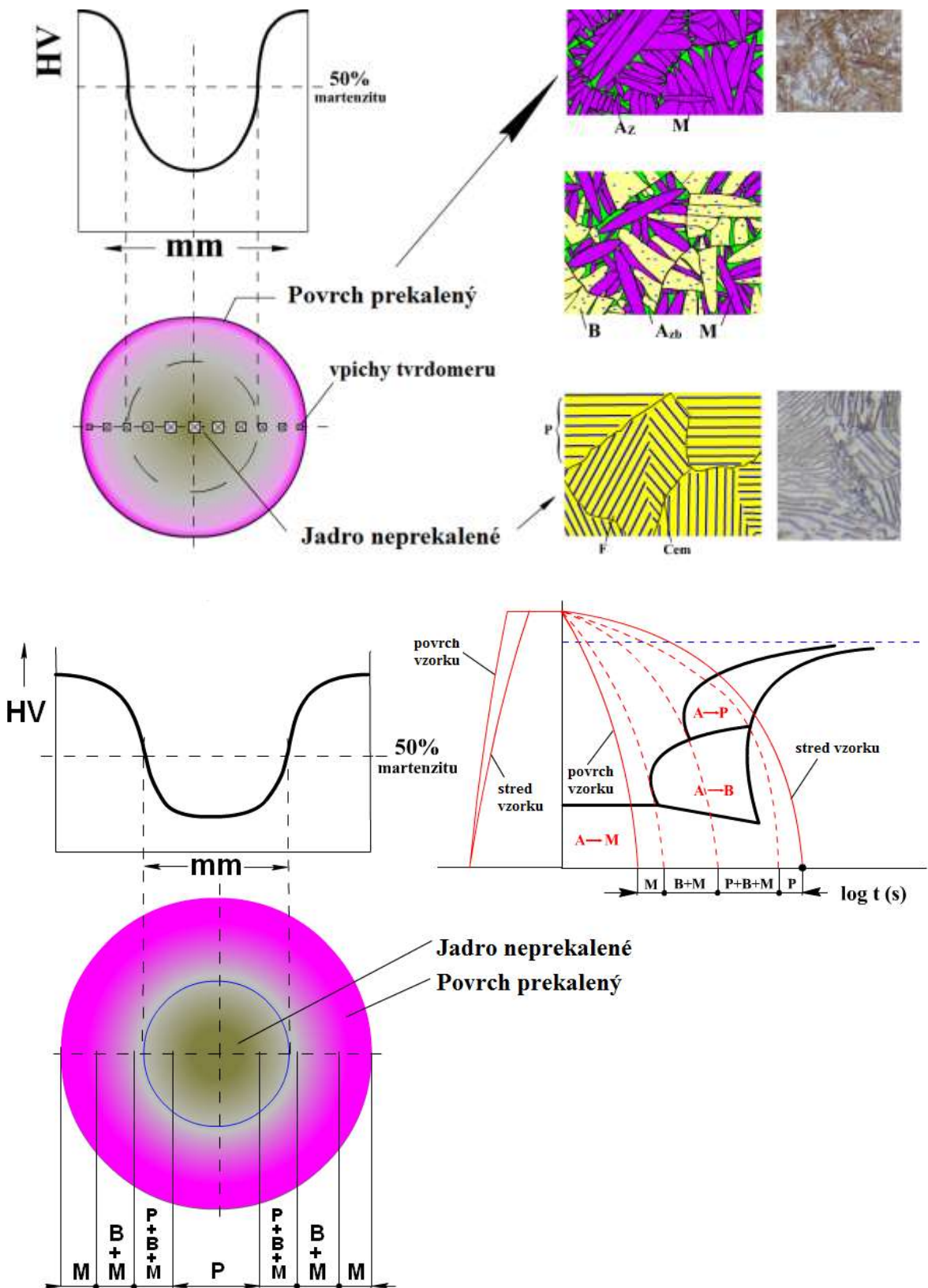
Obr. 39. Počiatočná štruktúra ocele 12 050

Pomocou merania mikrotvrdości je možné pomerne presne identifikovať a rozlíšiť jednotlivé štruktúrne súčasti v konkrétnych oblastiach vzorky. Tabuľka 9 uvádza rozsah tvrdostí jednotlivých štruktúrnych zložiek a fáz v zliatinách Fe – Fe₃C.

Tab. 9. Tvrdość štruktúrnych zložiek a fáz

Fáze a štruktúrne zložky	Tvrdość podľa Vickersa
Fe	85
Ferit	85-130
Austenit	120-180
Austenit spevnený	Až 800
Perlit hrubý	200-250
Perlit jemný	250-300
Bainit horný	300-400
Bainit dolný	400-550
Martenzit nízkouhlíkový	600-700
Martenzit vysokouhlíkový	700-850

Pri delení laserom sa začala štruktúra povrchu meniť ako je vidieť na obrázku 40. K najintenzívnejšiemu tepelnému ovplyvneniu došlo priamo na povrchu vzorky, kde bol priamy kontakt s lúčom laseru. V zakalenej povrchovej štruktúre došlo k premene perlitickej štruktúry na martenzitickú, kde sa nachádza martenzit, bainit, perlit ako aj zostatkový austenit. Zmena bola spôsobená vysokým rozdielom teploty v mieste rezu a teploty okolia. Z toho dôvodu došlo k rýchlemu ochladeniu, ktoré vytvorilo v mieste rezu a jeho okolí nerovnovážny stav (kalenie). Štruktúra smerom ku stredu vzorky sa mení na počiatočnú štruktúru z čoho vyplýva, že jadro ostalo nezakalené (bez tepelného ovplyvnenia). V závislosti na hrúbke vzorky a percentách obsahu uhlíku je aj hrúbka tepelne ovplyvnenej vrstvy, tvrdosť HV a teda aj štruktúra pri rôznych vzorkách o rôznych typoch ocelí rozdielna, čo je konkrétne popísané pri vyhodnotení každej vzorky.

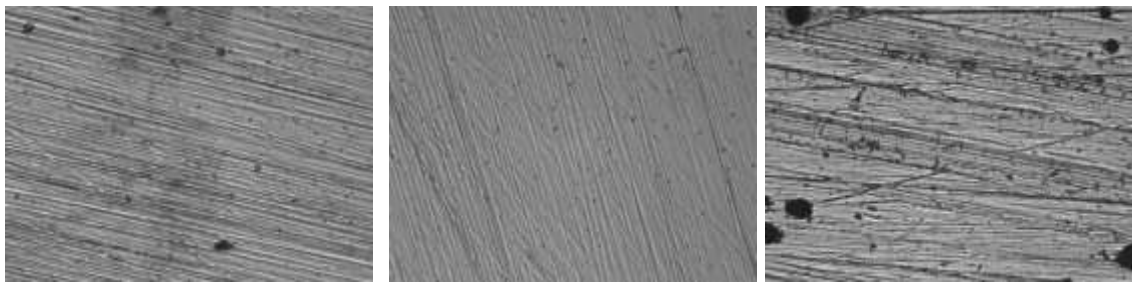


Obr. 40. Štruktúra ocele 12 050 po tepelnom ovplyvnení

5.4 Postup merania

5.4.1 Príprava vzoriek

Vzorky o rôznych rozmeroch a tried ocelí, ktoré som dostal zadané od vedúceho diplomovej práce boli už narezané na požadovaný tvar. Táto fáza prípravy vzoriek bola prevádzaná v Zlínskej firme TAJMAC-ZPS a.s., na ktorú som nemal žiadny vplyv. Pri delení vzoriek bol podľa hrúbky a typu materiálu nastavený rôzny výkon laserového lúča a rýchlosť posuvu, aby došlo k dokonalému rozdeleniu materiálu. Tým pádom bolo i tepelné ovplyvnenie materiálu závislé od intenzity laserového lúča (výkonu). Aby som mal meraný povrch vzoriek kvalitnejší, zabezpečil mi vedúci diplomovej práce ich vybrúsenie v dielni na ústave výrobného inžinierstva FT UTB. Mojou prvou úlohou bolo vzorky dokonale pripraviť na samotné meranie mikrotvrdomosti. Aby bolo toto meranie možné, musel som povrchy vzoriek dokonale vyleštiť, aby boli odtlačky v materiáli dobre viditeľné, nakoľko sa pri meraní pracuje v mikrometroch. Vzorky som si postupne pripevňoval na magnet a pritláčal ich na rotujúci leštiaci papier. Ten bol automaticky vlhčený vodou, aby nedochádzalo k poškodeniu leštiaceho papiera a aby boli oddelené častice z lešteného povrchu odplavované z miesta styku plochy materiálu s leštiacim papierom. Leštenie každého zo vzoriek prebiehalo dovtedy, pokiaľ nebol povrch materiálu dokonale lesklý. Po príprave vzoriek som začal samotné meranie mikrotvrdomosti. Na obrázkoch môžeme vidieť povrch niektorých vyleštených vzoriek.



a)

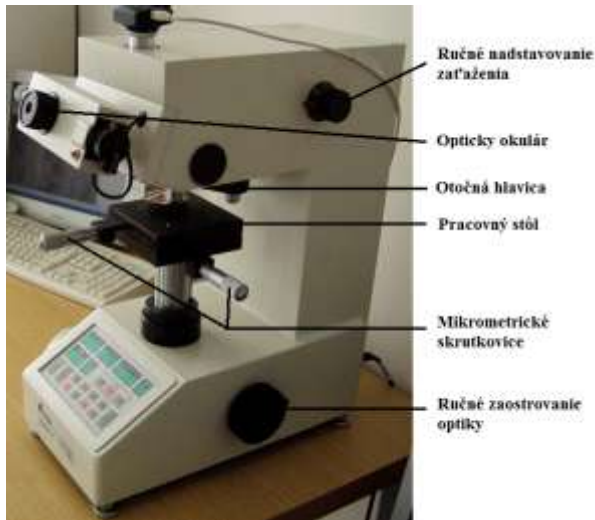
b)

c)

Obr. 41. Povrch vzoriek po vyleštení: a) 12 050, b) 11 373, c) 14 260

5.4.2 Meranie mikrotvrdomosti

Ďalšou fázou mojej diplomovej práce bolo meranie mikrotvrdomosti pripravených vzoriek na digitálnom mikrotvrdomeri DM-2D, ktorý sa nachádza v laboratóriu ústavu výrobného inžinierstva FT UTB. Vzorky boli postupne podrobené tomuto meraniu a všetky hodnoty zaznamenané na ďalšie spracovanie. Meranie som realizoval na každej vzorke pre 3 zaťaženia (100g, 300g, 500g). Po nastavení prístroja na požadované parametre som vzorky postupne vkladal na pracovný stôl prístroja, ktorý bol polohovateľný v pozdĺžnom i pričnom smere pomocou mikrometrickej skrutkovice. Pracovný stôl bol vždy pred začiatkom merania každej vzorky nastavený na nulové hodnoty súradníc. Každú vzorku som si na začiatku nastavil tak, aby meranie začínalo od okraja jej povrchu, prípadne v čo najmenšej vzdialenosti od okraja, na ktorej mohlo byť prevedené prvé meranie. Následne som postupoval v meraní mikrotvrdomosti smerom do jej stredu po vzdialenostiach približne 0,1 mm. Tieto vzdialenosti boli priebežne upravované v závislosti na kvalite povrchu materiálu v danej oblasti merania, aby bol odtlačok dobre viditeľný a merateľný. Na každej vzorke a pre každé zaťaženie bolo prevedených 15 meraní ak nebolo potrebné inak. Každé zaťaženie po dosiahnutí maximálneho predvoleného tlaku zotrvalo na tejto hodnote po dobu 15 sekúnd, čo bol dostatočný čas pre ocel' na vytvorenie odtlačku. Pri každom prevedení odtlačku bola vypočítaná hodnota mikrotvrdomosti HV (uhlopriečky d_1 a d_2) pomocou PC programu komunikujúceho s mikrotvrdomerom a to buď automaticky alebo ručne podľa kvality odtlačku. Všetky hodnoty som si zaznamenal k ďalšiemu spracovaniu výsledkov. Pri sledovaní povrchu sa pracovalo pri optickom zväčšení a muselo dochádzať pri každom meraní k zaostrovaniu povrchu pomocou ručnej regulácie pracovného stola, aby bol odtlačok dokonale viditeľný. Meranie mikrotvrdomosti a pozorovanie odtlačku bolo realizované pomocou otočnej hlavice mikrotvrdomeru, ktorá obsahovala dva objektívy pre dve rôzne zväčšenia a sondu prevádzajúcu vtláčanie kužeľa do povrchu vzorku pre predvolené zaťaženie.

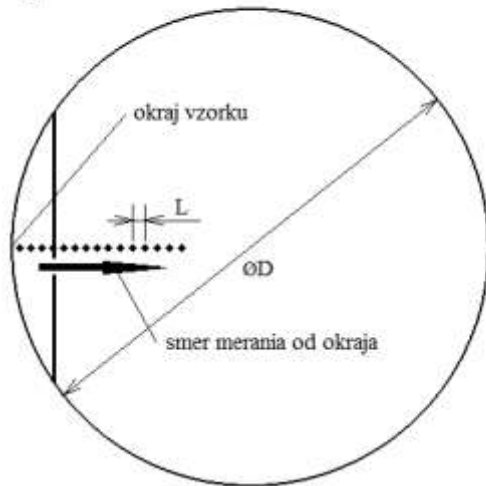
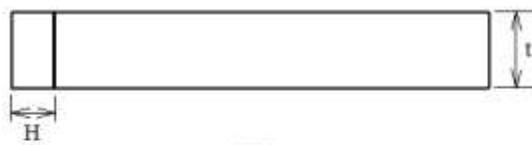


a)



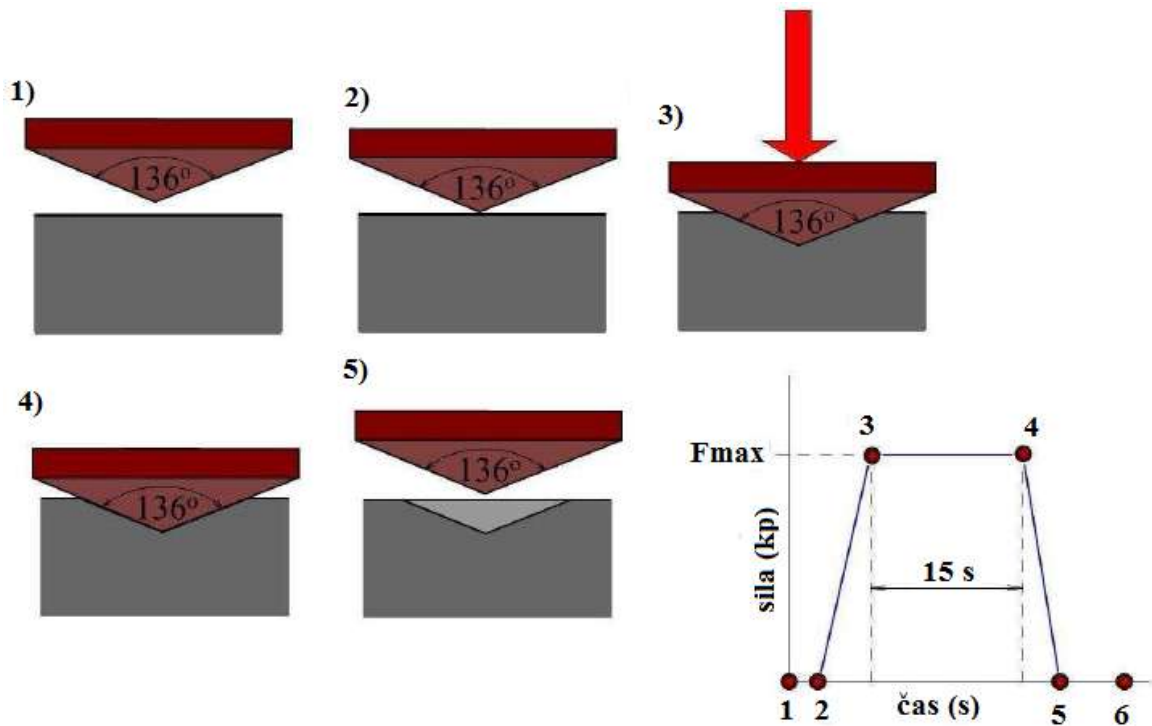
b)

Obr. 42. a) Používané komponenty pri meraní, b) Detail pracovného stolu

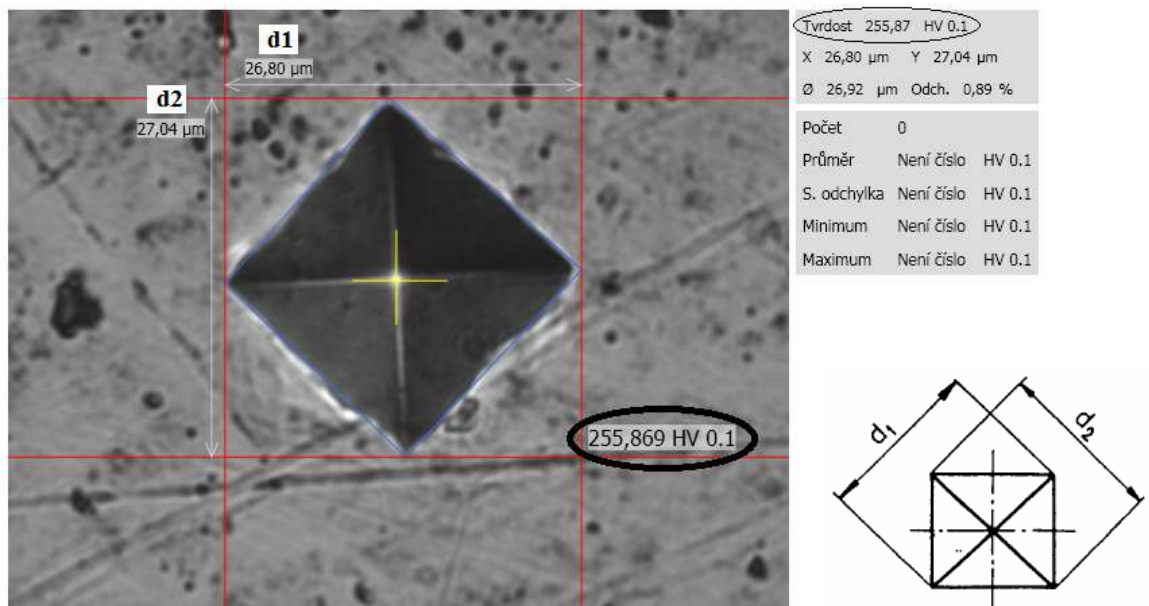


- ØD - priemer vzorku
- t - hrúbka vzorku
- H - hĺbka tepelne ovplyvnenej vrstvy
- L - vzdialenosť stredov odtláčkov (približne 0,1 mm)

Obr. 43. Príklad postupu merania mikrotvrдости na jednom vzorku



Obr. 44. Priebeh zaťažovania pri skúške mikrotvrdosti



Obr. 45. Spôsob vyhodnotenia hodnoty tvrdosti

5.4.3 Vyhodnotenie

Po nameraní a zaznamenaní hodnôt mikrotvrdosti všetkých vzoriek pre všetky zaťaženia som tieto hodnoty vložil do pripraveného programu v softvare Microsoft EXCEL, v ktorom som merania číselne i graficky vyhodnotil a popísal požadované závery.

6 VYHODNOTENIE NAMERANÝCH VELIČÍN

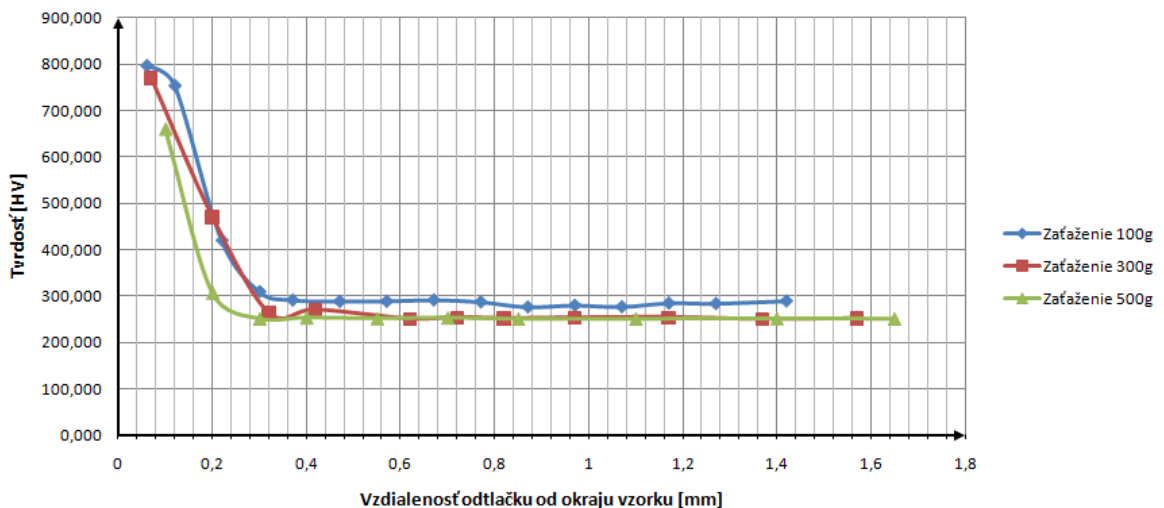
6.1 Vzorka 1 (materiál 14 260)

6.1.1 Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 14 260

Tab. 10. Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 14 260

Vzorka 1 (materiál 14 260)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]
1	0,06	798,136	7,29	1	0,07	769,958	3,21	1	0,10	661,111	0,45
2	0,12	754,768	0,13	2	0,20	469,660	0,30	2	0,20	307,845	2,38
3	0,22	420,896	1,25	3	0,32	262,813	0,64	3	0,30	251,769	3,79
4	0,30	310,293	1,74	4	0,42	269,981	1,73	4	0,40	253,924	2,64
5	0,37	291,901	2,31	5	0,62	250,386	4,69	5	0,55	252,426	3,05
6	0,47	288,947	0,18	6	0,72	253,634	1,71	6	0,70	253,516	0,94
7	0,57	289,253	0,58	7	0,82	251,154	3,02	7	0,85	251,233	1,42
8	0,67	292,045	2,72	8	0,97	252,710	0,81	8	1,10	251,393	1,51
9	0,77	287,840	0,90	9	1,17	253,660	0,47	9	1,40	252,054	0,45
10	0,87	277,010	1,31	10	1,37	249,265	0,38	10	1,65	251,371	2,07
11	0,97	280,550	5,48	11	1,57	251,215	2,37	11	2,00	248,678	1,08
12	1,07	277,418	0,37	12	1,87	250,229	1,09	12	2,35	252,786	1,36
13	1,17	285,362	1,87	13	2,87	252,736	1,52	13	2,90	251,111	0,12
14	1,27	284,412	2,16	14	3,87	253,117	0,07	14	3,00	254,502	1,75
15	1,42	289,918	1,87	15	4,07	253,277	0,85	15	4,00	251,575	2,57
Priemerná odchýlka [%]			2,01	Priemerná odchýlka [%]			1,52	Priemerná odchýlka [%]			1,71

6.1.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 46. Priebeh mikrotvrdości u materiálu 14 260 (vzorka 1)

6.1.3 Záver a diskusia výsledkov

Z nameraných výsledkov mikrotvrdości vyplýva, že najvyššia hodnota mikrotvrdości u materiálu 14 260 (vzorka 1) bola nameraná 798,1HV pri zaťažení 100g. Hodnota nameranej

tvrdosti zodpovedá štruktúre martenzitu. U ocele 14 260 došlo pri rezaní laserom k tepelnému ovplyvneniu povrchovej vrstvy v mieste rezu, kde došlo k zakaleniu tejto vrstvy a tým ku vzniku martenzitickej štruktúry. Je to dané chemickým zložením materiálu. Veľmi dôležitým zistením je tiež hĺbka ovplyvnenej vrstvy. Tá dosahuje hodnôt približne do 0,25 mm. Po prekročení tejto hodnoty dochádza k ustáleniu hodnôt mikrotvrdosti na približne 250 až 280HV (Obr. 46, Tab. 10), čo zodpovedá vychádzajúcej perlitickej štruktúre. Zakalenie povrchovej vrstvy je spôsobené teplotným rozdielom v mieste rezu a jeho okolím. Teplota v mieste rezu pri použití laserového lúču dosahuje 100 000°C, zatiaľ čo teplota okolia sa pohybuje okolo 20°C. Ako veľmi zaujímavé sa javia veľkosti použitej záťaže. S rastúcou záťažou dochádza k poklesu hodnôt mikrotvrdosti v ovplyvnenej vrstve rezaného materiálu. Čím vyššie bolo aplikované zaťaženie, tým menšia hodnota mikrotvrdosti bola nameraná.

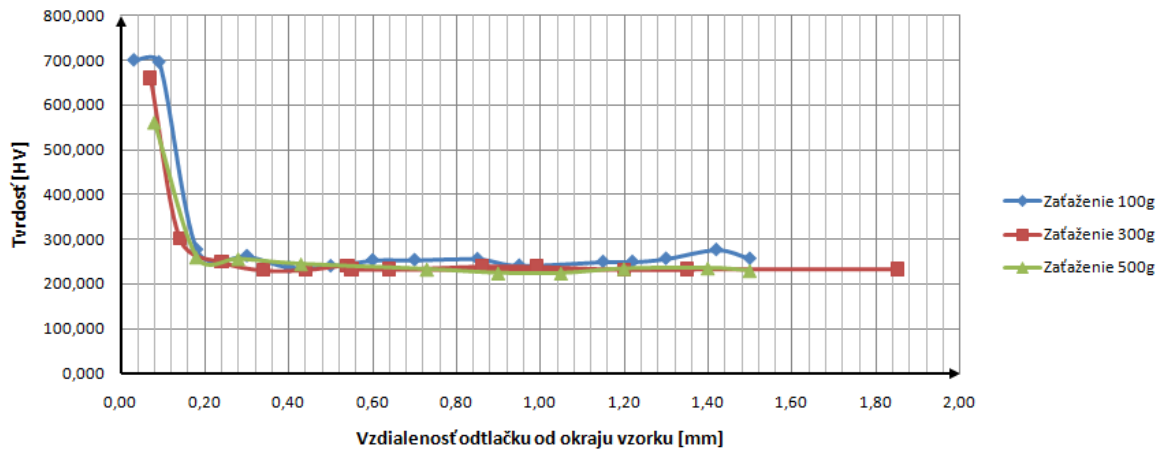
6.2 Vzorka 2 (materiál 12 050)

6.2.1 Namerané hodnoty mikrotvrdosti u materiálu 12 050

Tab. 11. Namerané hodnoty mikrotvrdosti u materiálu 12 050

Vzorka 2 (materiál 12 050)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]
1	0,03	700,400	3,91	1	0,07	660,836	0,52	1	0,08	559,442	1,18
2	0,09	696,045	1,79	2	0,14	301,203	0,75	2	0,18	260,049	1,00
3	0,18	276,437	0,38	3	0,24	249,280	0,74	3	0,28	256,178	3,26
4	0,30	262,570	0,46	4	0,34	230,572	3,75	4	0,43	244,698	1,67
5	0,40	237,302	0,69	5	0,44	231,466	1,34	5	0,73	233,011	2,95
6	0,50	239,959	1,85	6	0,54	241,569	2,93	6	0,90	224,716	2,49
7	0,60	253,040	7,11	7	0,64	233,132	0,90	7	1,05	224,176	0,17
8	0,70	253,617	0,98	8	0,86	239,061	0,82	8	1,20	234,281	0,39
9	0,85	255,869	0,89	9	0,99	238,595	0,91	9	1,40	235,601	1,95
10	0,95	241,320	5,59	10	1,20	231,807	2,03	10	1,50	230,003	0,97
11	1,15	249,528	1,83	11	1,35	232,684	2,07	11	1,80	235,422	0,83
12	1,22	249,652	3,15	12	0,55	232,783	0,16	12	2,50	236,434	2,34
13	1,30	256,677	1,77	13	1,85	233,024	3,69	13	3,05	235,211	0,74
14	1,42	276,471	1,63	14	2,17	232,506	0,60	14	3,50	235,788	1,42
15	1,50	256,610	1,04	15	2,50	239,164	3,14	15	4,20	231,344	1,79
Priemerná odchýlka [%]			2,20	Priemerná odchýlka [%]			1,62	Priemerná odchýlka [%]			1,54

6.2.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 47. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 12 050 (vzorka 2)

6.2.3 Záver a diskusia výsledkov

Pri meraní mikrotvrdosti povrchovej vrstvy u materiálu 12 050 (vzorka 2) bolo zistené, že najvyššia nameraná hodnota dosiahla hodnotu okolo 700HV pri zaťažení 100g. Nameraná hodnota tvrdosti reprezentuje štruktúru martenzitu. Tá vznikla v povrchovej vrstve pri reznom procese, kedy bol materiál delený laserom. Pri rezaní laserom sa teplota v mieste rezu pohybuje okolo 100 000°C, zatiaľ čo teplota okolia dosahuje približne hodnotu 20°C. Tento výrazný teplotný spád spôsobuje chladenie miesta rezu vysokou rýchlosťou (kritickou), čo má za následok vznik martenzitickej štruktúry. Materiál 12 050 je svojim chemickým zložením vhodný pre tepelné spracovanie, povrchové kalenie. Jeho chemické zloženie, najmä obsah uhlíku potvrdzuje, že materiál je schopný dosiahnuť štruktúry martenzitu. Hĺbka ovplyvnenej vrstvy je však minimálna. Dosahuje veľkosť do 0,15 mm. Po prekročení tejto vzdialenosti od okraju vzorky dochádza k výraznej zmene mikrotvrdosti povrchovej vrstvy. Hodnoty mikrotvrdosti vo vzdialenosti nad 0,2 mm od miesta rezu dosahujú hodnoty okolo 230 až 256HV (Obr. 47, Tab. 11), čo reprezentuje pôvodnú štruktúru materiálu (perlitickú). Pri použití väčšieho zaťaženia dochádzalo vždy vo výsledku k poklesu hodnôt mikrotvrdosti. Čím vyššia bola zaťažujúca sila, tým menšia hodnota mikrotvrdosti bola nameraná, ako je vidieť na obrázku 47 a taktiež v tabuľke nameraných hodnôt.

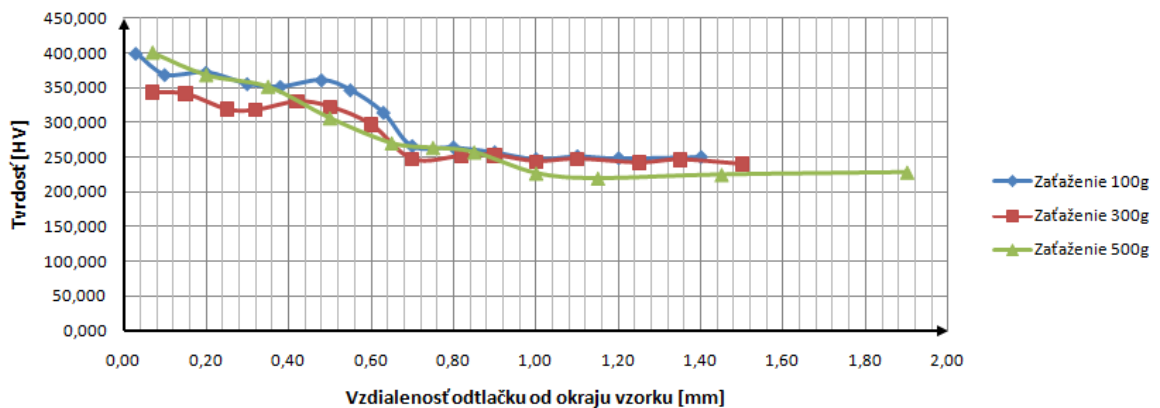
6.3 Vzorka 3 (materiál 11 523)

6.3.1 Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 523

Tab. 12. Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 523

Vzorka 3 (materiál 11 523)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]
1	0,03	399,482	0,37	1	0,07	343,040	3,30	1	0,07	399,782	1,29
2	0,10	368,594	7,98	2	0,15	340,947	5,71	2	0,20	367,870	2,38
3	0,20	371,881	2,33	3	0,25	318,769	6,38	3	0,35	351,032	2,04
4	0,30	355,378	3,30	4	0,32	317,937	7,09	4	0,50	305,965	1,63
5	0,38	351,292	2,41	5	0,42	329,953	7,54	5	0,65	270,171	5,19
6	0,48	360,890	7,25	6	0,50	322,537	5,12	6	0,75	263,608	2,37
7	0,55	346,427	6,93	7	0,60	296,644	3,94	7	0,85	257,213	3,13
8	0,63	313,729	3,30	8	0,70	246,473	4,95	8	1,00	227,077	0,76
9	0,70	265,209	0,08	9	0,82	251,217	4,00	9	1,15	219,797	4,24
10	0,80	263,386	0,44	10	0,90	252,287	3,46	10	1,45	224,947	7,72
11	0,90	256,266	2,40	11	1,00	243,535	3,31	11	1,90	228,333	0,74
12	1,00	246,445	2,56	12	1,10	247,004	9,22	12	2,45	223,933	0,80
13	1,10	250,466	1,56	13	1,25	241,623	4,00	13	2,95	219,558	0,33
14	1,20	247,648	4,22	14	1,35	245,914	1,80	14	3,50	218,976	2,46
15	1,40	249,317	1,85	15	1,50	239,520	3,17	15	4,00	215,884	2,22
Priemerná odchýlka [%]			3,13	Priemerná odchýlka [%]			4,87	Priemerná odchýlka [%]			2,49

6.3.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 48. Priebeh mikrotvrdości u materiálu 11 523 (vzorka 3)

6.3.3 Záver a diskusia výsledkov

Pri meraní veľkosti ovplyvnenej vrstvy u materiálu 11 523 (vzorka 3) bolo zistené, že najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdości bola okolo 400HV, ako je vidieť na obrázku 48. Táto hodnota reprezentuje štruktúru horného bainitu. Aj keď má materiál nižší obsah uhlíku, dochádza vplyvom výrazného teplotného spádu k zakaleniu povrchovej vrstvy. Je nutné si uvedomiť, že teplota rezania laserom sa pohybuje okolo 100 000°C. Teplota okolia je

20°C. Pri tomto rozdielne teplôt dochádza vo väčšine prípadov k dosiahnutiu tzv. kritickej rýchlosti ochladzovania, v ktorej dôsledku dochádza k zakaleniu povrchovej vrstvy. Pri nižšom obsahu uhlíku však nie je možné dosiahnuť štruktúru martenzitu, ale iba štruktúru bainitu. Veľkosť ovplyvnenej povrchovej vrstvy tu dosahuje vyšších hodnôt. Ovplyvnená vrstva má veľkosť približne 1 mm. Pri meraní vo väčšej vzdialenosti od miesta rezu, mikrotvrdosť ovplyvnenej vrstvy klesá až na hodnotu 220 až 250HV (Obr. 48, Tab. 12), ktorá reprezentuje pôvodnú štruktúru perlitu.

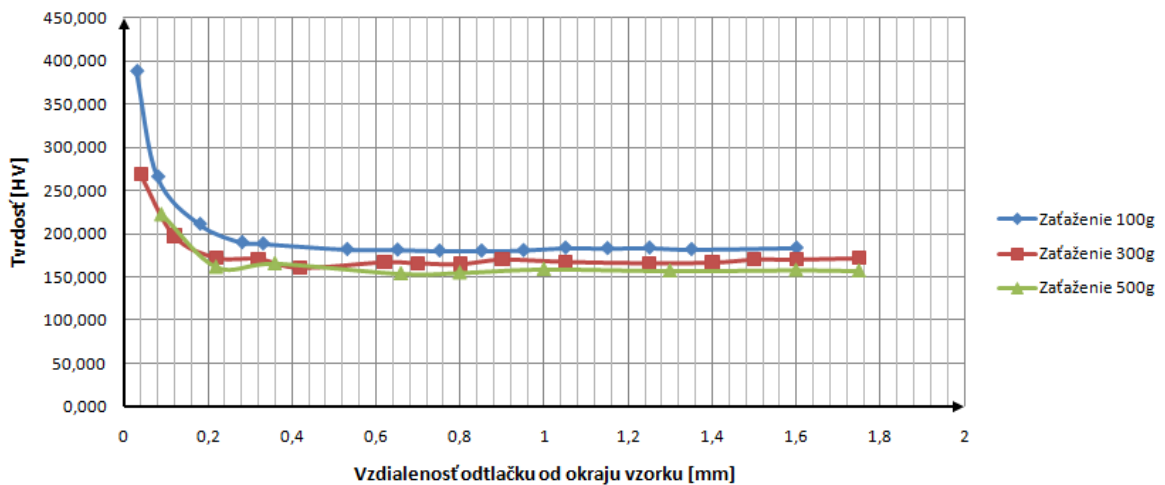
6.4 Vzorka 4 (materiál 11 373)

6.4.1 Namerané hodnoty mikrotvrdosti u materiálu 11 373

Tab. 13. Namerané hodnoty mikrotvrdosti u materiálu 11 373

Vzorka 4 (materiál 11 373)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]
1	0,03	388,731	4,79	1	0,04	268,816	2,62	1	0,09	222,751	1,54
2	0,08	266,282	0,09	2	0,12	197,408	1,69	2	0,22	161,638	4,19
3	0,18	211,351	3,00	3	0,22	172,278	1,69	3	0,36	165,705	2,22
4	0,28	190,110	2,96	4	0,32	170,936	0,73	4	0,66	153,804	1,47
5	0,33	188,593	2,35	5	0,42	160,456	0,43	5	0,80	154,960	3,11
6	0,53	182,085	2,64	6	0,62	166,985	3,27	6	1,00	158,965	1,67
7	0,65	181,510	3,61	7	0,70	165,742	1,90	7	1,30	157,143	0,90
8	0,75	180,342	4,45	8	0,80	164,715	0,87	8	1,60	157,958	1,59
9	0,85	180,358	5,11	9	0,90	170,071	0,78	9	1,75	157,150	3,13
10	0,95	180,913	2,17	10	1,05	167,370	0,88	10	2,15	157,662	2,30
11	1,05	183,800	1,87	11	1,25	165,826	0,07	11	3,00	157,725	7,75
12	1,15	183,216	3,49	12	1,40	166,583	1,43	12	4,00	165,307	1,48
13	1,25	183,800	1,22	13	1,50	170,040	2,16	13	4,35	164,978	2,04
14	1,35	182,060	0,26	14	1,60	170,118	4,72	14	4,65	168,679	1,58
15	1,60	183,800	2,52	15	1,75	171,652	0,04	15	5,00	168,108	1,32
Priemerná odchýlka [%]			2,70	Priemerná odchýlka [%]			1,55	Priemerná odchýlka [%]			2,42

6.4.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 49. Pribeh mikrotvrdości u materiálu 11 373 (vzorka 4)

6.4.3 Záver a diskusia výsledkov

Pri meraní veľkosti ovplyvnenej vrstvy u materiálu 11 373 (vzorka 4) bolo zistené, že najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdości bola okolo 388,7HV pri zaťažení 100g, ako je vidieť na obrázku 49. Nameraná hodnota mikrotvrdości reprezentuje štruktúru horného bainitu. Môžeme teda hovoriť o ovplyvnení povrchovej vrstvy materiálu pri reznom procese. Aj keď má materiál nižší obsah uhlíku, dochádza vplyvom výrazného teplotného spádu k zakaleniu povrchovej vrstvy. Je nutné si uvedomiť, že teplota rezania laserom sa pohybuje okolo 100 000°C a teplota okolia okolo 20°C. Pri tomto rozdiely teplôt dochádza vo väčšine prípadov k dosiahnutiu kritickej rýchlosti ochladzovania, ktorej dôsledkom dochádza k zakaleniu povrchovej vrstvy. Pri nižšom obsahu uhlíku nie je možné dosiahnuť štruktúry martenzitu, ale iba štruktúry bainitu. Veľkosť ovplyvnenej vrstvy tu dosahuje vyšších hodnôt. Hĺbka ovplyvnenej vrstvy dosahuje veľkosť do 0,2 mm. Hodnoty mikrotvrdości vo vzdialenosti nad 0,2 mm od miesta rezu dosahujú hodnoty okolo 150 až 180HV (Obr. 49, Tab. 13), čo reprezentuje pôvodnú štruktúru materiálu (austenitickú). Pri použití väčšieho zaťaženia dochádzalo vždy vo výsledku k poklesu hodnôt mikrotvrdości. Čím vyššia bola zaťažujúca sila, tým menšia hodnota mikrotvrdości bola nameraná.

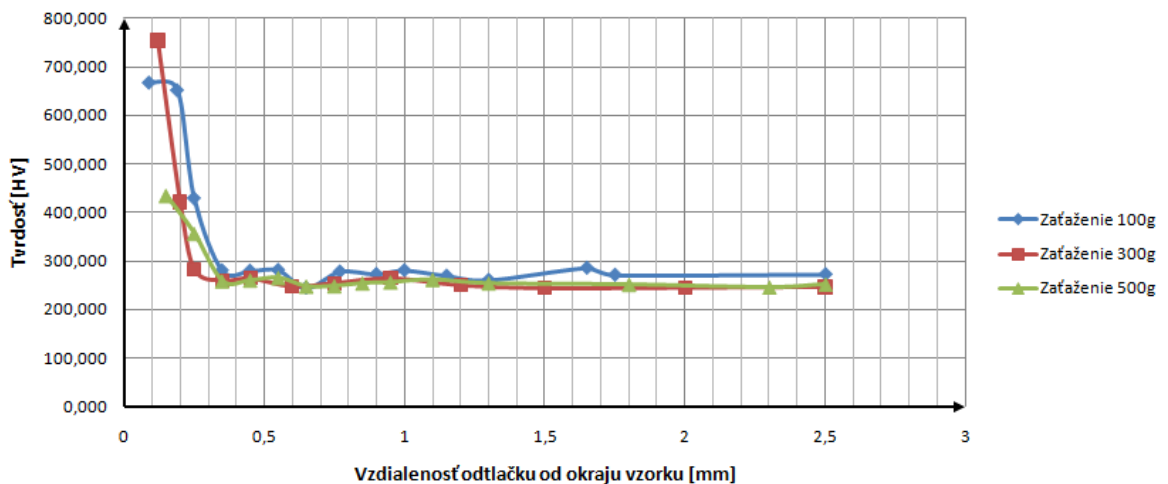
6.5 Vzorka 5 (materiál 14 260)

6.5.1 Nemerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 14 260

Tab. 14. Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 14 260

Vzorka 5 (materiál 14 260)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]
1	0,09	668,581	2,78	1	0,12	754,055	4,47	1	0,15	434,779	0,78
2	0,19	653,179	0,74	2	0,20	421,097	4,31	2	0,25	356,714	0,25
3	0,25	430,181	4,75	3	0,25	283,096	2,36	3	0,35	258,946	3,35
4	0,35	281,062	0,33	4	0,35	259,644	1,49	4	0,45	260,579	4,58
5	0,45	280,205	2,59	5	0,45	264,259	2,26	5	0,55	265,618	5,52
6	0,55	281,776	0,90	6	0,60	247,522	2,51	6	0,65	248,151	0,44
7	0,65	245,037	4,19	7	0,75	254,393	3,64	7	0,75	248,954	2,51
8	0,77	278,678	3,17	8	0,95	264,423	2,76	8	0,85	254,615	5,31
9	0,90	273,478	1,70	9	1,20	249,969	2,83	9	0,95	256,463	0,69
10	1,00	281,206	1,64	10	1,50	243,98	0,11	10	1,10	262,080	3,59
11	1,15	270,027	3,81	11	2,00	244,797	1,51	11	1,30	254,217	4,86
12	1,3	261,107	2,17	12	2,50	246,585	2,47	12	1,80	251,707	0,9
13	1,65	286,204	1,21	13	3,00	258,959	3,70	13	2,30	246,165	0,17
14	1,75	271,762	1,14	14	3,50	263,126	3,5	14	2,50	252,405	1,81
15	2,50	273,035	0,46	15	4,00	267,985	2,27	15	3,00	246,273	3,78
Priemerná odchýlka [%]			2,11	Priemerná odchýlka [%]			2,68	Priemerná odchýlka [%]			2,57

6.5.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 50. Priebeh mikrotvrdości u materiálu 14 260 (vzorka 5)

6.5.3 Záver a diskusia výsledkov

Z nameraných výsledkov vyplýva, že najvyššia hodnota mikrotvrdości u materiálu 14 260 (vzorka 5) bola nameraná 754HV pri zaťažení 300g. Hodnota nameranej tvrdości zodpovedá martenzitickej štruktúre. U ocele 14 260 došlo pri rezaní laserom k tepelnému ovplyvneniu povrchovej vrstvy v mieste rezu, kde došlo k zakaleniu tejto vrstvy a tým ku vzniku

martenzitickej štruktúry, čo je dané chemickým zložením tohto materiálu. Veľmi dôležitým zistením je tiež hĺbka ovplyvnenej vrstvy. Tá obsahuje hodnoty okolo 0,25 mm. Po prekročení tejto hodnoty dochádza k poklesu hodnôt mikrotvrdości na približne 260 HV (Obr. 50, Tab. 14), čo predstavuje pôvodnú perlitickú štruktúru. Zakalenie povrchovej vrstvy je spôsobené teplotným rozdielom v mieste rezu a jeho okolím. Teplota v mieste rezu pri použití laserového lúča dosahuje 100 000°C, zatiaľ čo teplota okolia okolo 20°C. Ako zaujímavé sa javia veľkosti použitých zaťažení. S rastúcim zaťažením dochádza k poklesu hodnôt mikrotvrdości v ovplyvnenej vrstve rezaného materiálu. Namerané hodnoty mikrotvrdości sú nepatrne menšie ako u vzorky 1, ktorá je tiež z ocele 14 260. Je to dané hrúbkou vzorky, nakoľko pre rôzne hrúbky vzoriek boli použité rôzne výkony a rýchlosti posuvov.

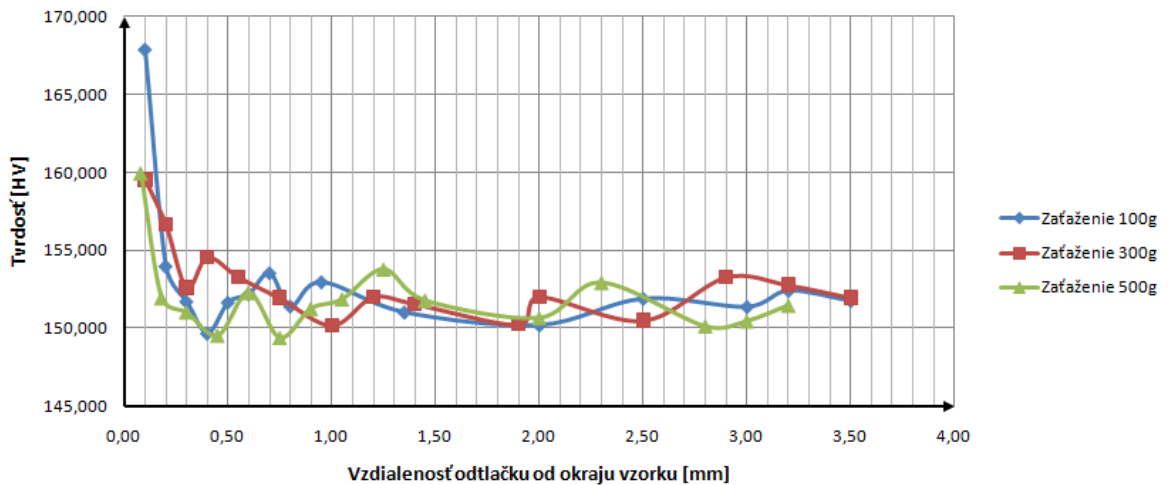
6.6 Vzorka 6 (materiál 11 373)

6.6.1 Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373

Tab. 15. Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373

Vzorka 6 (materiál 11 373)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]
1	0,10	167,870	3,58	1	0,10	159,544	2,86	1	0,08	159,974	1,14
2	0,20	153,987	3,86	2	0,20	156,644	0,33	2	0,18	151,950	1,59
3	0,30	151,724	3,10	3	0,30	152,613	3,55	3	0,30	151,033	1,24
4	0,40	149,684	4,69	4	0,40	154,565	3,70	4	0,45	149,529	1,87
5	0,50	151,667	4,58	5	0,55	153,294	3,59	5	0,60	152,292	4,99
6	0,60	152,207	1,30	6	0,75	151,947	1,83	6	0,75	149,390	3,09
7	0,70	153,551	0,38	7	1,00	150,205	2,01	7	0,90	151,261	4,29
8	0,80	151,419	1,91	8	1,20	152,033	3,71	8	1,05	151,863	3,09
9	0,95	152,974	1,82	9	1,40	151,576	4,01	9	1,25	153,787	4,49
10	1,35	151,032	4,84	10	1,90	150,257	0,82	10	1,45	151,787	1,74
11	2,00	150,205	2,30	11	2,00	152,028	1,33	11	2,00	150,665	0,78
12	2,50	151,908	2,23	12	2,50	150,506	0,43	12	2,30	152,928	2,68
13	3,00	151,382	3,59	13	2,90	153,284	3,90	13	2,80	150,128	3,16
14	3,20	152,423	2,99	14	3,20	152,782	2,01	14	3,00	150,454	2,15
15	3,50	151,768	1,26	15	3,50	151,975	1,62	15	3,20	151,459	1,13
Priemerná odchýlka [%]			2,83	Priemerná odchýlka [%]			2,38	Priemerná odchýlka [%]			2,50

6.6.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 51. Priebeh mikrotvrlosti u materiálu 11 373 (vzorka 6)

6.6.3 Záver a diskusia výsledkov

Pri meraní veľkosti ovplyvnenej vrstvy u materiálu 11 373 (vzorka 6) bolo zistené, že najvyššia nameraná hodnota mikrotvrlosti bola okolo 168HV pri zaťažení 100g, ako je vidieť na obrázku 51. Nameraná hodnota mikrotvrlosti reprezentuje štruktúru austenitu, čo je spôsobené nižším obsahom uhlíku. Môžeme teda hovoriť o minimálnom ovplyvnení povrchovej vrstvy materiálu pri reznom procese, nakoľko vychádzajúca štruktúra materiálu bola takisto austenitická. Dokazujú to aj ďalšie namerané hodnoty mikrotvrlosti. Hĺbka ovplyvnenej vrstvy dosahuje veľkosť do 0,2 mm. Hodnoty mikrotvrlosti vo vzdialenosti nad 0,2 mm od miesta rezu dosahujú hodnoty okolo 150 až 155HV (Obr. 51, Tab. 15), čo reprezentuje pôvodnú štruktúru materiálu (austenitickú). Pri použití väčšieho zaťaženia dochádzalo vo výsledku k nelineárnemu a náhodnému poklesu hodnôt mikrotvrlosti. Pohybovali sme sa ale vždy v hodnote približne 150 až 155HV. Namerané hodnoty mikrotvrlosti sú výrazne menšie ako u vzorky 4, ktorá je tiež z ocele 11 373. Rozdielom medzi týmito dvomi vzorkami nebola ani tak hrúbka ovplyvnenej vrstvy, ako hodnoty mikrotvrlosti. U vzorky 4 bolo ovplyvnenie vrstvy intenzívnejšie, a tým bola aj tvrdosť tepelne ovplyvnenej vrstvy väčšia. Je to dané hrúbkou vzorky, nakoľko pre rôzne hrúbky vzoriek boli použité rôzne výkony a rýchlosti posuvov. U vzorky 4 bol teda zvolený väčší výkon laserového lúču k dokonalému deleniu materiálu.

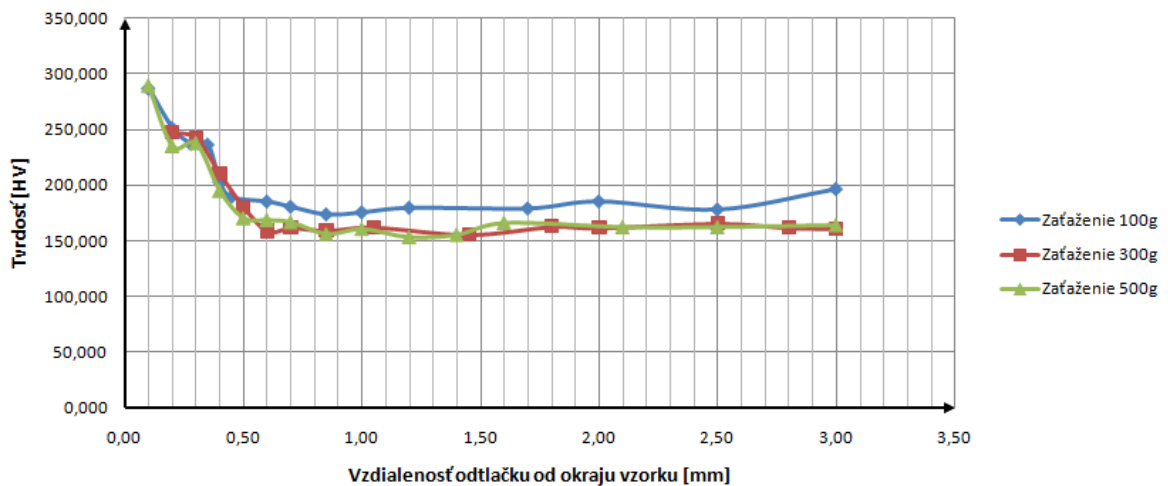
6.7 Vzorka 7 (materiál 11 373)

6.7.1 Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373

Tab. 16. Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 11 373

Vzorka 7 (materiál 11 373)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdość [HV]	odchýlka [%]
1	0,10	287,328	2,90	1	0,20	247,699	2,76	1	0,10	289,315	0,93
2	0,20	251,535	4,03	2	0,30	242,258	2,60	2	0,20	235,093	0,87
3	0,28	237,170	3,13	3	0,40	210,163	0,20	3	0,30	237,885	2,82
4	0,35	236,594	1,98	4	0,50	180,264	2,40	4	0,40	194,921	1,79
5	0,40	202,847	0,11	5	0,60	158,864	4,19	5	0,50	170,197	0,17
6	0,45	189,295	2,77	6	0,70	161,80	3,28	6	0,60	168,573	2,78
7	0,60	185,326	3,98	7	0,85	159,322	2,42	7	0,70	166,586	4,61
8	0,70	180,683	0,37	8	1,05	162,225	3,69	8	0,85	156,009	0,55
9	0,85	173,742	2,59	9	1,45	155,590	2,40	9	1,00	160,465	2,17
10	1,00	175,638	0,87	10	1,80	162,844	1,00	10	1,20	153,114	1,06
11	1,20	179,710	0,75	11	2,00	161,671	3,64	11	1,40	155,216	1,60
12	1,70	179,101	1,00	12	2,50	165,566	0,92	12	1,60	165,886	0,09
13	2,00	185,444	3,10	13	2,80	161,804	0,32	13	2,10	162,198	1,53
14	2,50	178,177	4,77	14	3,00	161,133	0,26	14	2,50	162,198	2,60
15	3,00	196,592	0,66	15	3,50	160,372	0,50	15	3,00	163,972	0,84
Priemerná odchýlka [%]			2,20	Priemerná odchýlka [%]			2,04	Priemerná odchýlka [%]			1,63

6.7.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 52. Priebeh mikrotvrdości u materiálu 11 373 (vzorka 7)

6.7.3 Záver a diskusia výsledkov

Pri meraní veľkosti ovplyvnenej vrstvy u materiálu 11 373 (vzorka 7) bolo zistené, že najvyššia nameraná hodnota mikrotvrdości bola 289,3HV pre zaťaženie 300g, ako je vidieť na obrázku 52. Táto hodnota reprezentuje štruktúru perlitu. Aj keď má materiál nižší obsah uhlíku, dochádza vplyvom výrazného teplotného spádu k zakaleniu povrchovej vrstvy. Je

nutné si uvedomiť, že teplota rezania laserom sa pohybuje okolo 100 000°C. Teplota okolia je 20°C. Pri tomto rozdielne teplôt dochádza vo väčšine prípadov k dosiahnutiu tzv. kritickej rýchlosti ochladzovania, v ktorej dôsledku dochádza k zakaleniu povrchovej vrstvy. Pri nižšom obsahu uhlíku však nie je možné dosiahnuť štruktúru martenzitu. Veľkosť ovplyvnenej povrchovej vrstvy má hodnotu približne 0,4mm. Hodnoty mikrotvrdości vo vzdialenosti nad 0,4 mm od miesta rezu dosahujú hodnoty okolo 160 až 180HV (Obr. 52, Tab. 16), čo reprezentuje pôvodnú štruktúru materiálu (austenitickú). Pri použití väčšieho zaťaženia dochádzalo vždy vo výsledku k poklesu hodnôt mikrotvrdości. Čím vyššia bola zaťažujúca sila, tým menšia hodnota mikrotvrdości bola nameraná. Namerané hodnoty mikrotvrdości sú menšie ako u vzorky 4 a väčšie ako u vzorky 6, ktoré sú tiež z ocele 11 373. Najväčšiu hrúbku ovplyvnenej vrstvy má vzorka 7. U vzorky 4 bola tvrdosť ovplyvnenej vrstvy najväčšia. Je to dané hrúbkou vzorky, nakoľko pre rôzne hrúbky vzoriek boli použité rôzne výkony a rýchlosti posuvov.

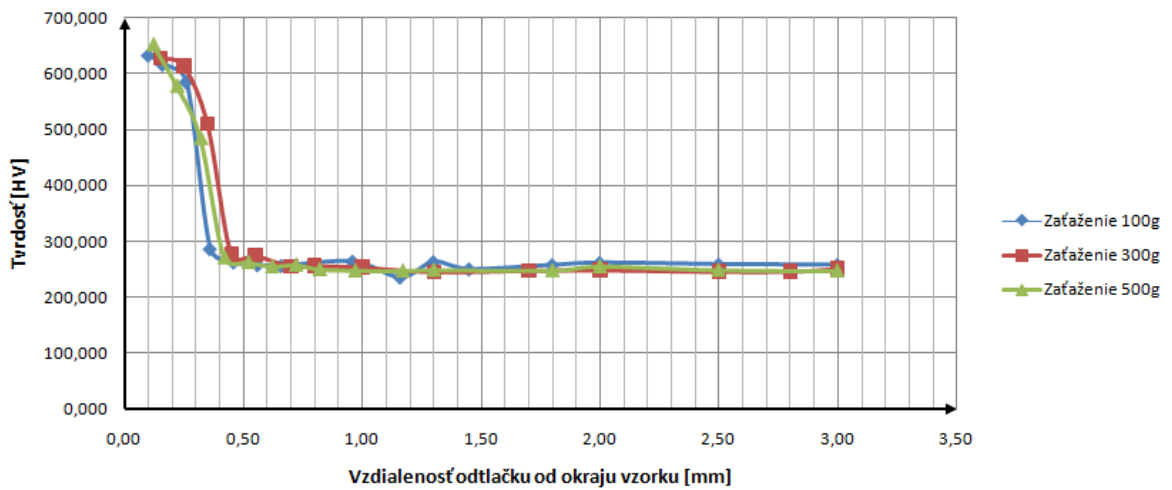
6.8 Vzorka 8 (materiál 12 050)

6.8.1 Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 12 050

Tab. 17. Namerané hodnoty mikrotvrdości u materiálu 12 050

Vzorka 8 (materiál 12 050)											
Zaťaženie 100g				Zaťaženie 300g				Zaťaženie 500g			
meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]	meranie č.	Vzdialenosť od okraju [mm]	Tvrdosť [HV]	odchýlka [%]
1	0,10	633,403	6,37	1	0,15	628,812	0,42	1	0,12	652,919	1,01
2	0,16	616,624	0,80	2	0,25	613,834	0,43	2	0,22	578,730	1,85
3	0,26	585,474	2,12	3	0,35	509,700	2,05	3	0,32	484,476	1,68
4	0,36	285,791	2,56	4	0,45	276,609	5,10	4	0,42	271,384	1,69
5	0,46	261,994	6,78	5	0,55	274,988	3,83	5	0,52	262,763	3,85
6	0,56	257,021	0,20	6	0,70	255,358	4,61	6	0,62	255,219	0,84
7	0,66	255,813	1,52	7	0,80	256,255	3,46	7	0,72	257,924	1,91
8	0,96	263,438	4,43	8	1,00	253,666	2,62	8	0,82	249,933	1,36
9	1,16	234,985	2,85	9	1,30	245,421	1,97	9	0,97	247,933	1,09
10	1,30	262,780	0,57	10	1,70	247,877	0,15	10	1,17	247,351	1,88
11	1,45	249,686	1,76	11	2,00	248,726	2,76	11	1,30	248,637	1,35
12	1,80	257,156	1,21	12	2,50	245,994	2,80	12	1,80	247,994	1,00
13	2,00	261,194	3,37	13	2,80	246,301	1,49	13	2,00	255,219	0,22
14	2,50	258,416	2,96	14	3,00	251,091	1,40	14	2,50	248,637	1,35
15	3,00	257,417	0,43	15	3,50	265,377	1,57	15	3,00	247,351	1,35
Priemerná odchýlka [%]			2,53	Priemerná odchýlka [%]			2,31	Priemerná odchýlka [%]			1,50

6.8.2 Grafické vyhodnotenie



Obr. 53. Priebeh mikrotvrlosti u materiálu 12 050 (vzorka 8)

6.8.3 Záver a diskusia výsledkov

Pri meraní mikrotvrlosti povrchovej vrstvy u materiálu 12 050 (vzorka 8) bolo zistené, že najvyššia nameraná hodnota dosiahla hodnotu okolo 653HV pri zaťažení 500g. Nameraná hodnota tvrdosti reprezentuje štruktúru martenzitu. Tá vznikla v povrchovej vrstve pri reznom procese, kedy bol materiál delený laserom. Pri rezaní laserom sa teplota v mieste rezu pohybuje okolo 100 000°C, zatiaľ čo teplota okolia dosahuje približne hodnotu 20°C. Tento výrazný teplotný spád spôsobuje chladenie miesta rezu vysokou rýchlosťou (kritickou), čo má za následok vznik martenzitickej štruktúry. Materiál 12 050 je svojim chemickým zložením vhodný pre tepelné spracovanie, povrchové kalenie. Jeho chemické zloženie, najmä obsah uhlíku potvrdzuje, že materiál je schopný dosiahnuť štruktúru martenzitu. Hĺbka ovplyvnenej vrstvy dosahuje veľkosť do 0,35 mm. Hodnoty mikrotvrlosti vo vzdialenosti nad touto hodnotou od miesta rezu dosahujú hodnoty okolo 200 až 260HV (Obr. 53, Tab. 17), čo reprezentuje pôvodnú štruktúru materiálu (perlitickú). Pri použití väčšieho zaťaženia dochádzalo vždy vo výsledku k miernemu poklesu hodnôt mikrotvrlosti. Čím vyššia bola zaťažujúca sila, tým menšia hodnota mikrotvrlosti bola nameraná. Namerané hodnoty mikrotvrlosti sú menšie ako u vzorky 2, ktorá je tiež z ocele 12 050. Rozdielom medzi týmito dvomi vzorkami bola taktiež hrúbka ovplyvnenej vrstvy. U vzorku 8 bolo ovplyvnenie vrstvy intenzívnejšie a tým bola aj vrstva, ktorá bola tepelne ovplyvnená väčšia. Je to dané hrúbkou vzorku, nakoľko pre rôzne hrúbky vzoriek boli použité rôzne výkony a rýchlosti posuvov. U tejto vzorky bol teda zvolený väčší výkon laserového lúču k dokonalému deleniu materiálu.

7 ZÁVER

Diplomová práca rieši problém tepelného ovplyvnenia povrchových vrstiev rôznych typov materiálov v mieste rezu pri použití laseru na delenie týchto materiálov. Na delenie materiálov bol teda použitý laser typu TRUMPF. Touto technológiou bolo pripravených osem vzoriek, ktoré boli následne vybrúsené, vyleštené a na ktorých prebiehalo samotné meranie mikrotvrdości. Toto meranie prebiehalo na mikrotvrdomere DM – 2D. Po nameraní hodnôt mikrotvrdości boli tieto hodnoty číselne a graficky vyhodnotené v programe Microsoft Excel. Boli skúmané hodnoty tvrdostí a hrúbka tepelne ovplyvnenej vrstvy. Pomocou merania mikrotvrdości je možné pomerne presne identifikovať a rozlíšiť jednotlivé štruktúrne súčasti v konkrétnych oblastiach vzoriek.

Z výsledkov meraní vyplýva, že pre rôzne typy ocelí z ktorých boli vzorky zhotovené, vykazovali rôzne hodnoty tvrdostí a veľkosti tepelne ovplyvnených vrstiev. Je to podmienené chemickým zložením jednotlivých materiálov, najmä množstva obsahu uhlíku a v neposlednom rade hrúbkou skúmanej vzorky. Nakoľko vzorky mali rôzne hrúbky, museli byť na ich delenie použité rôzne výkony laserového lúču a rýchlosti posuvov, čo tiež priamo vplývalo na samotné tepelné ovplyvnenie povrchovej vrstvy skúmaných vzoriek. Konkrétne najväčšie tvrdosti vykazovali vzorky z ocele 12 050 a 14 260, čo len dokázalo, že tieto vzorky obsahujú najväčšie percento uhlíku vo svojom chemickom zložení. Práve uhlík má najväčší vplyv na tvrdosť a zmenu štruktúry pri tepelnom spracovaní ocelí.

Vzorky z materiálu 14 260 obsahujú 0,5 až 0,6 % uhlíku čo sa prejavilo na hodnotách mikrotvrdości. Tie dosiahli maximálnych hodnôt 750 až 798HV v blízkosti miesta rezu, čo charakterizuje premenu štruktúry zo základnej perlitickej na štruktúru martenzitickú. Hĺbky ovplyvnenej vrstvy dosahovali hodnôt 0,25 mm.

Ďalšími vzorkami boli vzorky z ocele 12 050. Tá obsahuje 0,42 až 0,50 % uhlíku. Preto namerané hodnoty mikrotvrdości charakterizovali v mieste rezu zakalenie vrstvy, a to premenu štruktúry z pôvodnej perlitickej na štruktúru martenzitu. Maximálne hodnoty tvrdostí v mieste rezu sa pohybovali v rozmedzí 650 až 700HV podľa hrúbky vzorky. Hĺbky ovplyvnených povrchových vrstiev vzoriek boli v prípade tenšieho vzorku 0,15 mm a v prípade hrubšieho do 0,35 mm.

Vzorka z ocele 11 523 vykazovala maximálnu tvrdosť okolo 400HV. Táto hodnota reprezentuje štruktúru horného bainitu. Nakoľko obsah uhlíku má tento materiál výrazne nižší ako v predchádzajúcich prípadoch (0,2 %), pri zakalení povrchovej vrstvy nedosiahneme

martenzitickej štruktúry. Hĺbka tepelne ovplyvnenej vrstvy dosahovala väčšej hodnoty a to 1 mm. Pri meraní vo väčšej vzdialenosti od miesta rezu, mikrotvrdosť ovplyvnenej vrstvy klesala až na hodnotu 220 až 250HV, ktorá reprezentuje pôvodnú štruktúru perlitu.

Ako posledné boli skúmané vzorky z ocele 11 373. Táto obsahuje v porovnaní s ostatnými vzorkami najmenšie percento uhlíku. Je to približne 0,17 %. Z tejto skutočnosti vyplývajú aj namerané hodnoty mikrotvrdości. Základnou štruktúrou týchto vzoriek bola štruktúra austenitická, nakoľko sa v tepelne neovplyvnenej časti vzorky pohybovali hodnoty mikrotvrdości okolo 150 až 180HV. V tepelne ovplyvnenej časti vzorky boli namerané hodnoty mikrotvrdości v závislosti od hrúbky každej vzorky, nakoľko podľa hrúbky bol na delenie materiálu použitý výkon a posuv laserového lúča. Preto vykazovali všetky tri vzorky rôzne štruktúrne zložky v mieste tepelného ovplyvnenia. V prípade vzorky 4 bola maximálna hodnota tvrdości 388,7 čo charakterizuje bainitickú štruktúru. Hrúbka ovplyvnenej vrstvy dosahovala hodnotu do 0,2mm. Vzorka 6 bola tepelne ovplyvnená minimálne, nakoľko v mieste rezu nedošlo k premene štruktúry. Maximálna nameraná hodnota mikrotvrdości bola 168HV. Na delenie tejto vzorky nebol potrebný výrazne vysoký výkon laserového lúča, čoho dôkazom je aj samotné vyhodnotenie. Posledná vzorka z tohto materiálu bola vzorka 7. Pri tejto vzorke bola nameraná najvyššia hodnota mikrotvrdości 289,3HV, čo charakterizuje perlitickú štruktúru a veľkosť ovplyvnenej povrchovej vrstvy mala hodnotu približne 0,4mm.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J.,: *Strojírenská technologie 1, 1. díl.* Scienta Praha, 2007, 267 s. ISBN 978-80-86960-26-5
- [2] SK.WIKIPEDIA, [online]. 2001 [cit. 2009-11-14]. Dostupné z :
<<http://sk.wikipedia.org/wiki/Oceľ>>
- [3] HLUCHÝ, M., HANĚK, V.,: *Strojírenská technologie 2, 2. díl.* Scienta Praha, 2001, 176 s. ISBN 80-7183-245-6
- [4] ŘASA, J., GABRIEL, V.,: *Strojírenská technologie 3, 1. díl.* Scienta Praha, 2005, 256 s. ISBN 80-7183-337-1
- [5] SJF.TUKE, [online]. 2005 [cit. 2009-11-16]. Dostupné z :
<http://www.sjf.tuke.sk/kvtar/1/files/18_Tvarovacie_Stroje_a_stroje_na_Delenie_Materialu.pdf>
- [6] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., PAŇÁK, R.,: *Strojírenská technologie 2, 1. díl.* Scienta Praha, 2001, 316 s. ISBN 80-7183-244-8
- [7] SK.WIKIPEDIA, [online]. 2001 [cit. 2009-11-16]. Dostupné z :
<http://sk.wikipedia.org/wiki/Obrábanie_vodným_prúdom>
- [8] ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V.,: *Strojírenská technologie 3, 2. díl.* Scienta Praha, 2005, 224 s. ISBN 80-7183-336-3
- [9] ALDEBARAN, [online]. 2004 [cit. 2009-11-17]. Dostupné z :
<http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_20_ptl.html>
- [10] MMSPEKTRUM, [online]. 2004 [cit. 2009-11-17]. Dostupné z :
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>>
- [11] DOLEŽAL, P., PACAL, B.,: *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů.* VUT Brno, 2006, 41 s.
- [12] PLUHAŘ, J. a kolektiv,: *Nauka o materiálech.* SNTL Praha, 1989, 549 s. ISBN 04-205-89
- [13] PÍŠEK, F.,: *Nauka o materiálu 2, 1. svazek.* Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1959, 658 s.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

A	[mm]	Plocha odtlačku
Al ₂ O ₃		Syntetický korund
AWJ		Obrábanie abrazívnym vodným lúčom
CAC		Computer - Aided Control
CNC		Computer Numeric Control
CO ₂		Oxid uhličitý
ČSN		Česká štátna norma
D	[mm]	Priemer guľôčky
d	[mm]	Priemer odtlačku, Aritmetický priemer dĺžky uhlopriečok odtlačku
EN		Európska norma
F	[N]	Zaťažovacia sila
F _z	[J]	Rezná sila
F ₁	[N]	Prídavné zaťaženie
F ₀	[N]	Predbežné zaťaženie
H	[mm]	Hĺbka rezu
HA		Mikrotvrdosť podľa Attingera
HB		Tvrdosť podľa Brinella
HCH		Mikrotvrdosť podľa Chruščova
HDC		Mikrotvrdosť podľa metódy dvojkužela
HK		Tvrdosť podľa Knoopu
HRC		Tvrdosť podľa Rockwella
HR (C,B,A, ...)		Tvrlosti podľa Rockwella
HV		Tvrdosť podľa Vickersa
ISO		Medzinárodná norma
KV	[J]	Nárazová práca, tvar vrubu V

l		Délka uhlopříčky
Q	[J]	Celkové množství tepla
Q_{pd}	[J]	Teplo vzniknuté přeměnou práce plastických deformací
$Q_{tč}$	[J]	Teplo vzniknuté přeměnou práce tření na ploše čela
Q_{th}	[J]	Teplo vzniknuté přeměnou práce tření na ploše chrbta
Q_1	[J]	Teplo odvedené trieskou
Q_2	[J]	Teplo odvedené obrobkem
Q_3	[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q_4	[J]	Teplo odvedené okolím
S_iC		Karbid křemíka
\check{S}_z	[mm]	Šířka rezu
UV		Ultrafialové záření
WJM		Obrábání vodním lúčem
λ	[μm]	Vlnová délka
α		Úhel pláště kuželov
μm		Mikrometr

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1. Příklad y farebného označovania ocelí</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2. Sústava stroj – nástroj – obrobok</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3. Obrobok</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4. Rezný nástroj</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5. Zdroje tepla</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6. Rezanie pilou</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7. a) Pílové listy, b) Pílový list v reze</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8. a) Pílové kotúče, b) Pílový kotúč v reze</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9. Pílové pásy</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 10. Rámová píla</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11. Kotúčová píla - a)vodorovná, b)zvislá jedno stojanová, c)zvislá dvoj stojanová</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 12. Pásová píla - a)na tvarové vyrezávanie, b)na rezanie tyčového materiálu</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 13. Rozbrusovacia brúska</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14. Nástroj na strihanie (princíp)</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 15. a)Tabuľové nožnice, b)Jednokotúčové nožnice, c)Dvojkotúčové nožnice</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 16. d)Kmitacie nožnice, e)Letmé nožnice pákové, f)Letmé nožnice dvojkotúčové</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 17. Hlavica pre obrábanie vodným lúčom</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 18. Princíp WJM a AWJ</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 19. Schéma prístroja na rezanie vodným lúčom</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 20. Zariadenie pre rezanie vodným lúčom</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 21. Schéma plazmového rezania a princíp tvorby plazmy v horáku</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 22. Plazmové zariadenia s plynovou stabilizáciou</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 23. Plazmový horák s vodnou stabilizáciou</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 24. Stroj pre rezanie Plazmou</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 25. Laserové svetlo</i>	<i>35</i>

<i>Obr. 26. Schéma zariadenia pre obrábanie laserom</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 27. Schéma zariadenia a zariadenie pre rezanie laserom</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 28. Meranie tvrdosti podľa Brinella</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 29. Meranie tvrdosti podľa Rockwella</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 30. Meranie tvrdosti podľa Vickersa</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 31. Meranie mikrotvrdosti - dtlačok prevedený metódou podľa Vickersa</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 32. Meranie mikrotvrdosti podľa Knoopu</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 33. Meranie mikrotvrdosti podľa Meincka a Attingera</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 34. Určovanie mikrotvrdosti metódou dvojkužela</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 35. Diagram vzťahu medzi tvrdosťou na Vickersovom ihlane a na dvojkuželi</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 36. 2D-laserový rezací stroj typu TRUMPF</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 37. Prístroj MTH na leštenie kovových vzoriek</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 38. Mikrotvrdomer DM-2D</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 39. Počiatočná štruktúra ocele 12 050</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 40. Štruktúra ocele 12 050 po tepelnom ovplyvnení</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41. Povrch vzoriek po vyleštení: a) 12 050, b) 11 373, c) 14 260</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42. a) Používané komponenty pri meraní, b) Detail pracovného stolu</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 43. Príklad postupu merania mikrotvrdosti na jednom vzorku</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44. Priebeh zaťažovania pri skúške mikrotvrdosti</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 45. Spôsob vyhodnotenia hodnoty tvrdosti</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 46. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 14 260 (vzorka 1)</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 47. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 12 050 (vzorka 2)</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 11 523 (vzorka 3)</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 49. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 11 373 (vzorka 4)</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 50. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 14 260 (vzorka 5)</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 51. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 11 373 (vzorka 6)</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 52. Priebeh mikrotvrdosti u materiálu 11 373 (vzorka 7)</i>	<i>71</i>

Obr. 53. Priebeh mikrotrvdosti u materiálu 12 050 (vzorka 8) 73

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 2. Medzné obsahy legovacích prvkov pre rozdelenie ocelí na legované a nelegované ..</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 2. Číselné označenie ocelí</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 3. Medzné obsahy legovacích prvkov pre rozdelenie ocelí na legované a nelegované ..</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 4. Tvrdosť podľa Vickersa - oblasti skúšobného zaťaženia pre kovové materiály</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 5. Výkon a posuv laseru pre rôzne hrúbky vzoriek</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6. Technické parametre mikrotvrdomera DM-2D</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7. Skúšobné vzorky</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 8. Chemické zloženie materiálov vzoriek</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 9. Tvrdosť štruktúrnych zložiek a fáz</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 10. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 14 260</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 11. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 12 050</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 12. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 11 523</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 13. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 11 373</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 14. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 14 260</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 15. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 11 373</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 16. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 11 373</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 17. Namerané hodnoty mikrotvrдости u materiálu 12 050</i>	<i>72</i>

