

Vliv procesu dělení kovových materiálů na výsledné mikro-mechanické vlastnosti

Dušan Mackovík

Bakalářská práce
2018/2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dušan Mackovík**
Osobní číslo: **T16694**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv procesu dělení kovových materiálů na výsledné mikro-mechanické vlastnosti**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracovat literární studii na dané téma**
- 2. Příprava zkušebních těles pro experiment**
- 3. Provedení experimentu**
- 4. Vyhodnocení naměřených hodnot**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2**
2. **PTÁČEK, L. a kol.;; Nauka o materiálu II, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.**
3. **BALTÁ CALLEJA, F a Stojko Christov FAKIROV. Microhardness of polymers. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, xiii, 237 s. ISBN 0-521-64218-3.**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Ovsík, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání bakalářské práce:

24. května 2019

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

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 30. 4. 2019

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z 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

Bakalářská práce je zaměřena na výsledné mechanické vlastnosti kovových materiálů způsobené dělením nekonvenčními metodami.

Teoretická část bakalářské práce se zabývá konstrukčními materiály, převážně ocelí. Dále popisuje způsoby dělení kovových materiálů nekonvenčními metodami a měření mechanických vlastností zaměřených na zkoušky tvrdosti. V praktické části je provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti u vybraných ocelí. Zkouška nám ukazuje, do jaké míry a jak je ocel ovlivněna způsobem dělení. Poslední část bakalářské práce se týká vyhodnocení naměřených hodnot a porovnání mechanických vlastností vybraných ocelí.

Klíčová slova: Oceli, tvrdost, tepelné ovlivnění, mechanické vlastnosti, dělení materiálu, instrumentovaná zkouška tvrdosti.

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the resulting mechanical properties of metallic materials caused by division by unconventional methods.

The theoretical part of the thesis deals with construction materials, mainly steel. It also describes methods of dividing metal materials by unconventional methods and measuring mechanical properties aimed at hardness testing. In the practical part, the hardness test is carried out on selected steels. The test shows us to what extent and how the steel is affected by the division method. The last part of the thesis deals with evaluation of measured values and comparison of mechanical properties of selected steels.

Keywords: Steel, hardness, thermal influence, mechanical properties, material division, instrumented hardness test.

Poděkování:

Úvodem bakalářské práce bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a čas, který mi poskytoval při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji také svojí rodině a všem lidem, kteří mě během studia podporovali.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KONSTRUKČÍ MATERIÁLY	12
1.1 KOVOVÉ MATERIÁLY	12
1.2 SLITINY ŽELEZA	13
1.3 OCELI.....	15
1.3.1 Nelegované oceli	15
1.3.2 Legované oceli	16
1.3.3 Označení ocelí.....	17
2 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ NEKONVEKČNÍMI METODAMI	18
2.1 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLU LASEREM	19
2.1.1 Princip a charakteristika laseru	19
2.1.2 Způsob řezání technických materiálu laserem	20
2.1.3 Výhody a nevýhody řezání laseru	21
2.2 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLU PLAZMOU	22
2.2.1 Princip a charakteristika plazmy	22
2.2.2 Způsob řezání technických materiálu plazmou.....	23
2.2.3 Výhody a nevýhody plazmy.....	23
2.3 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLU VODNÍM PAPERSEM	24
2.3.1 Princip a charakteristika vodního paprsku	24
2.3.2 Způsob řezání technických materiálů vodím paprskem.....	25
2.3.3 Výhody a nevýhody vodního paprsku.....	25
2.4 TEPelné OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU	26
3 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	27
3.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	28
3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	28
3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	30
3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	32
3.1.4 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	39
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	40
5.2 DRUHY MATERIÁLŮ.....	41
5.2.1 Ocel 1.0036 (11 373).....	42
5.2.2 Ocel 1.0060 (11 600).....	42
5.2.3 Ocel 1.0535 (12 060).....	42
5.2.4 Ocel 1.7131 (14 220).....	42
5.2.5 Ocel 1.7147 (14 221).....	43
5.2.6 Ocel 1.8504 (14 340).....	43
5.2.7 Ocel 1.2510 (19 314).....	43

5.3	MĚŘENÍ TVRDOSTI METODOU DSI.....	44
5.4	FÁZE A STRUKTURNÍ SLOŽKY	45
6	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	46
6.1	NAMĚŘENÉ HODNOTY ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	46
6.1.1	Ocel 1.0036 (11 373) vzorek 1, řezáno laserem.....	46
6.1.2	Ocel 1.0060 (11 600) vzorek 2, řezáno laserem.....	48
6.1.3	Ocel 1.0535 (12 060) vzorek 3, řezáno laserem.....	50
6.1.4	Ocel 1.7131 (14 220) vzorek 4, řezáno plazmou	52
6.1.5	Ocel 1.7147 (14 221) vzorek 5, řezáno laserem.....	54
6.1.6	Ocel 1.8504 (14 340) vzorek 6, řezáno laserem.....	56
6.1.7	Ocel 1.2510 (19 314) vzorek 7, řezáno laserem.....	58
6.2	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ OCELÍ.....	61
6.2.1	Vtisková tvrdost	61
6.2.2	Tvrdost podle Vickerse	63
6.2.3	Modul pružnosti	65
6.2.4	Maximální hloubka vtisku.....	66
6.2.5	Elastická práce	68
6.2.6	Plastická práce.....	69
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
	SEZNAM TABULEK.....	79
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

ÚVOD

Cílem bakalářské práce je zjistit jaký vliv má proces dělení kovových materiálů nekonvenčními metodami na výsledné mechanické vlastnosti materiálů. Klasické způsoby dělení materiálů nejsou v dnešní době příliš vhodné z důvodu těžké obrobitelnosti některých materiálů, a proto se v takovém případě používají nekonvenční metody. V současnosti jsou ve strojírenském průmyslu kladeny na výrobky přísnější podmínky na kvalitu, takže je nutné si správně zvolit materiál a jeho způsob dělení. Ať už se rozhodneme pro řezání mechanické nebo pomocí nekonvenčních metod vždy dochází k ovlivnění povrchové vrstvy materiálu, a tím ke změně mechanických vlastností.

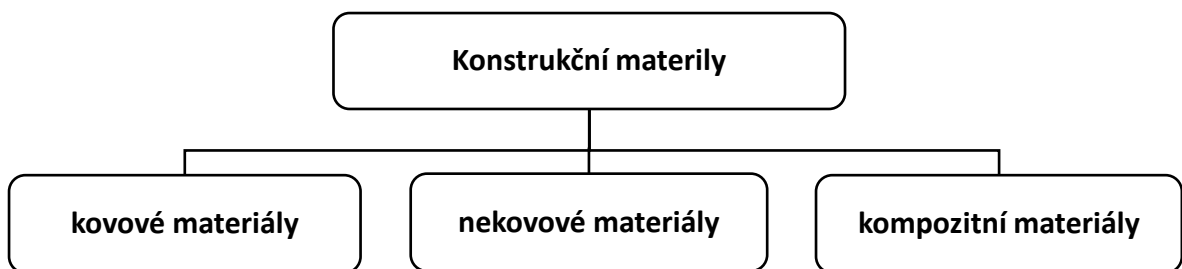
Teoretická část se zabývá konstrukčními materiály a jejím rozdělením. Zkoumaným materiálem v této práci je ocel, která je nejpoužívanějším kovovým materiálem. Dále jsou představeny nekonvenční metody dělení kovových materiálů se zaměřením na laser, plazmu, vodní paprsek a výhody a nevýhody, které sebou přináší. V závěru teoretické části jsou popsány metody pro měření tvrdosti materiálů s důrazem na instrumentovanou zkoušku tvrdosti, která je použita v experimentální části.

Předmětem praktické části je ověřit jaký vliv má dělení kovových materiálů pomocí laseru a plazmy na mechanické vlastnosti materiálů v místě řezu. Prvním krokem je příprava vzorků tak, aby jej bylo možné upnout do mikrotvrdoměru a získat požadované hodnoty. Jako zkušební vzorky je vybráno 7 druhů ocelí se zastoupením jak legovaných, tak i nelegovaných. U těchto ocelí je zkoumáno, do jaké míry a jak se změni mechanické vlastnosti v místě řezu po tepelném ovlivnění. Převážná část praktické práce se zabývá instrumentovanou zkouškou tvrdosti, která nám zjišťuje změnu mechanických vlastností po dělení materiálů laserem a plazmou. Závěr práce vyhodnocuje naměřené hodnoty 6-ti mechanických vlastností, z nichž nejdůležitější je tvrdost a porovnává je mezi jednotlivými druhy ocelí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KONSTRUKČÍ MATERIÁLY

Pod pojmem materiály rozumíme pevné látky, který člověk využíval od počátku. Jednou z nejdůležitějších oblastí využití materiálů jsou stroje, nástroje a nářadí. Základem všech strojů a zařízení je konstrukční materiál, jehož znalost potřebují konstruktéři, aby mohli správně zvolit nejvhodnější materiál pro jednotlivé části stroje a technologové ať mohou správně dodržovat technologický proces. Materiály využívané v konstrukcích (konstrukční materiály) rozdělujeme do tří základních skupin, které se výrazně liší svými vlastnostmi a látkovou podstatou. [3,4,5]



Obr. 1 Rozdělení konstrukčních materiálů [5]

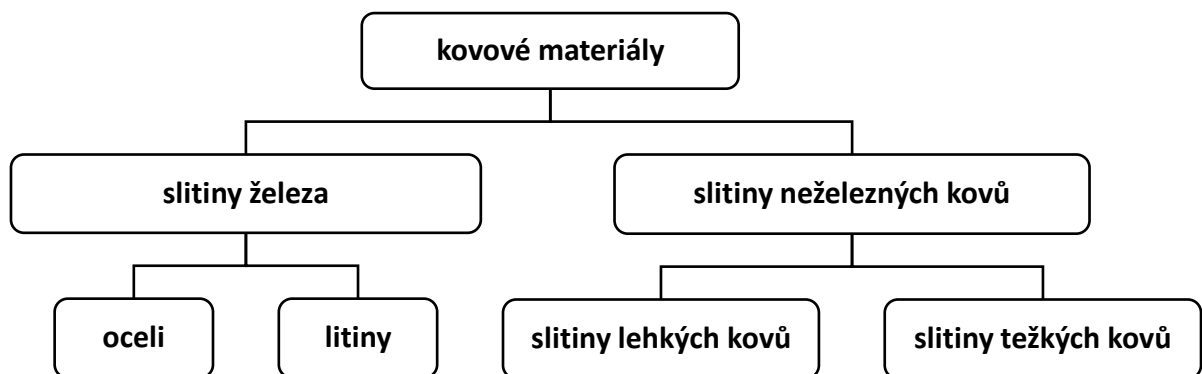
1.1 Kovové materiály

U kovových materiálů je hlavní složkou je kovový prvek např. železo (Fe), hliník (Al) a další. Z důvodu, že nelze vyrobit absolutně čistý kov se vždy jedná o slitiny z více kovů. Výraz slitina znamená, že materiál vznikl společným roztavením a následným ztuhnutím (slitím) více složek. Příměsi jsou považovány buď za nečistoty, nebo jsou záměrně přidávány za účelem zlepšení např. mechanických vlastností. Úmyslné přidávání přísadových prvků se nazývá legování. Univerzálnost těchto materiálů je dána velkou rozmanitostí vlastností, které mohou nabývat. V praxi jsou např. použity kovové materiály s velmi nízkými teplotami tání nižšími než 100 °C, ale také vysokotavitelné materiály s teplotami tání nad 2000 °C. Rovněž se používají materiály měkké a tvárné (olovo) a proti tomu materiály extrémně pevné (titan). Žádná jiná skupina materiálů nemění své vlastnosti v takovém rozmezí. V dnešní době díky hlubokým znalostem člověka v oblasti metalurgie můžeme vyrábět kovový materiál prakticky na míru pro danou aplikaci. Vlastnosti kovů jsou velmi různorodé a mění se ve širokých mezích, ale přesto lze definovat vlastnosti, které jsou společné pro celou skupinu kovových materiálů. Těmito vlastnostmi jsou:

- a) **Tvárnost (kujnost).** Tato vlastnost charakterizuje schopnost kovů trvalé (plastické) deformace a jsou velmi důležité pro zpracování do požadovaných tvarů. Některé

kovy jsou tvárné za nízkých teplot, pro jiné teplota musí být vyšší. Tvárnost je důsledkem typu chemické vazby v kovech a z něj vyplívající krystalické mřížky.

- b) **Elektrická a tepelná vodivost.** Kovy jsou dobrými elektrickými i tepelnými vodiči. Obě vlastnosti jsou důsledkem elektronové struktury kovů. V případě mědi a hliníku je elektrická vodivost tak vysoká že se využívá k vedení elektrického proudu.
- c) **Typický kovový lesk, odrazivost viditelného záření.** Tato vlastnost souvisí s elektronovou strukturou kovů. [3]



Obr. 2 Rozdělení konstrukčních materiálů [5]

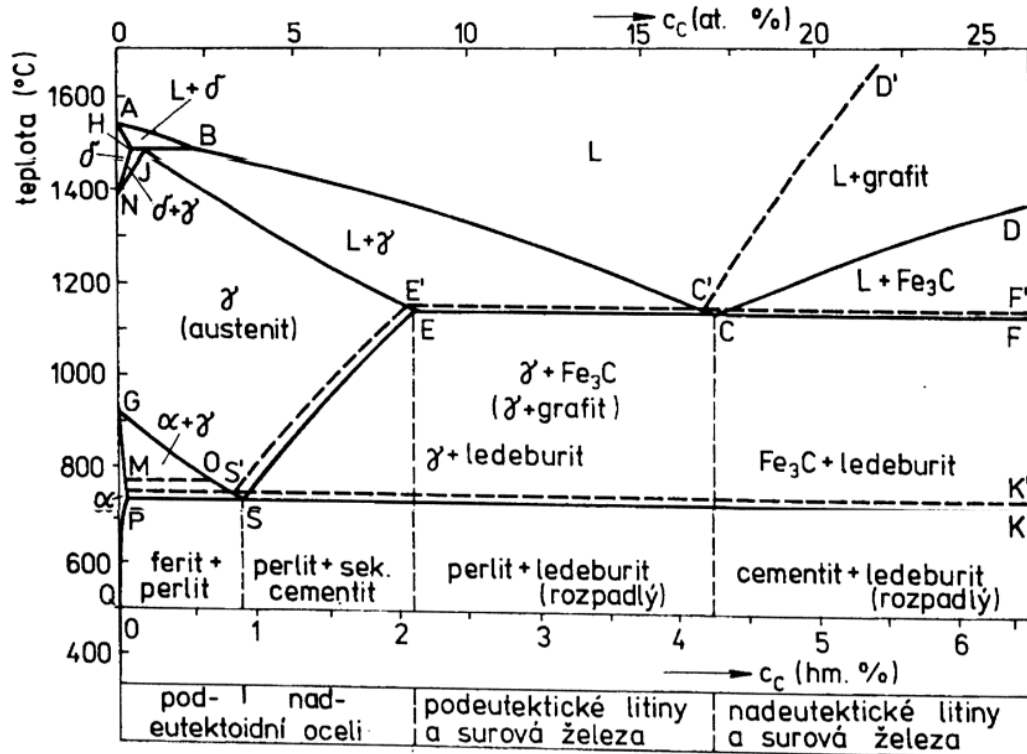
1.2 Slitiny železa

Železo je měkký kov, který je dobře tvárný a má poměrně nízkou pevnost. V závislosti na teplotě se železo vyskytuje v krystalových modifikacích, které se s rostoucí teplotou mění v následujícím pořadí:

- Modifikace $\alpha(\text{Fe})$ s krystalovanou strukturou kubickou prostorově centrovanou, která je stabilní při teplotách nižších než 910 °C.
- Modifikace $\gamma(\text{Fe})$ s krystalovou strukturou kubickou plošně centrovanou, která je stabilní v teplotním rozmezí 910–1400 °C.
- Modifikace $\delta(\text{Fe})$ s krystalovou strukturou znovu kubickou prostorově centrovanou, která je stabilní v teplotním rozmezí 1400-1539 °C

Výroba železa probíhá ve vysokých pecích. V pecích dochází k redukci železné rudy uhlíkem. Ve vyrobeném materiálu je vždy větší či menší množství uhlíku, který významně ovlivňuje jeho vlastnosti. Při odhadu vlastností železných slitin můžeme vycházet z rovnovážného diagramu železa s uhlíkem. Uhlík s železem tvoří tuhé roztoky s omezenou rozpustností uhlíku. Po překročení rozpustnosti uhlíku v tuhém roztoku se uhlík vylučuje jako sa-

mostatná fáze. Při nízkých obsazích tvoří uhlík sloučeninu Fe_3C . Tato sloučenina není stabilní a může se rozkládat na grafit a železo. Soustava $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ se označuje jako soustava metastabilní a podle této soustavy tuhnou a chladnou hlavně oceli. Když je uhlík vyloučen jako grafit, jedná se o soustavu stabilní, která má svůj význam při posuzování změn při tuhnutí a chladnutí litin a surových želez. Rovnovážný diagram železo-uhlík stabilní i metastabilní soustavy je znázorněný na obrázku. [2]



Obr. 3 Rovnovážný diagram soustavy železo-uhlík [2]

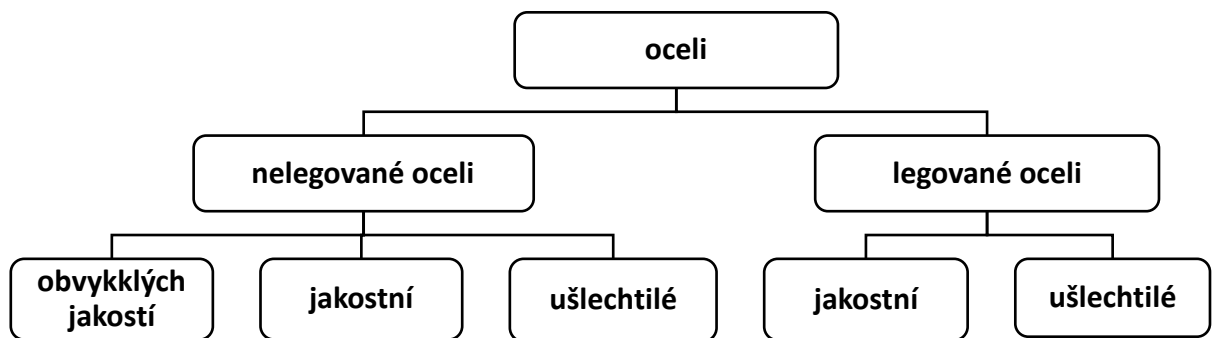
Důležité teploty a koncentrace jsou v diagramu označeny velkými písmeny. U stabilní soustavy jsou tato písmena opatřena apostrofem např. C'. V diagramu se vyskytují následující fáze:

- Ferit – tuhý roztok uhlíku v $\text{Fe } \alpha$;
- Austenit – tuhý roztok uhlíku v $\text{Fe } \gamma$;
- δ (delta ferit) – tuhý roztok uhlíku v $\text{Fe } \delta$;
- cementit – chemická sloučenina železa a uhlíku Fe_3C ;
- grafit – uhlík krystalizující v šesterečné soustavě;
- ledeburit – eutektikum v metastabilní soustavě (při eutektické teplotě se skládá z krystalů austenitu a cementitu);
- grafitické eutektikum – eutektikum ve stabilní soustavě (při eutektické teplotě se skládá z austenitu a grafitu);

- eutektoid v metastabilní soustavě se nazývá perlit a skládá se z feritu a cementitu. Morfologicky se rozeznává perlit lamelární (lamely ferit z a cementitu) a perlit zrnitý (ferit s globulárním cementitem).

1.3 Oceli

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších prvků. Chemickým složením, tepelným zpracováním a způsobem tváření je možné měnit mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti oceli v širokém rozmezí. Kvůli všestranným vlastnostem se ocel řadí mezi nejdůležitější a nejpoužívanější technické materiály a používá se převážně k výrobě strojů, zařízení a nástrojů. Podle chemického složení a podle jakosti máme následující rozdělení: [3, 7]



Obr. 4 Rozdělení ocelí do skupin [2]

1.3.1 Nelegované oceli

Nelegované oceli jsou slitiny železa a uhlíku u nichž obsah dalších prvků nepřekročí stanovené mezní hodnoty. Podle obsahu uhlíku dělíme oceli na:

- podeutektoidní (méně než 0,8 % uhlíku);
- eutektoidní (přibližně 0,8 % uhlíku);
- nadeutektoidní (nad 0,8 % uhlíku).

Podeutektoidní oceli se využívají jako konstrukční materiály, zatímco nadeutektoidní oceli spíše jako nástrojové materiály. Nelegované oceli představují většinu všech vyrobených ocelí. [3]

Nelegované oceli obvyklých jakostí

Jsou to druhy nelegovaných ocelí, kde požadavky na jakost nevyžadují zvláštní opatření při výrobě, ale nejsou určeny pro tepelné zpracování. [7]

Nelegované oceli jakostní

Jde o oceli, pro které není předepsaná reakce na tepelné zpracování ani požadavky na stupeň čistoty. Jsou však na ně kladeny přísnější požadavky na namáhání než u oceli obvyklých jakostí, takže výroba oceli jakostní vyžaduje větší přesnost. Ocel se využívá např. pro výrobu tlakových nádob. [5, 7]

Nelegované oceli ušlechtilé

Jsou to oceli, které na rozdíl od jakostní oceli vykazují vyšší stupeň čistoty. Jsou určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení. Mají přesné chemické složení a rovnoměrnější reakci na tepelné zpracování. Těchto vlastností je dosahováno zvláštními podmínkami výroby. Nelegované ušlechtilé oceli zahrnují oceli s požadavkem na nárazovou práci, oceli pro jaderné reaktory apod. [7]

1.3.2 Legované oceli

Jsou to slitiny železa a uhlíku kde obsah legujícího prvku překračuje stanovenou mezní hodnotu. Legování se provádí zejména za účelem zvýšení mechanických vlastností (např. houževnatosti, tvrdosti), korozní odolnosti, fyzikálních vlastností a dalších. Podle celkového obsahu přidávajícího prvku dělíme legované oceli na:

- nízkolegované pod (5 % legujícího prvku);
- střednělegované (5-10 % legujícího prvku);
- vysocelegované (nad 10 % legujícího prvku). [3]

Legované oceli jakostní

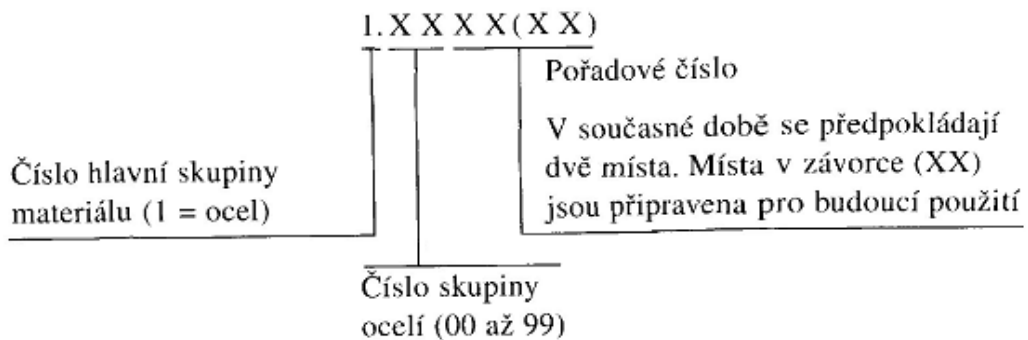
Tyto oceli mají podobné využití jako nelegované jakostní oceli. Musí však vyhovovat speciálním podmínkám a obsahovat legovací prvky, které z nich dělají legované oceli. Mezi legované jakostní oceli patří konstrukční ocel pro ocelové konstrukce včetně tlakových nádob a potrubí, ocel na výrobu kolejnic a výztuží atd. [7]

Legované oceli ušlechtilé

Jsou to oceli, u nichž je dosahováno požadovaných zpracovatelských a užitných vlastností, a to přesně stanoveným chemickým složením a speciálními podmínkami výroby. Patří sem zejména nerezavějící ocel, žáruvzdorná ocel, nástrojová ocel a další. [7]

1.3.3 Označení ocelí

V dnešní době se využívá značení oceli podle evropské normy ČSN EN 10027. Tato evropská norma nahrazuje staré označení oceli podle české ČSN 42 0002 (třídy ocelí 10, ..., 19). Norma ČSN EN 10027-1 stanovuje pravidla pro označování oceli písmeny a čísly a vyjadřuje charakteristické znaky oceli. Předmětem normy ČSN EN 10027-2 je stanovení pravidla pro systém číselného označování oceli. Zahrnuje skupiny oceli a jejich charakteristické vlastnosti. Označení oceli probíhá podle obrázku. [7]



Obr. 5 Schéma značení ocelí dle ČSN EN 10027-2 [7]

2 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ NEKONVEKČNÍMI METODAMI

Klasické způsoby třískového obrábění, nejsou vždy vhodné a mnohdy se nedají vůbec použít. V různých oblastech strojírenské výroby nelze třískové obrábění použít z hlediska kvality obrábění, obrobitelnosti materiálu, produktivity práce, ekologického apod. Některé takzvané těžkoobrobitelné materiály nelze klasickými metodami obrábět anebo lze jen s velkými obtížemi. V takovém případě se k obrábění materiálu používají nekonvenční metody, které převážně nevyužívají mechanické práce pro úběr materiálu. K úběru se využívají tepelné, elektrické, chemické, ultrazvukové a jiné fyzikální jevy. Využívá se také jejich vzájemná kombinace. U většiny nekonvekčních metod obrábění není obrobitelnost materiálu limitována mechanickými vlastnostmi, ale je vázána především na fyzikální vlastnosti materiálu. Nejdůležitějšími fyzikálními vlastnostmi materiálu jsou tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost a chemické složení. [6]

Nekonvenční metody obrábění se odlišují dle fyzikálních účinků použitých pro obrábění a podle toho se i tak dělí, na:

- elektroerozivní obrábění,
- elektrochemické a chemické obrábění,
- obrábění laserem,
- obrábění vodním paprskem,
- obrábění ultrazvukem,
- obrábění plazmou,
- obrábění paprskem elektronů. [6]

Řezání je ztrátové oddělování materiálu, při kterém dochází k destrukci materiálu v místě řezu. Cílem řezání je oddělit konstrukční materiál buď s co nejlepší kvalitou řezné plochy a v úzkých rozměrových tolerancích (konstrukčního řezání) nebo bez ohledu na kvalitu řezu (destrukčního řezání). Metoda dělení se proto musí volit s ohledem na tento požadavek. [4, 5]

2.1 Dělení kovových materiálu laserem

Od začátku průmyslového používání laseru víme, že fotonovým paprskem se kov může natavit a odpařit tak, že vznikne otvor. Dříve se tento způsob převážně využíval jen při vrtání malých otvorů do tvrdých slitin. Dnes již průmyslové lasery poskytují tak vysoký výkon, že se mohou používat pro tvarové řezání kovů, plastů, dřeva, textilů a dalších materiálu. [4]

2.1.1 Princip a charakteristika laseru

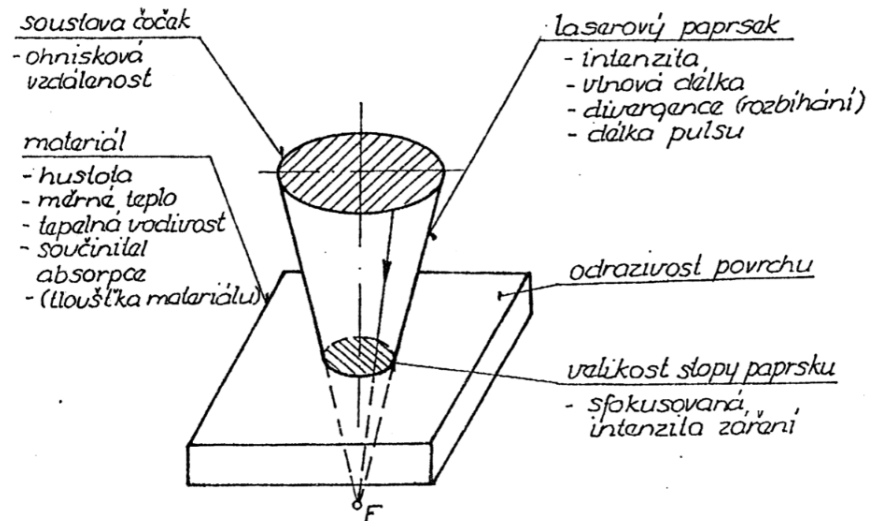
Laser je v podstatě generátorem elektromagnetického záření v optické oblasti vlnových délek při využití stimulovaného záření. Základní princip laseru je možné vysvětlit na základě kvantové fyziky a zjednodušeného planetového modelu atomu. U tohoto modelu obíhá na uzavřených drahách elektron okolo kladně nabitého jádra (protonu). Každá dráha má určité množství energie (energetická hladina). Čím je dráha blíže k jádru tím má menší energii. U atomu v základním stavu mají všechny elektrony nejnižší energii, takže jsou nejbližší u protonu. Přechod elektronu ze základní energetické hladiny na další energetickou hladinu vyžaduje absorpci určité hodnoty energie. Přesné množství této energie se nazývá kvantem. Kvant je vlastně elektromagnetickým zářením o určité frekvenci. Aby se atom vrátil do základního stavu (na nejnižší energetickou hladinu), musí odevzdat přebytečnou energii ve formě např. elektromagnetického záření. Optickými čočky a zrcadly se světelné paprsky ze společného zdroje jednoduše ovládají. Světelný paprsek (svazek paprsků) při dopadu na přepážku přemění svojí energii na energii tepelnou. [6]

Základ tohoto způsobu je soustředění energie na malou plošku obrobku. Přeměna energie záření na energii tepelnou se v místě dopadu zahřeje na tak vysokou teplotu, že je vyšší než teplota tavení obráběného materiálu. Tím způsobem dochází v místě řezu k tavení a vypařování materiálu. [4]

Lasery pro technologické operace je možné rozdělit podle použité aktivní látky (aktivního prostředí):

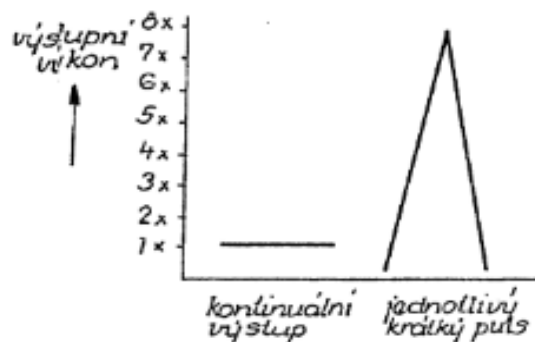
- plynové
- v pevné fázi
- kapalinové

V dnešní době se v průmyslu nejčastěji používají plynové lasery, které využívají směsi plynů CO₂ (oxidu uhličitého), N₂ (dusíku) a He (helia). To, jak laser působí na materiál ovlivňuje množstvím technických a technologických parametrů znázorněných na obr. 6 [6]



Obr. 6 Technické a technologické parametry [6]

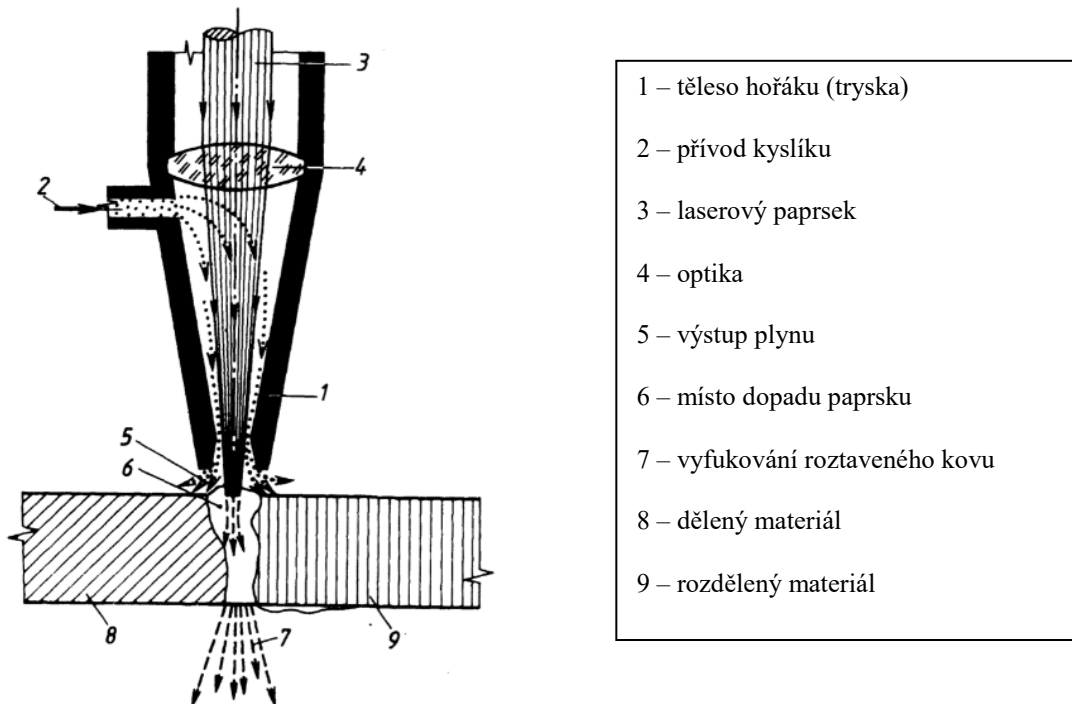
Provoz laseru je možný ve dvou režimech, a to v kontinuálním a pulsním. Pulsní provoz umožňuje dosáhnout velké energie na krátkou dobu, zato kontinuální dosahuje stejné energie po celou dobu. Na níže uvedeném obrázku je znázorněno porovnání výstupního výkonu obou režimů.



Obr. 7 Výstupní výkon režimů [6]

2.1.2 Způsob řezání technických materiálů laserem

Řezání laserem spočívá ve spalování nebo protavování řezaného materiálu. Laserový paprsek je fokusován do místa řezání tzv. ohniska. Vlivem soustředěné energie do průměru 0,05 – 0,25 mm je hustota energie větší než $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ a teplota v místě dopadu na materiál dosahuje hodnoty $25\cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$. Schéma řezání laserem je na obr. 8 [6, 8]



Obr. 8 Schéma řezání laserem [8]

Řezání spalováním je ohřev řezaného materiálu vykonáván laserovým paprskem a řezání je důsledkem reakce přivedením kyslíku do místa řezu. Toto řezání je charakterizované úzkou řeznou spárkou a velmi dobrou jakostí řezu, ale má vyšší spotřebu energie na jednotku délky řezu. Při řezání protavováním je roztavený materiál z řezné spáry vyfukován inertním plynem. U nekovových materiálů, které snadno hoří (např. PVC, plexisklo, textilní materiály, polypropylen atd.) se musí materiál vyfukovat dusíkem nebo argonem, z důvodů ochrany proti vznícení nebo opálení řezných hran. Toto řezání je charakteristické vysokou rychlostí a nízkou spotřebou energie na jednotku délky řezu. Po řezu jsou malé stopy po odběru materiálu a v některých případech kapičky rozstříknutého kovu na spodní straně řezaného polotovaru. [6, 8]

2.1.3 Výhody a nevýhody řezání laseru

Výhody:

- řezací hlava se pohybuje po souřadnicovém stole pomocí předem stanoveného programu;
- dosahuje velké řezné rychlosti např. u nástrojové oceli při tloušťce 2 mm je rychlost řezání $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- plochy řezu mají velmi dobrou jakost povrchu (kvalitní řez), který nevyžaduje další úpravy;

- lze řezat mnoho různých materiálů (všechny oceli, hliníkové slitiny, plasty, textil, keramika atd.);
- podle průměru trysky jde řezat i tvarové řezy s velmi malým zaoblením.

Nevýhody:

- drahá pořizovací cena řezacího zařízení;
- nutná bezpečnostní opatření při použití;
- malá účinnost. [4, 5, 6, 9]

2.2 Dělení kovových materiálů plazmou

Zařízení na dělení materiálů plazmou se vyvinulo z plazmového svařovacího hořáku. Upravila se tryska plazmového hořáku a zvýšil se tlak plazmového plynu tak, aby se podstatně zvýšila výstupní rychlost a teplota plazmového paprsku. [4]

2.2.1 Princip a charakteristika plazmy

Plazma vlastně je plynový stav hmoty, který se vytváří pomocí tzv. plazmové pistole. Elektrický oblouk potřebný k zahřání plynu a vytvoření plazmy vzniká mezi anodou a katodou. Princip plazmy je založen na tavení řezaného materiálu teplotou vyšší než 10 000 °C. V elektrickém oblouku, který hoří mezi netavící se elektrodou (katoda) a řezným materiálem (anoda) dochází k rozkladu molekul plynu vlivem tepla. Z hořáku vychází vysokou rychlostí úzký paprsek plazmy, který je ionizován a důsledkem toho dobře vede elektrický proud. Materiál se v místě dopadu paprsku taví a je kinetickou energií proudu vytlačován z místa řezu. [4, 6]

V průmyslové praxi se používá několik typů hořáků, u kterých použité plyny nebo směsi plynů zajišťují tyto funkce:

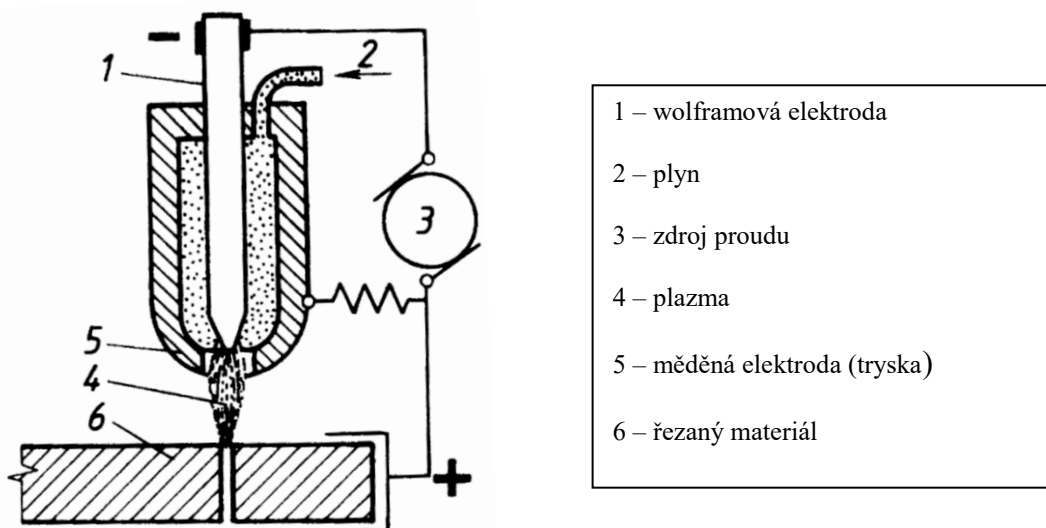
- plazmové plyny jsou přiváděny do oblouku, kde jsou ionizovány;
- fokusační plyny zužují paprsek plazmatu po opouštění trysky z hořáku;
- ochranné plyny obklopují a chrání paprsek plazmatu a natavený kov před účinkem atmosféry.

Mezi základní typy hořáků patří hořák s transferovým obloukem, kde je anoda tvořená obrobkem a hořák s netransferovým obloukem, ve kterém tvoří anodu těleso hořáku. Tyto dva typy hořáků se používají převážně pro řezání ušlechtilých ocelí a neželezných kovů. Dalším typem je hořák se vstřikováním vody. Voda se vstřikuje do plazmového paprsku a tím se

zvyšuje trvanlivost trysky. Řezání se ve většině případů provádí pod hladinou vody, což má dobrý vliv na snížení hlučnosti a prašnosti. Tento hořák se používá pro řezání konstrukčních i vysoce legovaných ocelí, hliníku, titanu a mědi. [6]

2.2.2 Způsob řezání technických materiálu plazmou

Mezi elektrodou a řezací tryskou nejprve vznikne elektrický oblouk. Přiváděný řezací plyn (argon, dusík, helium a různé plyny a směsi plynů) se při průchodu elektrickým obloukem mění na plazmu a jeho pohyb k materiálu je urychlován elektrickým polem. Při dopadnutí paprsku plazmatu na materiál dojde k jeho tavení a okamžitému odpařování. Paprsek plazmatu může mít teploty vyšší než 10 000 °C. [5]



Obr. 9 schéma řezání plazmou [8]

2.2.3 Výhody a nevýhody plazmy

Výhody:

- možnost řezat všechny kovové materiály, hlavně vysokolegované oceli a hliník;
- vysoká řezná rychlost při oddělování materiálů je do $6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a při kvalitním řezu je do $4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$;
- vysoká kvalita řezu;
- řezání materiálů až do tloušťky 100 mm.

Nevýhody:

- velký hluk při provozu;
- při řezání vzniká značné množství škodlivých dýmů, prachů a UV záření;

- nutná bezpečnostní opatření;
- vysoká pořizovací cena řezacího zařízení. [5, 6]

2.3 Dělení kovových materiálů vodním paprskem

Vysokorychlostní sdružený malopřůměrový vodní proud s tlakem technologické kapaliny nad 100 MPa nazýváme vodním paprskem. Vodní paprsek je technologie, která je založena na využití abrazivních (brusných) účinků vodního paprsku pro obrábění (dělení) materiálů. Tato metoda byla vyvinuta při vývoji technologie na zpracování netradičních, převážně nekovových materiálů. Díky svým přednostem a univerzálního uplatnění je tato technologie využívána ve spoustě průmyslových oborů. [4, 6]

2.3.1 Princip a charakteristika vodního paprsku

Základem vodního paprsku je pístové čerpadlo, které slouží k přenosu energie. Toto čerpadlo dopravuje hydraulický olej o regulovaném tlaku do multiplikátoru. Multiplikátor je zařízení, na kterém z přiváděného oleje z řídicího čerpadla závisí tlak kapaliny. Pro zvýšení objemového průtoku kapaliny se využívají paralelní zesilovače tlaků. Pracovní kapalinou je ve většině případů obyčejná voda. Voda napřed prochází filtrační jednotkou, kde je zbavena všech mechanických nečistot a poté je přivedena do multiplikátoru, v němž vzniká požadovaný řezný tlak. Tato kapalina se přivádí do speciálního vysokotlakového akumulátoru, ve kterém se vyváží tlakové rázy. Z akumulátoru vychází uklidněná kapalina, která je rozvedena vysokotlakým potrubím do řezacích hlav. [4]

Technologie dělení materiálů vodním paprskem rozdělujeme na:

- a) dělení materiálů čistým vodním paprskem

Tlak kapaliny je možné regulovat podle technologických potřeb a druhu obráběného materiálu. Vodní trysky jsou vyráběny z diamantu, safíru, rubínu a jejich velikost zajišťuje různou kinetickou energii paprsku. Je možné řezat materiály tloušťek od 5 do 15 mm i materiály s vysokou pevností např. kevlar, laminátů uhlíkových kompozitu apod.

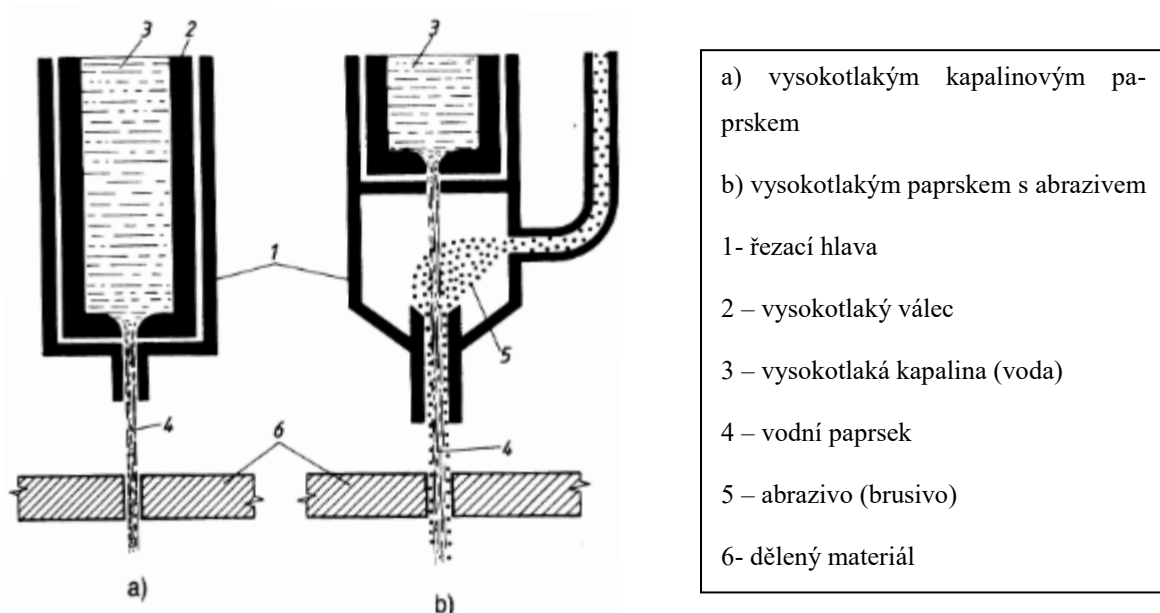
- b) dělení materiálů vodním paprskem s příměsí brusného materiálu

Tato technologie zvyšuje účinnost paprsku přivedením brusných zrn do proudu vody. Používají se jak syntetické, tak přírodní brusné materiály jako je křemičitý písek, korundová zrna, olovín apod. Tryska musí odolávat vysokým brusným účinkům a musí být vyráběna ze speciálních materiálů. Při běžných parametrech tryška dosahuje životnosti max. 8 hodin

a je možné řezat prakticky všechny materiály (např. optická skla, titan, keramika, ocel i izolační materiály). [6]

2.3.2 Způsob řezání technických materiálů vodním paprskem

Řezání probíhá tak, že voda je nejdříve stlačena tlakem (400 MPa) a odvedena do řezací hlavy. Následně přes trysku s průměrem 0,1-0,5 mm je vystřikována v úzkém paprsku ven. Řez je třeba začínat od kraje nebo z počátečního otvoru. Rychlost řezu je závislá na tvrdosti a soudržnosti materiálu i na požadované kvalitě řezu. Při provozu vodního paprsku je řezání velmi hlučné, ale dá se ztlumit řezáním pod vodou. Rychlost paprsku je 3x větší než rychlost zvuku a to přibližně 1 000 m/s. [5]



Obr. 10 schéma řezání vodním paprskem [8]

2.3.3 Výhody a nevýhody vodního paprsku

Výhody:

- tenký řez s minimálním odpadem, výhoda u dělení drahých kovů;
- při řezání nevzniká žádný prach ani toxický plyn;
- v místě řezu nevzniká žádné oteplení, a tím žádná deformace;
- je možné řezat prakticky všechny materiály, které jsou citlivé na teplotu,

Nevýhody:

- velmi vysoká cena zařízení na řezání vodním paprskem;
- nevyhnutelný kontakt s vodou, bez rychlého ošetření vzniká koroze. [5, 6, 8]

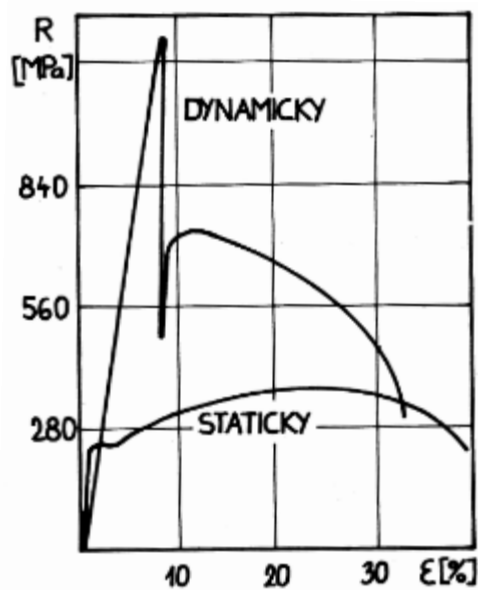
2.4 Tepelné ovlivnění materiálu

Dělení materiálu teplotním dělením je spojeno s teplotně-deformačním cyklem jako při svařování. Při způsobu řezání je důležité počítat s obdobnými problémy jako je např. vznik trhlin, zakalení, vyžhání, rekystalizace nebo ztráta korozní odolnosti. K těmto problémům dochází důsledkem velkých teplotních rozdílů mezi okolní teplotou a teplotou v místě řezu. U způsobu řezání materiálů laserem nebo plazmou se teplota v místě řezu pohybuje nad 10 000 °C, kdež to okolní teplota je jen okolo 20 °C. Tento výrazný tepelný spád způsobí ochlazení kritickou rychlostí, po kterém dochází k tepelnému ovlivnění materiálu. Kvůli těmto problémům je proto důležité každý materiál posuzovat odděleně. V řadě případů je také nutné přepsat určitý teplotní režim. [4]

3 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Výběr materiálu pro výrobu různých součástí, stavbu konstrukcí a zařízení je založen na znalosti mechanických, technologických, fyzikálních i chemických vlastností materiálu. Prvním krokem pro výběr materiálu je rozbor těchto vlastností. Po zjištění nejdůležitějších vlastností můžeme vybrat ten správný materiál. Rozhoduje se o tom a, zda bude materiál pevný nebo tvárný, zatížen velkou nebo malou silou a při jaké teplotě a v jakém prostředí bude použit. Pro vlastní výběr materiálu však potřebujeme tyto vlastnosti číselně vyjádřit. Vyjádření vlastností materiálu číselnými hodnotami nazýváme materiálová charakteristika, která kvantifikuje určitou vlastnost, jenž se určuje experimentálně (normalizovanými zkoušky). [1]

Mechanické zkoušky zjišťují mechanické vlastnosti, které vyjadřují deformační chování materiálu a podmínky porušení vzorků za působení vnějších sil. Pomocí těchto zkoušek získáváme nejdůležitější hodnoty pro použití materiálu v konstrukci technologických zařízení, které musí odolávat při zatížení vnějšími silami základním druhům namáháním (tahem, tlakem, ohybem, kroucením, rázem). Toto jsou převážně zkoušky destrukční, při kterých se zkoušený materiál namáhá až do porušení. Kvůli takovému důvodu se zkoušky mohou provádět jen na zkušebních vzorcích (zkušebních těles). Mechanické zkoušky se dělí podle různých hledisek, nejčastěji je rozdělujeme na zkoušky statické (pomalu narůstající síla nebo síla stále velikosti) a zkoušky dynamické (síla je v čase proměnná nebo působí rázem). [4]



Obr. 11 Porovnání pracovního diagramu při statické a dynamické zkoušce [4]

3.1 Zkoušky tvrdosti

Zkouška tvrdosti je rychlou a levnou zkouškou, která slouží k zjištění mechanických vlastností. Tvrdostí rozumíme jako odporu materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Posuzuje se podle velikosti vtisku vtačeného zkušebního tělesa při určitém tlaku nebo nárazové energie. Zjištěná hodnota není fyzikální veličinou, neboť výsledky jsou ovlivněny způsobem provedení zkoušky. Výsledky je možné navzájem porovnávat pouze na základě empirických vztahů. Zkoušky tvrdosti patří mezi nejpoužívanější druhy zkoušek konstrukčních materiálů, protože má určité výhody. Zkoušky tvrdosti jsou velmi rychlé a snad proveditelné a také se mohou použít i na hotových součástích bez jejich znehodnocení. [1,4]

Metod měření tvrdosti se rozdělují podle použitého principu na:

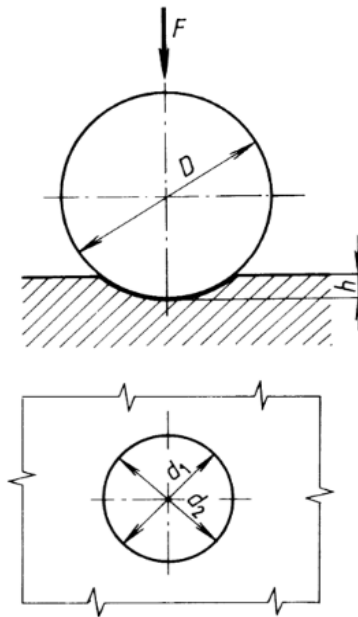
- vrypové – tvrdým hrotem se při malém zatížení vytvoří na povrchu materiálu zkoušeného předmětu rýha (vryp), jehož šířka je měřítkem tvrdosti;
- odrazové – tvrdost se měří velikosti odrazu závaží s kulovitě vybroušeným hrotem, které dopadá z určité výšky na zkoušený předmět;
- vtiskové (vnikací, identační) – tvrdost se určuje z plochy povrchu nebo hloubky vtisku způsobeného vnikacím tělesem (indentorem). [4]

Zkoušky tvrdosti se dále rozdělují podle druhu použité síly na zkoušky:

- statické, kde zatěžující síla je stála nebo se pozvolně zvyšuje. Síla působí kolmo na povrch předmětu a vzrůstá až po stanovenou hodnotu. Na požadované hodnotě síla působí předepsanou dobu.
- dynamické, kde zatěžující síla působí na povrch materiálu. Zatěžující síla se pozvolně nezvětšuje, ale působí rázem.

3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Brinellova zkouška tvrdosti se měří pomocí vnikací metody a řadí se mezi statické zkoušky. Měření probíhá tak, že se do zkoušeného materiálu vtačuje ocelová kalená nebo tvrdokovová kulička o průměru D . Kulička je vtačována zkušební silou F a po jejím odlehčení se měří průměr vtisku d (aritmetický průměr dvou na sebe kolmých rozměrů d_1 a d_2) nebo se měří hloubka vtisku h . Zkouška je znázorněna na obrázku uvedeném níže.



Obr. 12 Zkouška tvrdosti podle Brinella [7]

Tvrдость se vyjadřuje poměrem zatížení F [N] a plochy povrchu vtisku A [mm²]. Plocha A představuje plochu kulového vrchlíku o průměru D . Tvrдость podle Brinella se označuje HB a určuje se podle vzorce: [4,5,7]

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

Kde: F je zatěžující síla zkušební kuličky v N

A je plocha vtisku v mm²

D je průměr zkušební kuličky v mm

d je aritmetický průměr vtisku kuličky v mm viz. Obr. 12

Tvrдость je vyjádřena prostým číslem v jednotkách tvrdosti podle Brinella. Na výslednou hodnotu tvrdosti má největší vliv velikost zatížení pro daný průměr kuličky, doba zatížení a velikost vtisku s ohledem na rozměry zkoušeného předmětu. Zkušební kuličky mají průměry 10, 5, 2,5, 2 a 1 mm a jejich zatížení se volí podle vzorce:

$$F = K \cdot D^2 \quad (2)$$

Kde: F je zatěžující síla zkušební kuličky v N

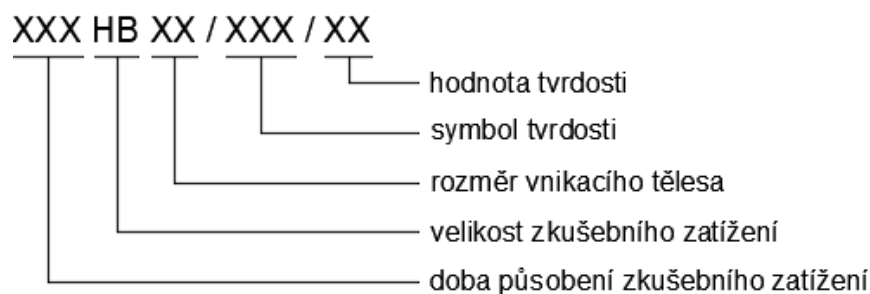
D je průměr zkušební kuličky v mm

K je materiálový koeficient

Koeficient K je např. pro ocel $K = 30$, pro slitiny mědi $K = 10$, pro lehké kovy $K = 5$.

Doba maximálního zatížení závisí na druhu materiálu a jeho tvrdosti např. u slitiny železa je doba 10 až 15 s, ale u neželezné slitiny 10 až 180 s. Průměr vtisku se měří vhodným měřicím přístrojem (mikroskopem). Povrch zkoušeného materiálu musí být dostatečně rovný a hladký. Tloušťka zkoušeného tělesa nesmí být menší než desetinásobek hloubky vtisku, jinak by měření bylo ovlivněno tvrdostí podložky. [4]

Tvrdost podle Brinella se označuje čísly a písmeny např. 185 HB 5/750/20 a to podle obecného schématu pro značení které je na obrázku:

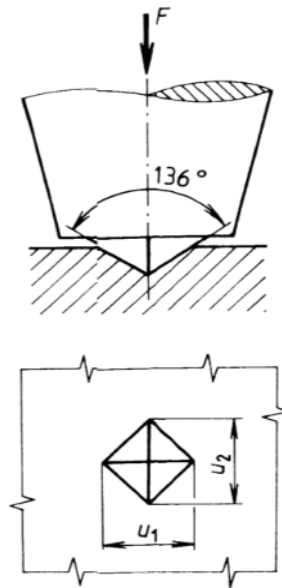


Obr. 13 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [7]

Brinellova zkouška se obvykle používá pro měření tvrdosti s nižší a střední tvrdostí, která je vhodná zejména pro měření heterogenních materiálů. [4]

3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Vickersova zkouška tvrdosti se měří pomocí vnikací metody a řadí se mezi statické zkoušky. Měření tvrdosti probíhá tak, že se do plochy zkoušeného materiálu vtlačuje vnikající těleso zkušební silou F . Obvyklá zatížení jsou od 98 N do 980 N. Doba působení zatížení musí být 10 až 15 s, ale pro některé materiály lze použít i dobu delší. Vnikající těleso má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° a nejčastěji bývá z diamantu. Po odlehčení se změří délka úhlopříček vtisku u_1, u_2 a určí se aritmetický průměr jejich délek u .



Obr. 14 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [7]

Tvrдость podle Vickerse je dána poměrem zatěžovací síly F [N] a povrchu vtisku A [mm²]. Tvrдость se označuje HV a určuje se podle vzorce: [4,5,7]

$$HV = \frac{F}{A} = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (3)$$

Kde: F je zkušební síla v N

d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček v mm viz. Obr.14

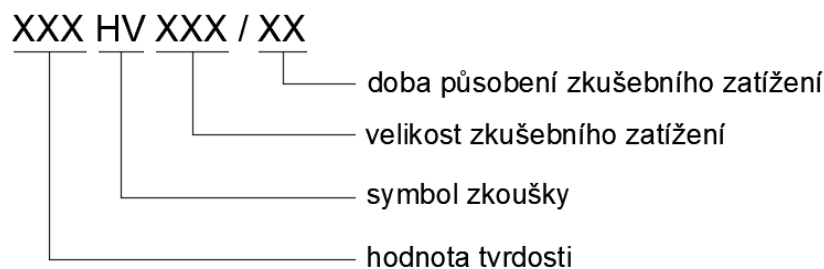
A je plocha vtisku v mm²

Vickersova zkouška je velmi přesná, ale vyžaduje hladký (broušený) povrch a přesné měření délky úhlopříček pomocí mikroskopu. Pomocí Vickersovy metody je možné měření i mikro-tvrđosti tzn. měření tvrdosti v mikroskopicky malých objemech. Používá se také diamantový jehlan stejného tvaru, ale zatížení při zkoušce je podstatně menší. Rozsahy použití Vickersovi metody jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 1 Typy zkoušek a rozsahy použití podle Vickerse [7]

Označení	Symbol tvrdosti HV	Zkušební zatížení F (N)
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \leq 49,03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	HV 0,2 až HV 5	$1,961 \leq F < 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	Hv 0,01 < HV 0,2	$0,09807 \leq F < 1,961$

Tvrdość podle Vickerse se označuje čísly a písmeny (např. 640 HV 30/20) a to podle obecného schématu pro značení které je na obrázku:



Obr. 15 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [7]

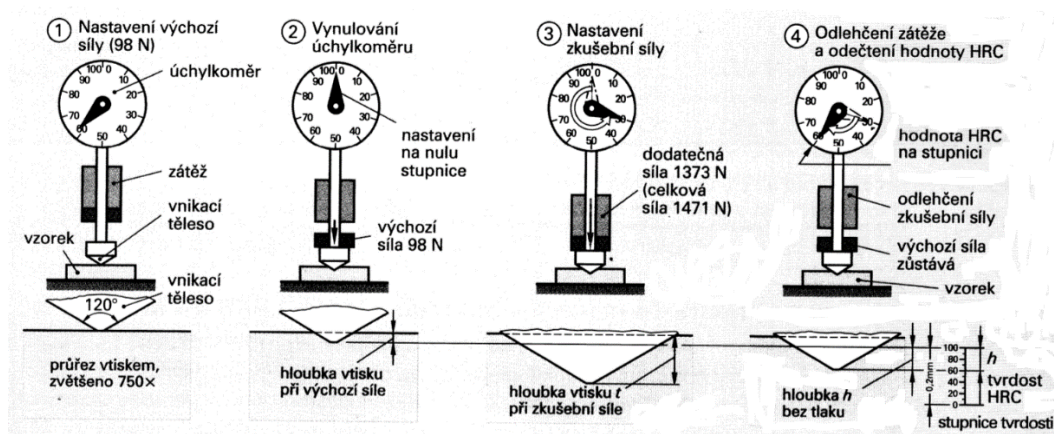
Vickersova zkouška je vhodná pro měření tvrdých materiálů např. kalené součásti, ale také se používá pro měření tvrdosti tenkých vrstev např. nitridované vrstvy.

3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Rockwellova zkouška tvrdosti se měří pomocí vnikací metody a řadí se mezi statické zkoušky. Měření tvrdosti probíhá tak, že se do zkoušeného materiálu vtlačuje vnikací těleso, kterým je buď diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° se zaobleným hrotem o poloměru 0,2 mm, anebo ocelová kulička o daném průměru. Po vytlačení zanechá těleso vtisk, ve kterém se změří hloubka. Tato hloubka je rozdělena na 100 dílků určujících tvrdost materiálu.

Zkouška tvrdosti podle Rockwella je rozdělena do čtyřech kroků: [5]

- 1) vnikací těleso se vtlačí do vzorku předběžnou silou F_0 (např. 98 N),
- 2) na úrovni F_0 se vynuluje měřicí úchylkoměr,
- 3) vnikací těleso se vtlačí zkušební silou F_1 (např. 1373 N)
- 4) po chvíli se vnikací těleso odlehčí a vrátí se na úroveň F_0 , hloubka vtisku je rovna tvrdosti materiálu (např. 60 dílků = 60 HRC)



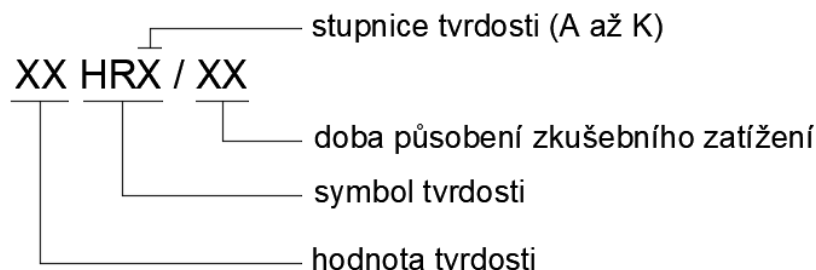
Obr. 16 Průběh zkoušky tvrdosti podle Rockwella [5]

Zkouška tvrdosti podle Rockwella nevyžaduje upravený povrch, neboť hloubka vtisku se měří až po působení předběžné síly. Podle tvrdosti materiálu se určuje, jaké zkušební těleso zvolíme a jakou silou budeme působit. [7]

Tab. 2 Stupnice tvrdosti podle Rockwella [7]

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Typ vnikajícího tělesa	Předběžné zatížení F_0 [N]	Přídavné zatížení F_1 [N]	Celkové zatížení F [N]	Oblast použití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 až 88
B	HRB	Kulička 1,5875 mm	98,07	882,6	980,7	20 až 100
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 až 70
D	HRD	Diamantový kužel	98,07	882,6	980,7	40 až 77
E	HRE	Kulička 1,5875 mm	98,07	882,6	980,7	70 až 100
F	HRF	Kulička 1,5875 mm	98,07	490,3	588,4	60 až 100
G	HRG	Kulička 1,5875 mm	98,07	1373	1471	30 až 94
H	HRH	Kulička 3,175 mm	98,07	490,3	588,4	80 až 100
K	HRK	Kulička 3,175 mm	98,07	1373	1471	40 až 100

U materiálů s vysokou tvrdostí se určuje tvrdost HRC, u materiálů měkkých tvrdost HRB. Tvrdost se tak označuje písmeny a čísly jako např. 60 HRB, a to podle obecného schématu pro značení.

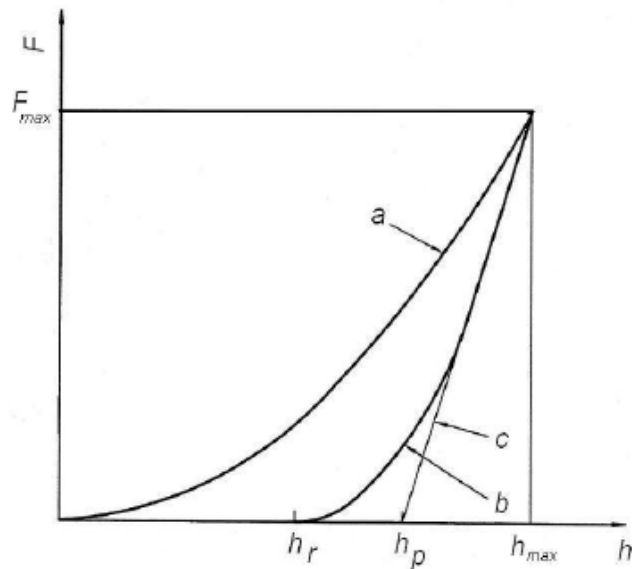


Obr. 17 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [7]

Zkouška podle Rockwella je velmi rychlá, snadná a vtisky jsou mále (max. 0,2 mm). Je vhodná pro velmi široké rozmezí tvrdosti. [4]

3.1.4 Instrumentovaná zkouška tvrdosti – DSI

Českým ekvivalentem metody DSI (Depth Sensing Indentation) je instrumentovaná zkouška tvrdosti. Metoda DSI vznikla pro stanovení mechanických vlastností tenkých vrstev a řadí se mezi statické a vnikací zkoušky. Principem metody je, že měřicí přístroj detekuje současně okamžitou změnu hloubky průniku vnikacího tělesa do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu nebo poklesu zatížení. Grafickým zpracováním dat vzniká charakteristická identifikační (vnikací) křivka zatížení-hloubka vtisku. [11]



Obr. 18 Schématické znázornění indentační křivky [11]

Kde: F_{max} je maximální působící síla

a je zatěžovací křivka;

b je odlehčovací křivka;

c je tečna ke křivce b;

h_r je plastická hloubka vtisku po odlehčení zkušebního zatížení;

h_p je redukovaná hloubka vtisku;

h_{max} je maximální hloubka vtisku

Pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti (DSI) jsou stanoveny tři rozsahy tvrdosti a to:

- rozsah makro: $2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$;
- rozsah mikro: $2 \text{ N} > F, h > 0,2 \text{ } \mu\text{m}$;
- rozsah nano: $h \leq 0,2 \text{ } \mu\text{m}$. [12]

Pro stanovení tvrdosti a materiálové vlastnosti se musí použít vnikací těleso z tvrdšího materiálu, než je zkoušený materiál. Lze použít následující tvary a materiály:

- a) diamantové vnikací těleso tvaru čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou (jehlan podle Vickerse);
- b) diamantový jehlan s trojúhelníkovou základnou (jehlan podle Berkoviche);
- c) tvrdokovová kulička (zejména pro stanovení elastického chování materiálů);
- d) diamantové kuželové vnikací těleso se sférickým vrcholem. [12]

Kvůli principu a funkci metody DSI bylo možné stanovit tvrdost jako funkci okamžité hloubky vtisku. Definuje se tak Martenesova tvrdost HM, která bývá často označována jako univerzální tvrdost HU. [11]

Stanovení tvrdosti podle Martense

Tvrdost podle Martense se stanoví z hodnot daných identační křivou (zatížení/hloubka vtisku), která definuje průběh stanoveného zkušebního zatížení. Tvrdost je stanovena jako podíl zkušebního zatížení F a plochy povrchu vnikacího tělesa A_s . Vyjadřuje se v MPa a určuje se podle vzorce: [12]

$$HM = \frac{F}{A_s} \quad (4)$$

Kde: F je zkušební síla v N

A je plocha vtisku v mm^2

Tvrdost podle Martense je určena pouze pro vnikací tělesa tvaru jehlanu podle Vickerse a Berkoviche, není definovaná pro tělesa podle Knoopu nebo pro kulová vnikací tělesa.

Plochy povrchů A_s u vnikacích těles udávají rovnice: [12]

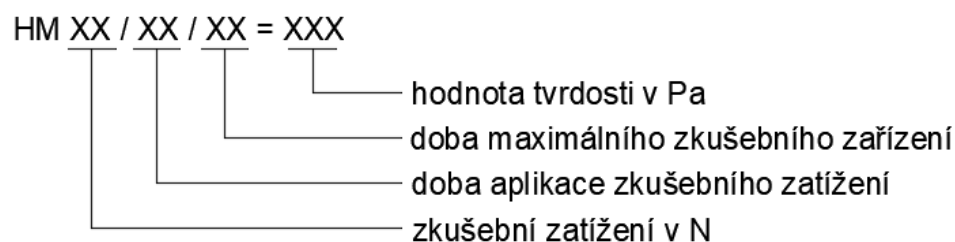
- a) Vnikací těleso podle Vickerse ($\alpha = 68^\circ$)

$$A_s = \frac{4 \cdot \sin \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot h^2 \quad (5)$$

- b) Vnikací těleso podle Berkoviche ($\alpha = 65,03^\circ$)

$$A_s = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \tan \alpha}{\cos \alpha} \cdot h^2 \quad (6)$$

Tvrdost se označuje písmeny a čísly jako např. HM 0,5 / 20 / 20 = 8,700 GPa, a to podle obecného schématu pro značení. [12]



Obr. 19 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Martense [12]

Tvrdost podle Martense zahrnuje plastickou a elastickou deformaci, a je tedy možné stanovit tvrdost pro všechny materiály. [12]

Stanovení tvrdosti podle Olivera a Pharra

Metoda podle Olivera a Pharra využívá princip multibodové metody, která spočívá ve stanovení sklonu tangenty vedené k začátku křivky odlehčení a průsečíky tangenty s osou x určuje kontaktní hloubka h_p . Z indentační křivky lze vyčíst základní veličiny, jako je maximální zatěžující síla F_{max} , maximální hloubka h_{max} a hloubku h_p . Za předpokladu, že při odlehčování probíhá čistě elastická deformace platí: [11]

$$F_t = \frac{2}{\pi} \cdot E^* \cdot h_e^2 \cdot tg\alpha' \quad (7)$$

Kde: F_t je maximální působící síla v N

E je kombinovaný elastický modul v Pa

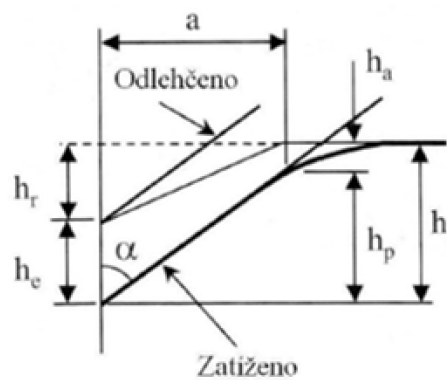
h_e je hloubka po odlehčení v mm

α je úhel indentoru ve °

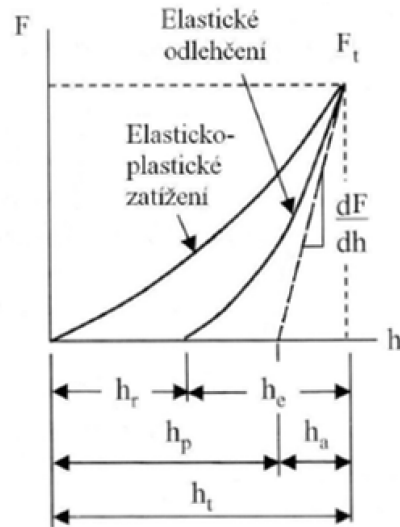
Derivací rovnice (7) dostaneme vztah určující sklon tangenty:

$$\frac{dF}{dh} = 2 \cdot \frac{2 \cdot E^* \cdot tg\alpha'}{\pi} \cdot h_e \quad (8)$$

Na obrázku je znázorněn povrch vzorku zatížený a odlehčený kuželovým indentorem a vedle něj je závislost zatížení na hloubce. [11]



Obr. 20 Znázornění vzorku při maximálním zatížení a odlehčení [11]



Obr. 21 Závislost zatížení na hloubce [11]

Po úpravách a dosazení rovnice (9) dostáváme vztah na určení kontaktní hloubky:

$$h_p = h_t - \varepsilon \cdot \frac{F_t}{dF/dh} \quad (9)$$

Kde: F_t je maximální působící síla v N

ε je geometrická směrnicí, která závisí na geometrii indentoru

h_p je kontaktní hloubka v mm

h_t je hloubka při maximálním zatížení v mm

Pro kuželový indenter dostáváme geometrickou směrnicí $\varepsilon = 0,75$, která vychází z výsledku měření podle Olivera a Pharra a lépe nám popisuje chování materiálů při odlehčení. [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je ověřit jaký vliv má dělení kovových materiálů pomocí laseru a plazmy na mechanické vlastnosti materiálů v místě řezu. Vliv bude zkoumán instrumentovanou zkouškou tvrdosti (DSI). Tvrdost bude měřena pomocí mikrotvrdoměru na 7-mi typech kovových materiálů od místa řezu při dvou různých zatíženích. Bude se zde zkoumat tepelné ovlivnění vlivem zvolené technologie dělení materiálu. Cílem tedy je zjistit do jaké vzdálenosti od místa řezu a jak se změní tvrdost, modul pružnosti a další zvolené parametry různých kovových materiálů. Naměřené hodnoty se vyhodnotí a výsledky budou porovnány.

Postup řešení:

- Vypracování studie na dané téma
- Příprava vzorků pro instrumentovanou zkoušku tvrdosti
- Provedení instrumentované zkoušky tvrdosti
- Vyhodnocení naměřených hodnot

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V Experimentální části byli vybrány různé druhy ocelí, které byly nařezány pomocí laseru a plazmy firmou TAJMAC-ZPS a.s., Zlín. Nařezané vzorky materiálů byli následně zalisovány a vyleštěny tak, aby docházelo k co nepřesnějšímu měření tvrdosti. Tepelné ovlivnění bylo zkoumáno pomocí mikrotvrdoměru, kde se prováděly instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI). Bralo se v úvahu, že tepelné ovlivnění způsobí změnu struktury a tím pádem změnu mechanických vlastností materiálu od místa řezu.

5.1 Příprava vzorků

Na laserovém zařízení značky TRUMPF bylo nařezáno 6 vzorků. Tento 2D-laser pracuje tak, že řezací hlava se pohybuje a opracovává obrobek, který je uložený na obráběcím stole. Řezání probíhalo při výkonu 1 837 W a rychlosti posuvu 2 090 mm/min. Na plazmovém zařízení značky MGM OMNICUT 4000 o výkonu 2,5 kVA a rychlosti posuvu 20 000 mm/min se nechal nařezat 1 vzorek. Plazma pracuje na stejném principu jako 2D-laser. Rozměry vzorů byli 25 x 10 mm a o tloušťce 6 mm.

Před měřením je potřeba vzorky nechat vyleštit, aby měření bylo co nejpřesnější. K leštění je potřeba mít zkušební vzorky zalisované kvůli upnutí do metalografické leštičky. Vzorky byli zalisovány do materiálu EpoMet G Molding Compound 20-3380-064, od firmy Buehler.



Obr. 22 Zařízení na zalisování vzorků Simpli-Met 1000

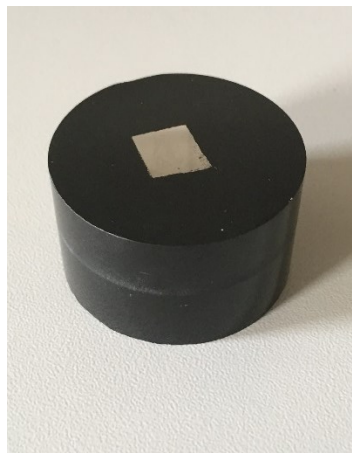
Na leštícím stroji Eco-Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler se nechali všechny zkušební vzorky vyleštit. Leštění probíhalo ve dvou krocích. V prvním kroku se leštilo pomocí brusných kotoučů s různými zrnitostmi (250, 600, 1200). V dalším kroku probíhalo

doleštění vzorků pomocí textilního plátna a diamantové suspenze (9 μm a 3 μm). Leštění probíhalo při přítláčné síle 25 N, otáčkách vzorků 30 ot/min a otáčkách plátna 300 ot/min.



Obr. 23 Leštička Buehler Eco-Met 250 PRO

Výsledná podoba zkušební vzorku je uvedena na obr. 24. Takto upravený vzorek je již možné upnout do mikrotvrdoměru a měření tak získat mechanické vlastnosti materiálů.



Obr. 24 Zkušební vzorek materiálu

5.2 Druhy materiálů

Bylo vybráno 7 druhů materiálů se zastoupením jak legovaných, tak i nelegovaných ocelí. U těchto druhů ocelí bylo zkoumáno, do jaké míry a jak se změní jejich mechanické vlastnosti v místě řezu po teplem ovlivnění.

5.2.1 Ocel 1.0036 (11 373)

Ocel 1.0036 je nelegovaná ocel a řadí se do skupiny podeutektoidní nízkouhlíkové oceli. Patří mezi neušlechtilé konstrukční oceli obvyklých jakostí. Ocel je dobře svařitelná a je vhodná k tváření za teple i za studena. Nejčastěji se využívá na součásti strojů, na vtokové nebo výtokové objekty vodních turbín a na méně namáhána svařována potrubí. Snese statické ale i mírně dynamické namáhání. [13]

Tab. 3 Chemické složení oceli 1.0036 [13]

C [%]	P [%]	S [%]	N [%]
max. 0,170	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007

5.2.2 Ocel 1.0060 (11 600)

Ocel 1.0060 je nelegovaná, neušlechtilá, jakostní ocel a patří mezi konstrukční oceli. Je vhodná na strojní součásti namáhané jak staticky, tak i dynamicky. Součásti mohou být vystavené velkému měrnému talku. Ocel se využívá na hřídele, ozubená kola, písty, kolíky, pera, kladky, čepy, šrouby a matice a další. [14]

Tab. 4 Chemické složení oceli 1.0060 [14]

P [%]	S [%]	N [%]
max. 0,045	max. 0,045	max. 0,009

5.2.3 Ocel 1.0535 (12 060)

Ocel 1.0535 je konstrukční ocel nelegovaná, jakostní. Patří do skupiny podeutektoidní oceli. Je to tzn. uklidněná ocel, která je obtížně svařitelná a využívá se na ozubená kola, pojistky, západky, držáky, čepy, pružiny, šrouby a další spojovací součásti. Také se ocel používá na konstrukční elementy lisovacího nářadí. [15]

Tab. 5 Chemické složení oceli 10535 [15]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	P [%]	S [%]
0,52-0,60	0,50-0,80	0,15-0,40	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,04	max. 0,04

5.2.4 Ocel 1.7131 (14 220)

Ocel 1.7131 je nelegovaná ušlechtilá konstrukční ocel k cementování. Tato ocel je dobře tvárná za tepla a po žíhání je dobře obrobitelná a svařitelná. Nejčastěji se využívá pro strojní součásti s velkou pevností v jádře jako např. pro hřídele, ozubená kola, zubové spojky a pístní čepy. [16]

Tab. 6 Chemické složení oceli 1.7131 [16]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	P [%]	S [%]
0,14-0,19	1,10-1,40	0,17-0,37	0,80-1,10	max. 0,035	max. 0,035

5.2.5 Ocel 1.7147 (14 221)

Ocel 1.7147 je legovaná ušlechtilá ocel vhodná k cementování. Tato ocel je legována chromem, popř. manganem či hliníkem a patří mezi nízkolegované oceli. Ocel je dobře tvárná za tepla, obrobitelná a vykazuje vysokou pevnost v jádře. Využívá se na středně namáhané díly motorových vozidel a pro velké strojní součásti. [17]

Tab. 7 Chemické složení oceli 1.7147 [17]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	P [%]	S [%]
0,17-0,22	1,10-1,30	0,17-0,37	1,00-1,30	max. 0,035	max. 0,035

5.2.6 Ocel 1.8504 (14 340)

Ocel 1.8504 je legovaná ušlechtilá ocel vhodná k nitridování. Tato ocel je legována chromem, manganem, hliníkem a patří mezi nízkolegované oceli. Ocel má dobrou tvárnost za tepla a dobrou obrobitelnost. Je vhodná pro součásti stojů, letadlových a automobilových motorů a součástí kde je žádána větší povrchová tvrdost. [18]

Tab. 8 Chemické složení oceli 1.8504 [18]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Al [%]	P [%]	S [%]
0,28-0,38	0,50-0,90	0,17-0,37	1,30-1,90	0,90-1,30	max. 0,035	max. 0,035

5.2.7 Ocel 1.2510 (19 314)

Ocel 1.2510 je nízkolegovaná nástrojová ocel vhodná pro zpracování za studena. Tato ocel díky svému obsahu wolframu a vyššího obsahu chromu poskytuje dobrou odolnost proti opotřebení. Ocel se využívá na výrobu třískově obráběcích nástrojů, závitů, fréz, kalibrů a dalších nástrojů. [19]

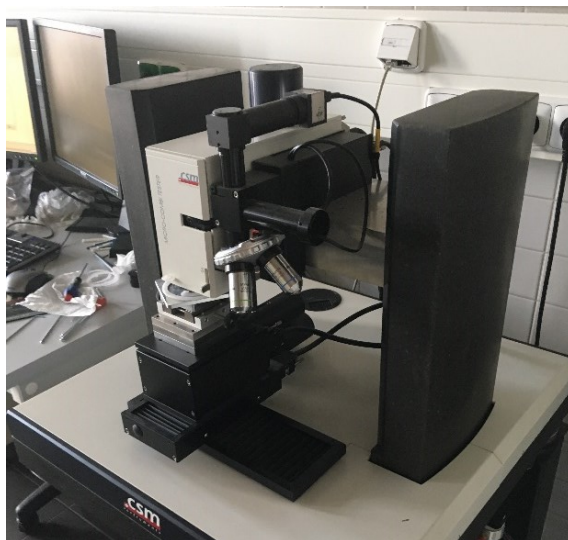
Tab. 9 Chemické složení oceli 1.2510 [19]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	V [%]	W [%]	P [%]	S [%]
0,90-1,00	1,00-1,30	0,20-0,40	0,45-0,70	0,05-0,20	0,45-0,70	max. 0,030	max. 0,030

5.3 Měření tvrdosti metodou DSI

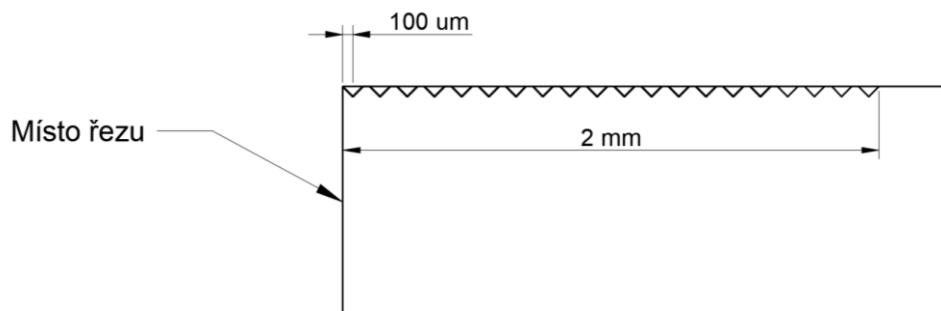
Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji MicroCombi Tester (MHT³) od firmy Anton-Paar, který je na obr. 25. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 14577 a byli pro ni zvolené následující parametry:

- aplikované zatížení - 0,5 N a 5 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 15 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 1 N/min (pro 0,5 N) a 10 N/min (pro 5 N),
- poissonovo číslo - 0,3.

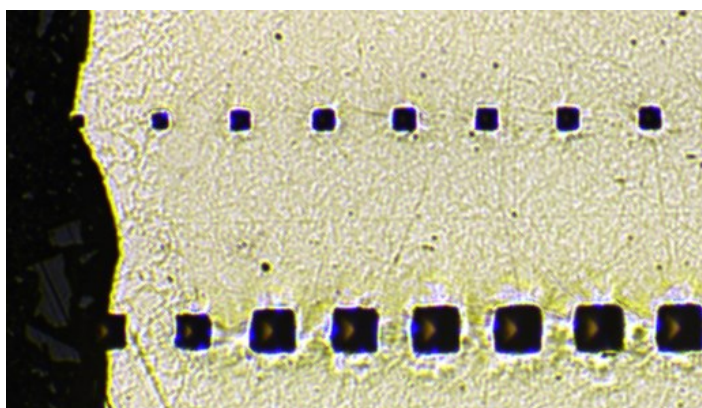


Obr. 25 Měřicí přístroj MicroCombi Tester (MHT³) od firmy Anton-Paar

Jako vnikací těleso (indentor) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° tzv. Vickersův indentor. Měření instrumentované zkoušky DSI a vyhodnocení mikro-mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr. Každý vzorek byl uložen na upínací X-Y stolek mikrotvrdoměru tak, aby byl hrot vnikacího tělesa nastaven přímo na okraj zkušební vzorku tedy do místa řezu. Zatěžovací doba byla pro všechna měření 15 sekund. Dráha pro měření mikrotvrdoměru byla nastavena tak, aby počáteční vzdálenost mezi vpichy byla 100 um až do vzdálenosti 2 mm od okraje (20 vpichů). Tímto nastavením byla proměřena povrchová vrstva tělesa až do vzdálenosti 2 mm od místa řezu, tedy místa, které bylo tepelně ovlivněno způsobem dělení materiálu. Naměřené hodnoty nám dávají přehled o tom, do jaké vzdálenosti a jak se změní chování a struktura materiálu.



Obr. 26 Znárodné vpichy při indentaci



Obr. 27 Mikroskopická fotka vpichů

5.4 Fáze a strukturní složky

Měření mikrotvrlosti se dá velmi dobře využít při zjišťování strukturních složek. Vycházíme z poznatku, že každá strukturní složka odpovídá hodnotě tvrdosti podle Vickerse. Přehled strukturních složek a jejich odpovídající tvrdosti, které vycházejí z diagramu Fe-Fe₃C jsou uvedeny v tabulce níže. Vzhledem k testovaným ocelím nás bude zajímat především oblast Austenitu, Perlitu a Bainitu.

Tab. 10 Tvrlost strukturních složek

Strukturní složky	tvrdost HV
Fe	85
Ferit	85-130
Austenit	120-180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200-250
Perlit jemný	250-300
Bainit horní	300-400
Bainit dolní	400-550
Martenzit nízkouhlíkový	600-700
Martenzit vysokouhlíkový	700-580

6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

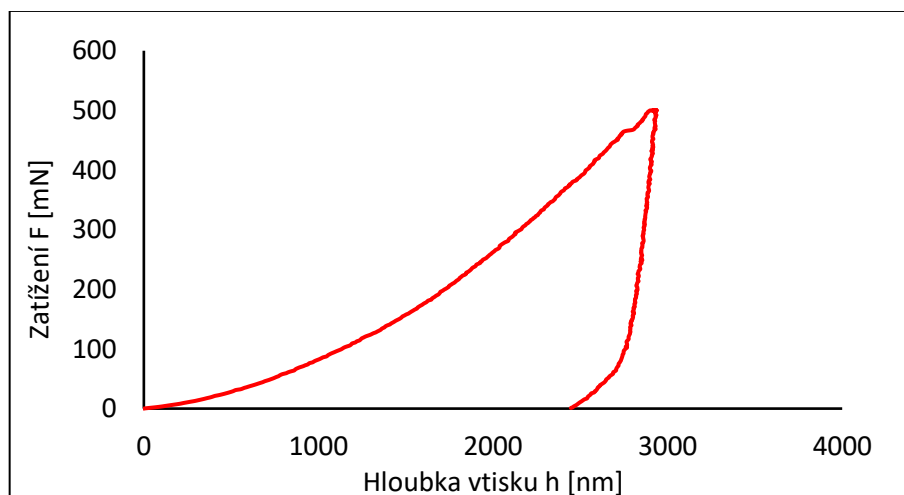
6.1 Naměřené hodnoty zkušebních vzorků

Naměřené hodnoty zkušebních vzorků byly získány z instrumentované zkoušky tvrdosti. Zkouška byla provedena při dvou zkušebních zatíženích a to 0,5 a 5 N. U obou zatížení byly zjištěny následující parametry:

- vzdálenost od místa řezu (l),
- vtisková tvrdost (H_{IT}),
- Vickersova tvrdost (HV_{IT}),
- modul pružnosti (E_{IT}),
- maximální hloubka vpichu (H_{max}),
- elastická práce (W_{el}),
- plastická práce (W_{pl}).

6.1.1 Ocel 1.0036 (11 373) vzorek 1, řezáno laserem

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 1 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 28 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

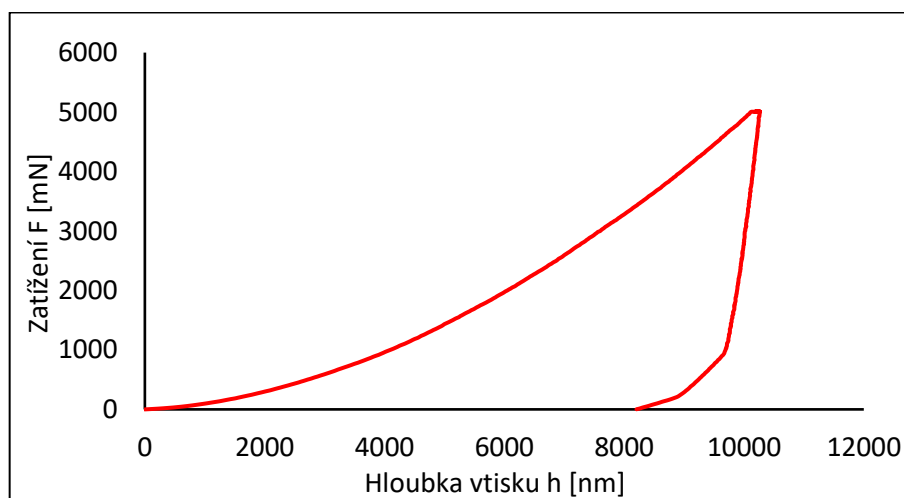


Obr. 28 Indentační křivka pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 11 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	2490,60	235,08	210,23	2934,00	58577,09	493515,59
2	0,20	2293,50	216,48	199,68	3066,83	47712,74	521236,02
3	0,30	2383,40	224,96	198,97	2997,25	49278,81	516996,41
4	0,40	2244,70	211,86	217,45	3069,68	48136,17	509267,58
5	0,50	2277,50	214,97	202,78	3071,98	49593,03	511446,16
6	0,60	2030,80	191,68	172,52	3295,69	53193,65	548201,06
7	0,70	2038,00	192,36	252,28	3209,22	49599,57	576439,85
8	0,80	2012,70	189,97	191,64	3258,08	46382,52	547779,00
9	0,90	2008,60	189,58	199,69	3254,65	45754,42	564279,33
10	1,00	1986,20	187,47	247,62	3251,13	46035,78	563617,11
11	1,10	1921,80	181,39	207,09	3318,75	46336,38	574386,44
12	1,20	1854,60	175,05	176,84	3399,79	44788,03	629569,29
13	1,30	1843,70	174,02	247,10	3370,47	42834,05	547556,51
14	1,40	1830,60	172,79	187,69	3410,98	44137,71	633213,75
15	1,50	1820,10	171,79	195,34	3410,07	49707,68	644468,40
16	1,60	1816,60	171,46	205,79	3408,51	46596,21	601061,52
17	1,70	1800,50	169,94	205,27	3423,61	47652,95	564611,19
18	1,80	1801,90	170,08	257,88	3404,20	44465,05	578294,93
19	1,90	1763,90	166,48	209,18	3455,20	46784,00	600250,76
20	2,00	1759,30	166,05	174,24	3484,81	44090,44	615484,68

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 1 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 29 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



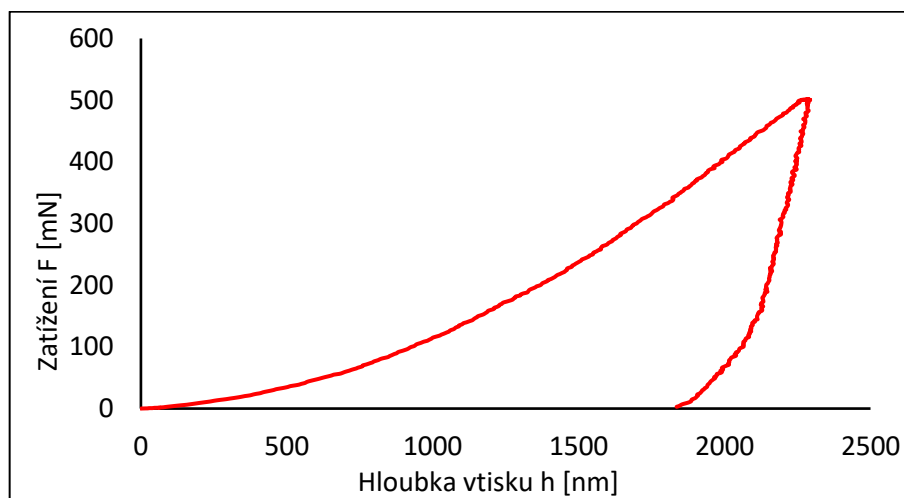
Obr. 29 Indentační křivka pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 5 N

Tab. 12 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	2087,40	197,02	170,68	10262,26	2056390,23	16847845,54
2	0,20	2053,00	193,77	181,56	10316,21	1958352,42	16997004,49
3	0,30	1870,30	176,53	155,28	10836,59	2099703,13	17422227,83
4	0,40	1879,50	177,39	153,26	10834,04	2084638,94	17258833,46
5	0,50	1825,00	172,25	154,28	10966,32	2236236,02	17952166,74
6	0,60	1796,40	169,56	160,09	11023,02	1992702,22	17935530,27
7	0,70	1747,20	164,91	160,91	11175,56	2065380,17	17680738,96
8	0,80	1778,70	167,89	160,84	11095,22	1995634,43	17716083,75
9	0,90	1759,90	166,11	156,56	11161,97	2049798,25	17908612,86
10	1,00	1716,30	162,00	166,69	11232,79	2000075,49	17801623,54
11	1,10	1644,00	155,17	156,98	11497,65	2046079,32	18601635,09
12	1,20	1654,90	156,20	152,93	11484,42	1969272,95	18705264,74
13	1,30	1677,20	158,30	149,52	11425,38	1962735,73	18658795,02
14	1,40	1640,30	154,82	163,80	11497,49	2070444,01	17932334,30
15	1,50	1692,20	159,72	155,44	11366,81	2030447,38	18174035,96
16	1,60	1671,10	157,73	159,57	11417,45	1961783,26	18655429,89
17	1,70	1598,50	150,88	152,34	11677,66	1959075,24	18696285,29
18	1,80	1585,30	149,63	155,50	11713,36	1948014,42	19195018,54
19	1,90	1561,20	147,36	148,82	11820,60	1930892,96	18652117,51
20	2,00	1561,20	147,36	148,82	11820,60	1930892,96	18652117,51

6.1.2 Ocel 1.0060 (11 600) vzorek 2, řezáno laserem

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 2 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 30 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

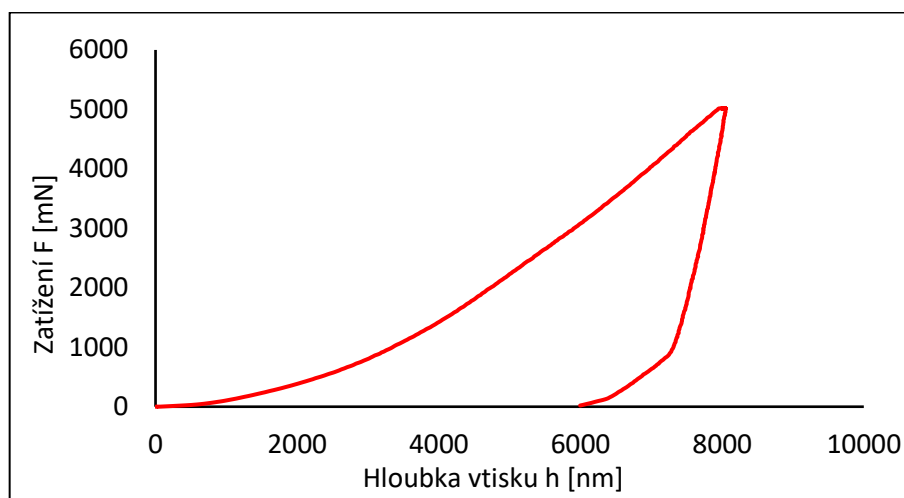


Obr. 30 Indentační křivka pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 13 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	4419,30	417,12	188,82	2292,13	69452,28	347722,25
2	0,20	2881,00	271,93	212,22	2743,79	53260,37	467101,50
3	0,30	2692,80	254,16	227,30	2824,66	51900,64	833989,37
4	0,40	2664,90	251,53	231,14	2837,42	50165,48	476013,64
5	0,50	2595,30	244,96	221,86	2878,17	45317,48	501476,17
6	0,60	2371,10	223,81	205,45	3014,11	47857,85	501273,35
7	0,70	2306,50	217,70	219,55	3041,31	44599,81	51539,48
8	0,80	2341,50	221,00	229,96	3011,84	55181,46	489185,48
9	0,90	2186,20	206,35	225,71	3116,88	47310,38	512849,97
10	1,00	2141,80	202,16	222,26	3145,10	45012,72	527445,53
11	1,10	2096,80	197,91	234,58	3173,36	52948,86	579835,28
12	1,20	2040,80	192,63	191,25	3245,31	45077,40	559819,34
13	1,30	2022,70	190,92	213,27	3237,86	44016,40	559134,95
14	1,40	2138,20	201,81	185,64	3194,96	47074,39	532168,03
15	1,50	2223,40	209,85	205,90	3101,49	49441,88	511321,96
16	1,60	2214,30	209,00	201,43	3114,77	48040,74	515009,79
17	1,70	2022,90	190,93	223,34	3237,91	47635,65	543317,93
18	1,80	2079,90	196,31	194,21	3209,60	47629,06	570436,96
19	1,90	2008,90	189,61	191,08	3261,93	53544,04	543906,37
20	2,00	2043,00	192,83	192,21	3231,05	53432,48	572003,90

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 2 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 31 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



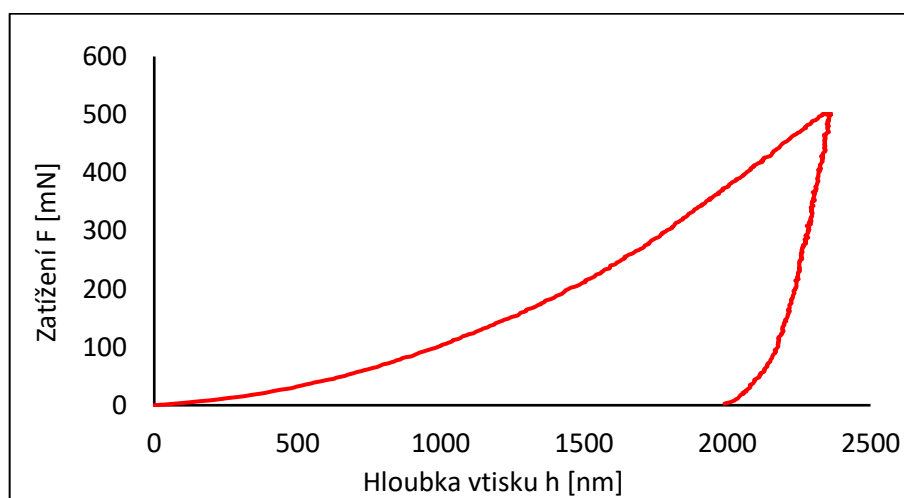
Obr. 31 Indentační křivka pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 5 N

Tab. 14 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	3566,90	336,67	175,53	8051,68	2592441,90	12208675,85
2	0,20	2763,90	260,87	176,09	9023,94	2242766,20	14468278,15
3	0,30	2736,60	258,27	170,88	9086,09	2207436,65	14048162,54
4	0,40	2333,50	220,25	151,66	9851,81	2151154,61	15825895,45
5	0,50	2140,60	202,04	165,28	10160,36	2137352,58	15880126,80
6	0,60	2086,70	196,95	164,68	10283,82	2072756,17	16428904,99
7	0,70	2284,00	215,58	165,28	9883,09	2139325,27	15758134,46
8	0,80	1923,60	181,56	152,21	10715,95	2061465,93	17011410,89
9	0,90	1904,20	179,73	151,43	10872,89	2001530,00	16833519,18
10	1,00	1860,90	175,65	155,41	10870,29	1981192,11	17511782,13
11	1,10	1955,00	184,52	157,82	10628,01	1950228,36	16667036,17
12	1,20	2040,30	192,58	167,83	10379,51	2054472,60	16469895,92
13	1,30	2001,50	188,91	185,37	10431,55	2006297,80	17034068,22
14	1,40	1991,20	187,94	165,85	10506,26	2042105,97	16633968,76
15	1,50	1919,70	181,19	160,26	10706,41	2033546,72	17288995,95
16	1,60	1871,30	176,63	161,20	10836,86	1999377,81	17648340,94
17	1,70	1874,00	176,88	157,28	10848,65	2000357,89	17557660,68
18	1,80	1882,90	177,72	153,54	10834,30	1965013,53	17254766,20
19	1,90	1841,40	173,81	158,40	10916,90	1994524,39	17364107,48
20	2,00	1884,20	177,84	154,20	10823,05	1963753,00	17232547,25

6.1.3 Ocel 1.0535 (12 060) vzorek 3, řezáno laserem

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 3 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 33 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

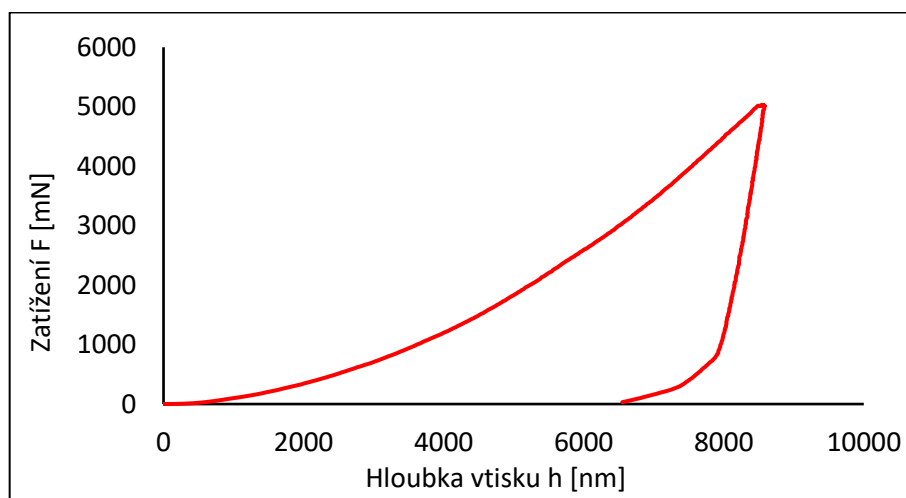


Obr. 32 Indentační křivka pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 15 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	3985,10	376,14	231,24	2359,69	57322,06	360889,83
2	0,20	3126,60	295,11	223,67	2636,35	49541,42	424553,07
3	0,30	2614,60	246,78	221,07	2870,50	47354,46	488573,91
4	0,40	2355,00	222,27	217,14	3011,03	48716,45	494999,77
5	0,50	2161,40	204,00	189,94	3154,22	54817,75	529763,50
6	0,60	2272,90	214,53	213,71	3063,76	51107,12	509677,54
7	0,70	2171,50	204,96	244,51	3116,44	48525,30	528241,06
8	0,80	2216,40	209,20	234,47	3089,57	46439,36	501216,00
9	0,90	2155,40	203,44	202,43	3154,93	45145,80	521931,22
10	1,00	2329,10	219,84	205,26	3033,93	47561,20	514241,72
11	1,10	2340,60	220,92	205,38	3026,38	50101,18	504007,06
12	1,20	2292,70	216,40	204,77	3055,28	480118,71	509890,70
13	1,30	2433,10	229,65	214,45	2967,41	48061,69	503256,90
14	1,40	2208,70	208,47	208,30	3105,82	52574,57	521974,81
15	1,50	2121,10	200,20	217,08	3162,33	47667,23	526011,55
16	1,60	2136,20	201,63	220,31	3151,87	45129,37	512273,01
17	1,70	2400,70	226,59	224,30	2981,68	47864,97	503212,73
18	1,80	2363,80	223,11	218,96	3004,59	44125,15	502281,64
19	1,90	2313,50	218,36	219,55	3033,86	48017,45	503185,51
20	2,00	2199,10	207,57	204,24	3115,09	51126,46	536194,76

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 3 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 33 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



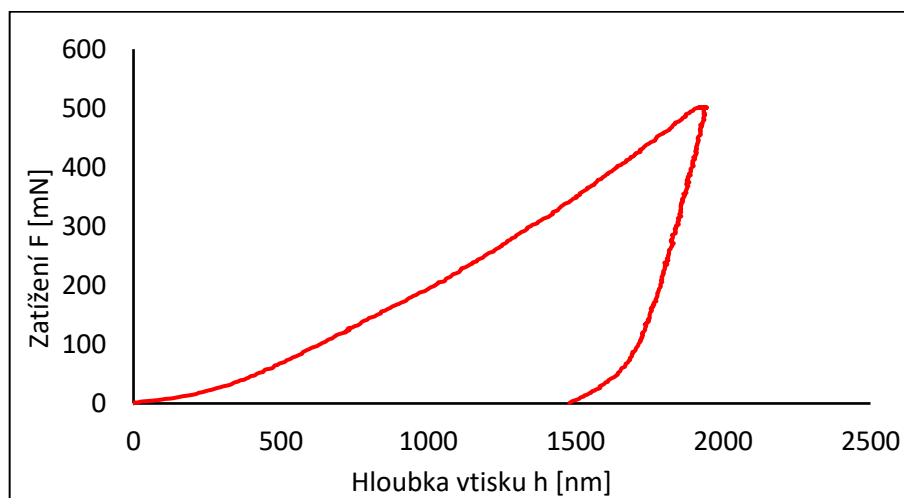
Obr. 33 Indentační křivka pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížením 5 N

Tab. 16 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	3080,50	290,76	185,80	8579,48	2183556,95	13052844,28
2	0,20	2423,40	228,73	171,01	9595,70	2092034,73	14916222,49
3	0,30	2328,10	219,74	155,74	9851,02	2022839,46	15358726,22
4	0,40	2435,80	229,91	175,32	9558,75	2048459,03	14981484,19
5	0,50	2328,20	219,75	167,45	9796,14	2040117,59	15358884,47
6	0,60	2267,40	214,01	165,66	9922,24	2043888,58	15547884,75
7	0,70	2288,90	216,04	176,78	9831,15	2032905,98	15191730,26
8	0,80	2266,40	213,91	179,37	9870,56	2006828,94	15224677,62
9	0,90	2184,20	206,16	175,77	10047,06	2005372,39	15419860,64
10	1,00	2098,10	198,03	170,74	10244,47	2017794,04	16039079,19
11	1,10	2159,20	203,80	177,43	10097,15	1968640,40	15507419,51
12	1,20	2105,80	198,75	171,53	10226,19	1970279,76	16045791,26
13	1,30	2035,20	192,10	164,27	10404,86	1977275,37	16561492,95
14	1,40	2143,90	202,35	172,31	10140,33	198985,38	15837407,84
15	1,50	2105,40	198,72	172,51	10229,26	1967683,61	16135738,47
16	1,60	2103,40	198,53	169,26	10245,21	1954234,23	15824529,39
17	1,70	2141,00	202,08	168,25	10162,09	2006739,59	15752246,39
18	1,80	2201,30	207,77	174,25	10011,49	1964444,44	15629098,99
19	1,90	2095,60	197,79	166,19	10261,04	1996346,34	15906833,20
20	2,00	2092,70	197,52	148,69	10356,87	2027259,15	16617836,15

6.1.4 Ocel 1.7131 (14 220) vzorek 4, řezáno plazmou

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 4 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 35 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

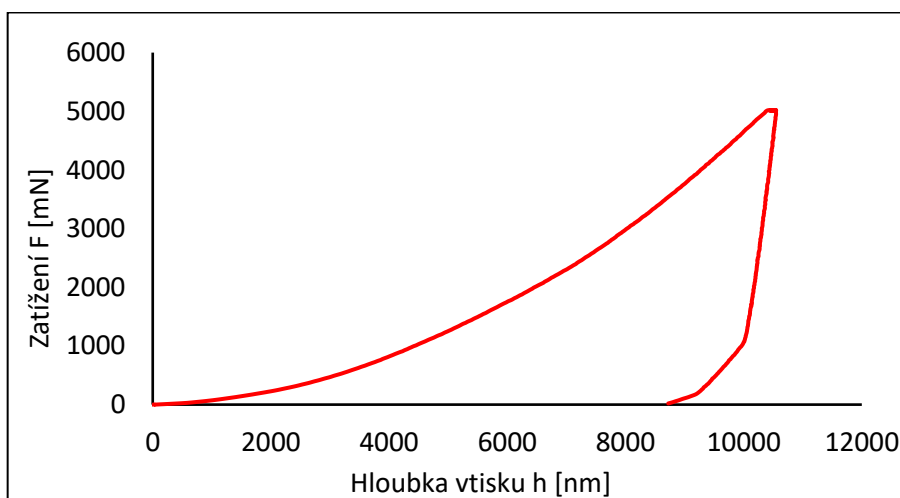


Obr. 34 Indentační křivka pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 17 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	6296,00	594,26	222,60	1942,30	71534,78	329243,31
2	0,20	3627,10	342,35	244,38	2454,99	54782,87	397775,61
3	0,30	3156,40	297,92	222,94	2623,09	51793,98	440999,40
4	0,40	2728,00	257,49	242,86	2809,87	48178,69	490238,62
5	0,50	2328,20	219,75	216,65	3107,20	49651,41	515433,84
6	0,60	2564,40	242,04	241,91	2879,92	511945,33	499720,44
7	0,70	2684,90	253,41	228,78	2826,26	48659,19	489627,73
8	0,80	2955,90	279,00	294,53	2683,45	47075,60	488723,69
9	0,90	2450,10	231,25	236,30	2948,06	48799,89	518391,54
10	1,00	2581,20	243,63	247,20	2871,81	48265,93	514977,62
11	1,10	2389,80	225,57	229,39	2981,12	48365,17	544113,16
12	1,20	2434,50	229,78	219,31	2968,98	47201,53	528673,30
13	1,30	2413,20	227,77	212,82	2984,46	49347,95	540012,60
14	1,40	2500,30	235,99	257,20	2913,52	50487,40	530754,45
15	1,50	2710,90	255,88	235,61	2813,50	47850,75	494361,30
16	1,60	2603,90	245,77	229,08	2870,05	54084,60	508494,79
17	1,70	2552,90	2440,96	219,96	2900,03	49141,85	51424,98
18	1,80	2558,60	241,50	212,27	2900,49	49737,76	516161,66
19	1,90	2594,20	244,86	229,76	2871,71	49091,43	504511,04
20	2,00	2636,10	248,81	232,33	2850,69	45547,28	500214,41

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 4 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 36 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



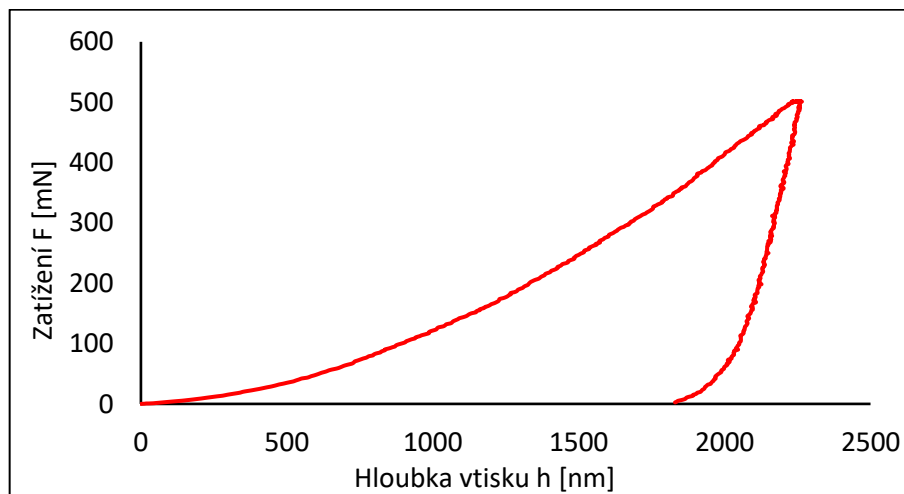
Obr. 35 Indentační křivka pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 5 N

Tab. 18 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	5476,68	516,92	157,94	6757,47	2831610,96	9453115,50
2	0,20	4419,18	417,11	163,78	7354,68	2642628,24	10924141,80
3	0,30	2450,70	231,31	181,11	9539,11	2139163,79	14479790,70
4	0,40	2154,06	203,31	187,80	10130,10	2135330,01	15655789,50
5	0,50	2234,16	210,88	176,14	9984,85	2303347,41	15743875,20
6	0,60	2172,24	205,03	188,34	10083,04	2118580,97	15684387,30
7	0,70	2241,45	211,56	183,68	9964,48	2242088,42	15464246,40
8	0,80	2229,03	210,39	182,75	9979,31	2160315,59	15941547,00
9	0,90	2161,71	204,04	193,67	10109,56	2175244,20	16077785,40
10	1,00	2002,68	189,03	199,27	10465,10	2196280,58	16168529,70
11	1,10	1986,30	187,48	180,38	10547,38	2100170,39	16694712,60
12	1,20	2072,88	195,65	172,48	10355,99	2075926,32	16896182,10
13	1,30	1951,02	184,15	161,70	10669,17	2172274,38	16527234,90
14	1,40	1929,96	182,22	173,25	10697,90	1997969,00	16959167,70
15	1,50	2024,19	191,05	176,19	10446,57	1966274,24	16599885,90
16	1,60	2068,65	195,25	191,78	10308,56	1981263,60	17042514,30
17	1,70	2023,74	191,01	153,30	10547,11	2130401,79	16657552,50
18	1,80	2104,65	198,65	162,29	10324,30	2177123,76	16140334,20
19	1,90	2045,44	189,67	156,94	10449,05	1975368,92	16803413,70
20	2,00	2014,29	190,13	151,14	10623,98	2083422,78	16384026,90

6.1.5 Ocel 1.7147 (14 221) vzorek 5, řezáno laserem

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 5 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 37 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

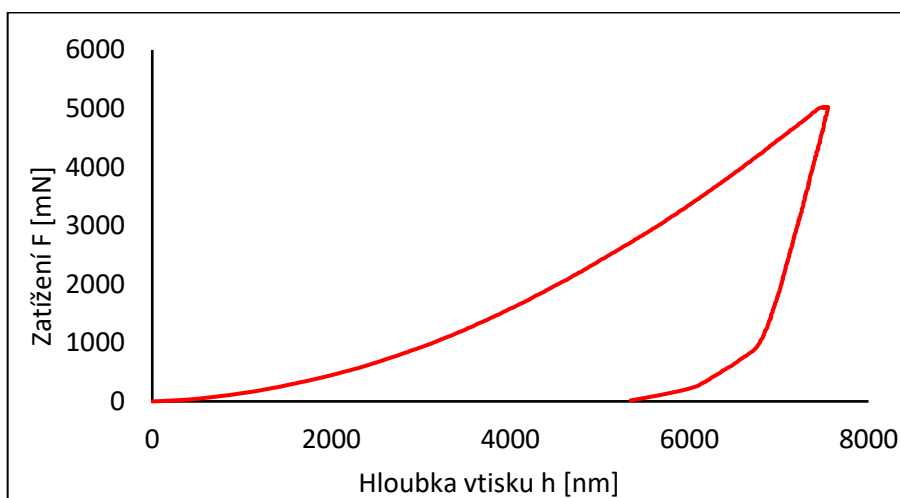


Obr. 36 Indentační křivka pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 19 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	4463,10	421,25	207,10	2260,01	65055,08	349883,66
2	0,20	3046,50	287,54	165,39	2711,77	65202,51	350415,49
3	0,30	2502,70	236,22	147,71	3979,80	65212,00	350449,46
4	0,40	2239,00	211,33	215,55	3083,51	49020,62	523870,54
5	0,50	2273,70	214,61	202,51	3073,42	48208,03	526453,85
6	0,60	2156,90	203,58	222,07	3136,79	47660,63	527381,53
7	0,70	2235,10	210,96	197,81	3103,60	50430,08	516051,79
8	0,80	2153,60	203,27	181,86	3161,47	49234,98	541228,70
9	0,90	2165,90	204,44	219,35	3133,84	50060,16	541868,59
10	1,00	2139,60	201,94	202,16	3163,73	43980,96	524692,90
11	1,10	2263,60	213,65	191,85	3083,42	47334,31	528617,65
12	1,20	2079,00	196,23	216,05	3194,59	45188,70	545234,35
13	1,30	2158,10	203,70	204,28	3143,26	47304,97	540409,87
14	1,40	2117,80	199,89	192,13	3190,63	46411,40	535003,78
15	1,50	2110,70	199,22	202,73	3177,39	50788,24	549015,85
16	1,60	2083,20	196,63	214,93	3191,70	46545,43	537410,59
17	1,70	2116,80	199,80	253,62	3185,71	45125,64	535923,51
18	1,80	2225,70	210,08	258,98	3075,51	46994,42	513306,87
19	1,90	2171,00	204,91	210,60	3141,13	46317,76	531580,61
20	2,00	2209,50	208,55	196,20	3113,77	47309,47	528065,76

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 5 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 38 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



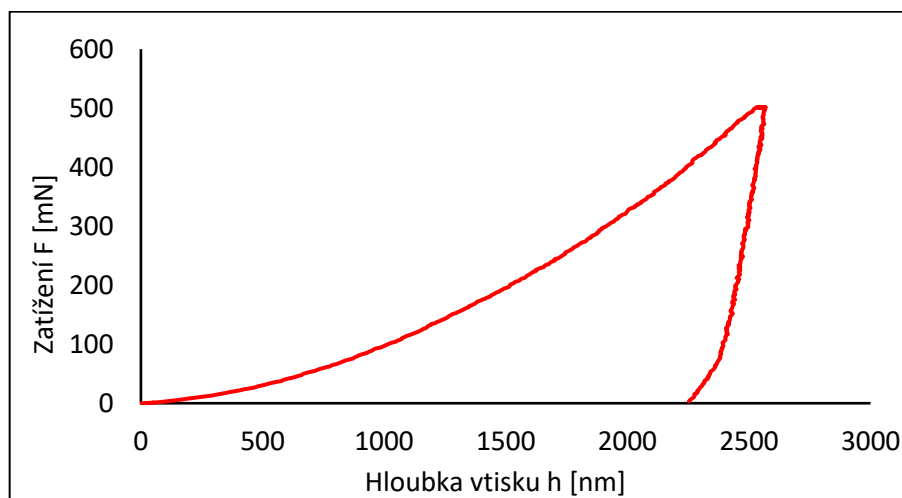
Obr. 37 Indentační křivka pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 5 N

Tab. 20 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	4270,50	403,08	161,81	7549,71	2639760,39	10935352,34
2	0,20	3948,60	372,70	154,67	7826,46	2641154,43	10935571,52
3	0,30	3237,00	305,53	138,10	8578,61	2642538,00	10935783,44
4	0,40	2359,70	222,73	171,80	9724,47	2161012,85	15237391,44
5	0,50	2110,10	199,16	165,65	10239,81	2085757,62	16225005,38
6	0,60	2169,30	204,75	171,81	10086,79	2151961,11	15525183,76
7	0,70	2060,60	194,49	148,33	10429,40	2132211,66	16323068,91
8	0,80	1983,70	187,23	159,10	10553,81	2044050,70	16516067,33
9	0,90	1977,40	186,64	161,54	10553,81	2049912,16	16948886,76
10	1,00	1965,40	185,51	166,56	10574,35	2072664,08	16680485,78
11	1,10	2040,80	192,63	159,90	10413,73	2049770,51	16477615,71
12	1,20	1996,10	188,41	162,82	10501,60	2075190,89	16588459,47
13	1,30	1998,20	188,60	165,93	10489,18	2091474,71	16503554,50
14	1,40	2023,20	190,96	158,07	10460,31	2075555,14	16896076,04
15	1,50	2085,60	196,85	170,95	10273,03	2087699,17	16060232,22
16	1,60	2114,50	199,58	171,67	10207,63	2143772,70	15960027,73
17	1,70	2164,20	204,27	159,08	10148,79	2106104,84	16082944,12
18	1,80	2135,80	201,59	174,17	10154,13	2115594,96	16219164,60
19	1,90	2218,10	209,36	159,59	10049,06	2191522,76	15859528,57
20	2,00	2271,50	214,40	159,78	9934,77	2140042,41	15876183,23

6.1.6 Ocel 1.8504 (14 340) vzorek 6, řezáno laserem

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 6 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 39 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

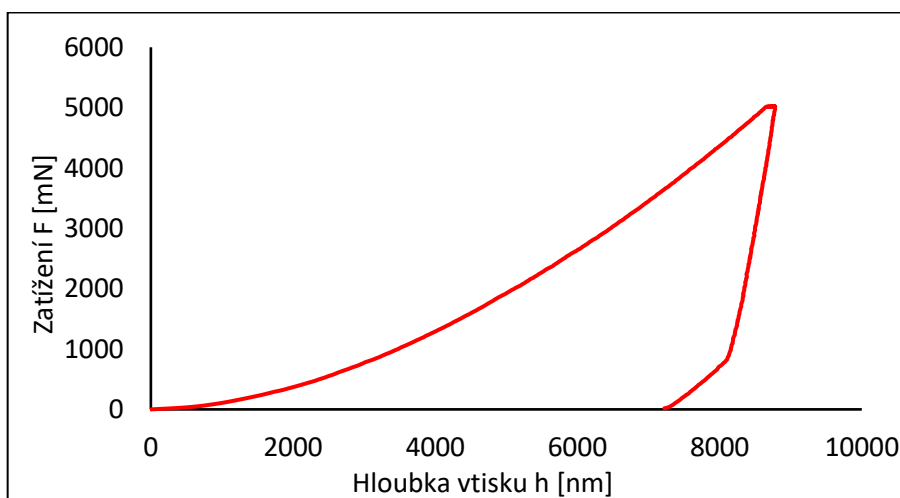


Obr. 38 Indentační křivka pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 21 Naměřené hodnoty pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	3354,70	316,64	211,30	2568,21	51131,08	418168,98
2	0,20	3109,70	293,51	191,27	2664,55	59248,91	434950,51
3	0,30	3199,70	302,01	196,22	2628,85	54721,04	439044,07
4	0,40	3132,90	295,70	175,11	2713,83	59046,96	446682,58
5	0,50	2891,60	272,93	206,10	2742,10	52925,90	457249,40
6	0,60	2947,80	278,23	208,55	2722,94	48758,31	490274,47
7	0,70	2901,80	273,89	264,11	2710,75	50848,09	451153,60
8	0,80	2907,00	274,38	201,46	2743,95	55793,03	454901,03
9	0,90	3011,30	284,22	221,10	2683,79	52109,01	445753,50
10	1,00	2973,30	280,64	191,87	2739,05	51153,05	453590,13
11	1,10	2847,40	268,75	188,08	2781,82	55417,47	470571,45
12	1,20	3008,60	283,97	222,77	2683,47	51195,98	455208,52
13	1,30	2882,00	272,02	205,45	2750,40	48758,88	452924,13
14	1,40	2890,00	272,78	230,44	2729,13	53196,83	458563,39
15	1,50	2995,50	282,73	197,22	2713,00	53374,07	457444,15
16	1,60	2948,60	27831,00	203,20	2721,26	54036,33	448133,39
17	1,70	3047,70	287,66	207,25	2675,28	56425,70	445212,69
18	1,80	2980,90	281,36	196,87	2712,40	54019,91	449752,49
19	1,90	2984,60	281,74	189,20	2713,95	51642,22	444762,89
20	2,00	3049,80	287,85	192,47	2690,27	59227,20	452893,86

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 6 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 40 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



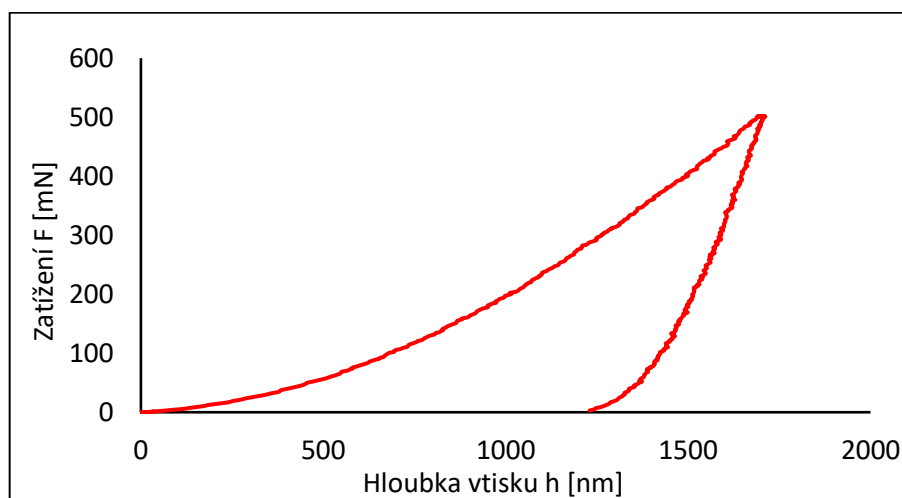
Obr. 39 Indentační křivka pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 5 N

Tab. 22 Naměřené hodnoty pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	2961,40	279,51	169,06	8782,77	2148346,09	14191715,37
2	0,20	2685,70	253,49	160,19	9186,35	2160477,39	14284572,96
3	0,30	2573,80	242,93	155,15	9379,10	2215048,43	14753770,36
4	0,40	2644,50	249,60	154,32	9280,09	2157912,84	14536401,13
5	0,50	2625,40	247,80	173,33	9234,60	2160465,34	14439417,16
6	0,60	2630,60	248,29	158,03	9228,42	2140958,27	14540926,77
7	0,70	2521,60	238,00	148,26	9478,56	2263212,77	15036871,51
8	0,80	2556,60	241,31	155,41	9403,14	2188754,26	14729847,92
9	0,90	2521,70	238,02	151,45	9487,14	2131710,75	14994298,06
10	1,00	2595,60	244,99	151,97	9362,78	2114869,84	14606306,71
11	1,10	2585,40	244,03	154,05	9376,98	2185703,19	14542153,68
12	1,20	2621,20	247,40	166,30	9262,33	2157961,27	14493429,32
13	1,30	2567,50	242,33	149,52	9427,53	2178504,94	14758585,23
14	1,40	2543,30	240,05	162,44	9397,91	2203270,71	14572937,35
15	1,50	2552,70	240,94	155,13	9419,67	2203017,87	14699971,93
16	1,60	2547,50	240,45	165,64	9384,16	2107528,43	14676386,91
17	1,70	2655,20	250,61	157,66	9254,37	2156330,55	14503391,92
18	1,80	2641,70	249,34	165,24	9239,76	2129131,88	14417229,13
19	1,90	2654,60	250,56	162,59	9229,36	2166874,55	14373154,10
20	2,00	2573,60	242,91	161,97	9358,31	2168020,96	14425200,04

6.1.7 Ocel 1.2510 (19 314) vzorek 7, řezáno laserem

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N na vzorku č. 7 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 41 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

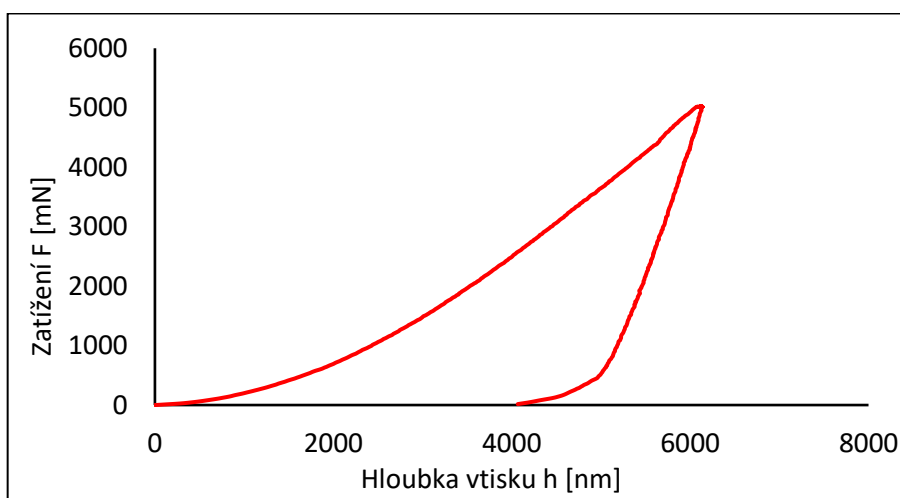


Obr. 40 Indentační křivka pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 0,5 N

Tab. 23 Naměřené hodnoty pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 0,5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	8436,20	796,26	238,76	1703,38	85338,56	226981,91
2	0,20	4593,10	433,52	166,19	2258,47	85452,04	227208,26
3	0,30	3363,10	317,43	139,03	2614,62	85374,67	227053,99
4	0,40	2734,60	258,11	229,81	2798,73	49431,99	449787,99
5	0,50	2591,70	244,62	186,81	2908,67	52909,14	481056,99
6	0,60	2712,30	256,01	220,72	2816,91	50379,85	467493,24
7	0,70	2603,10	245,69	236,49	2864,09	51458,59	476036,24
8	0,80	2373,00	223,98	199,51	3014,30	51077,36	510993,46
9	0,90	2461,10	232,29	205,13	2955,68	49204,57	490455,14
10	1,00	2367,70	223,48	218,44	3001,51	50510,86	503692,15
11	1,10	2350,00	221,81	209,69	3018,51	50462,61	516411,21
12	1,20	2332,30	220,14	223,00	3019,76	49183,80	494174,29
13	1,30	2377,50	224,40	195,02	3010,01	53970,94	496960,64
14	1,40	2416,50	228,09	215,71	2973,71	55293,95	491320,41
15	1,50	2403,40	226,84	215,28	2980,69	50876,63	486303,24
16	1,60	2377,80	224,43	229,95	2988,76	51892,84	494835,21
17	1,70	2407,00	227,18	214,45	2980,03	52354,80	492267,02
18	1,80	2527,70	499,64	174,37	2984,14	54761,22	488365,86
19	1,90	2465,00	232,67	200,11	2960,49	52652,86	494471,47
20	2,00	2280,40	215,24	226,52	3052,44	50262,80	516255,91

Po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N na vzorku č. 7 byla vytvořena indentační křivka v každém vpichu. Na obr. 42 lze vidět indentační křivku prvního vpichu. Program dokáže z této indentační křivky určit hodnoty pro naše zkoumané mechanické vlastnosti, které jsou uvedeny v následující tabulce.



Obr. 41 Indentační křivka pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 5 N

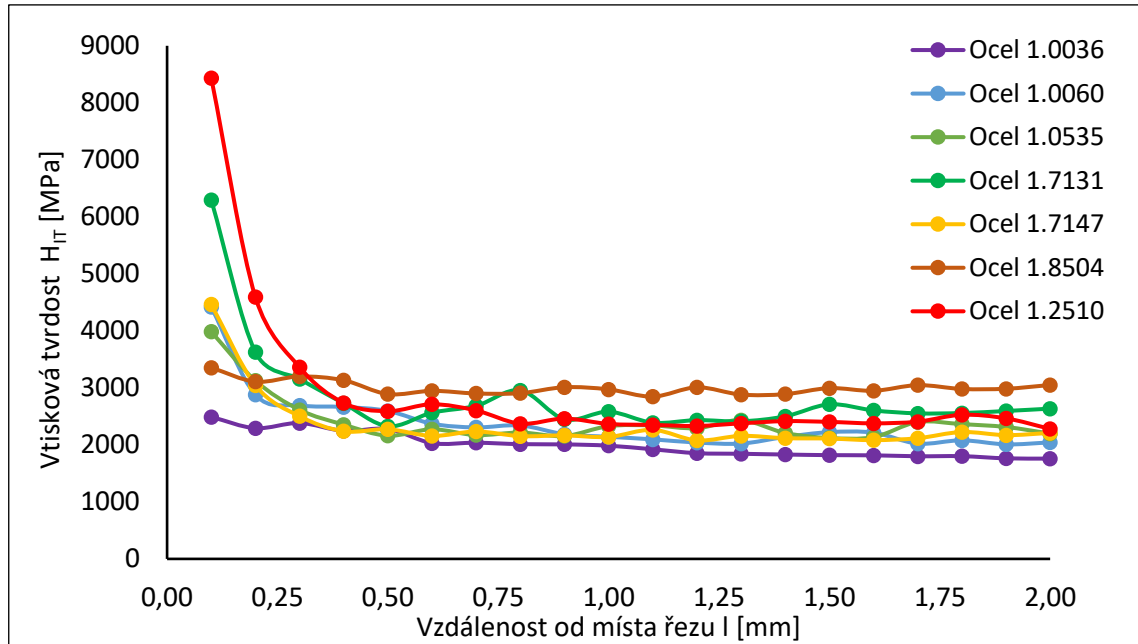
Tab. 24 Naměřené hodnoty pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 5 N

N	l [mm]	H _{IT} [MPa]	HV _{IT} [Vickers]	E _{IT} [GPa]	H _{max} [nm]	W _{el} [pJ]	W _{pl} [pJ]
1	0,10	7154,10	675,25	165,20	6138,43	3061121,57	84828962,23
2	0,20	6312,90	595,85	153,70	6484,22	3068694,03	84806679,78
3	0,30	4473,20	422,21	126,44	7554,21	3067319,32	84806849,33
4	0,40	3419,50	322,76	108,88	8526,49	3068702,44	84806691,78
5	0,50	2511,00	237,00	161,46	9458,99	2188091,92	14599138,07
6	0,60	2416,40	228,07	165,34	9609,51	2162245,42	14768394,13
7	0,70	2337,90	220,66	156,32	9789,34	2145738,57	15247849,72
8	0,80	2279,50	215,15	161,82	9883,48	2080302,02	15734400,28
9	0,90	2253,10	212,66	154,78	9962,12	2057273,84	15507204,87
10	1,00	2248,60	211,95	159,19	9957,58	2051758,37	15573939,95
11	1,10	2233,80	210,84	159,09	9981,14	2076388,01	15712403,25
12	1,20	2281,70	215,36	154,21	9906,84	2069310,32	15439953,19
13	1,30	2308,60	217,90	156,17	9852,69	2102603,74	15354362,47
14	1,40	2340,70	220,93	161,25	9766,43	2133549,02	15117140,78
15	1,50	2306,40	217,69	156,82	9846,87	2106201,93	15509497,97
16	1,60	2257,00	213,03	158,12	9443,36	2064714,19	15701109,14
17	1,70	2259,20	213,24	153,27	9963,06	2068815,56	15525349,29
18	1,80	2239,10	211,34	160,94	9966,27	2111293,05	15406301,89
19	1,90	2251,70	212,53	155,46	9957,85	2118684,06	15592550,03
20	2,00	2367,50	223,46	167,05	9701,52	2069076,13	14951237,52

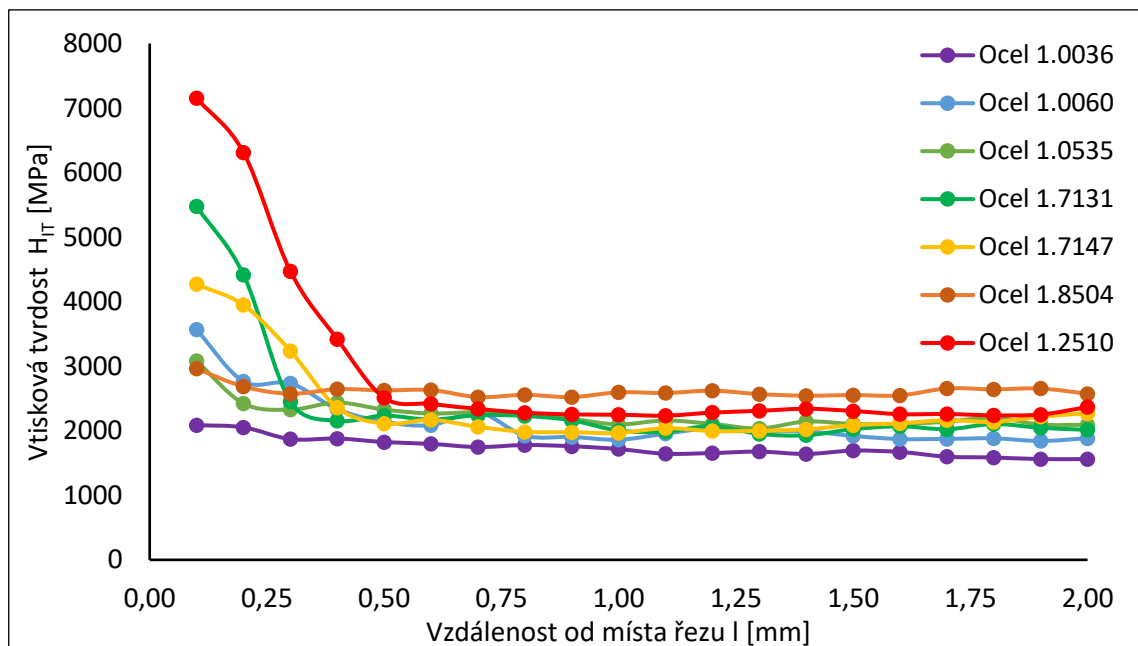
6.2 Grafické vyhodnocení a porovnání ocelí

6.2.1 Vtisková tvrdost

Vtisková tvrdost neboli tvrdost je mechanická vlastnost materiálů, která nám vyjadřuje odpor materiálů vůči vniknutí cizího tělesa. Vtisková tvrdost se uvádí v MPa.



Obr. 42 Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N

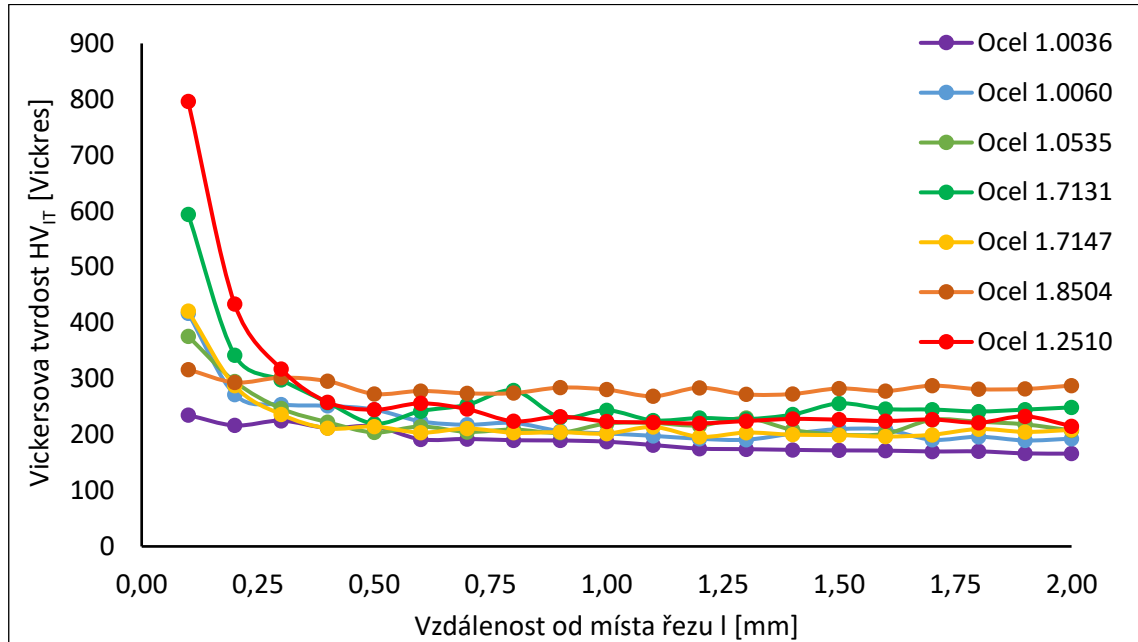


Obr. 43 Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N

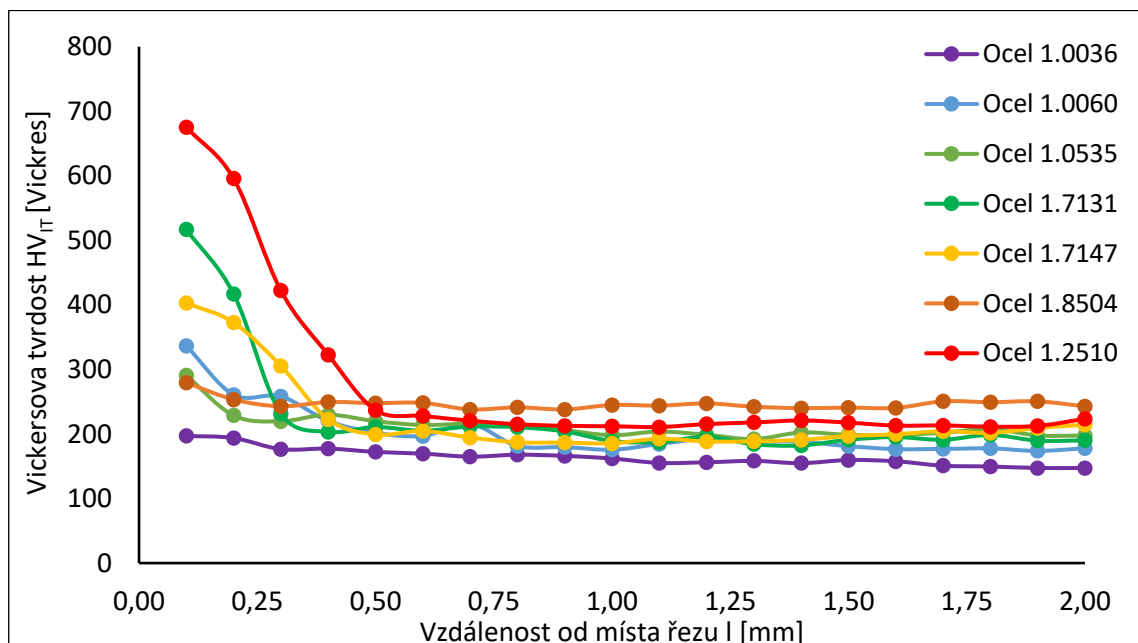
Při měření vtiskové tvrdosti byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při dvou zkušebních zatíženích a to 0,5 a 5 N. Čím větší zatížení použijeme, tím více se indentor dostane do hloubky zkušebního vzorku, kde je materiál méně teplotně ovlivněn. Při řezání dochází k vysokým teplotám v místě řezu. U laseru se teplota pohybuje okolo 35 000 °C a u plazmy okolo 15 000 °C, zatímco okolní teplota je cca 20 °C. Tento výrazný tepelný spád způsobí ochlazení kritickou rychlostí, která má za následek zakalení povrchu. Zakalená vrstva zvyšuje tvrdost materiálu, která následně zvýší odpor materiálu vůči vniknutí cizího tělesa. Do jaké míry se oceli ovlivní, záleží také na jejím chemickém složení. Měřením bylo zjištěno, že téměř každý zkoušený materiál byl výrazně ovlivněn do vzdálenosti 0,5 mm od místa řezu při zatížení 5 N. U menšího zatížení byla vzdálenost tepelného ovlivnění o něco kratší. Nejméně ovlivněné oceli byly 1.0036 a 1.8504. U oceli 1.0036 byla největší hodnota vtiskové tvrdosti naměřena v oblasti tepelného ovlivnění a to 2 490,60 MPa, ostatní hodnoty vzdálené od místa řezu se pohybují v rozmezí 1 500 až 2 200 MPa. Hodnoty oceli 1.8504 se pohybují v rozmezí 2 500 až 3 000 MPa v neovlivněné oblasti. Největší naměřená hodnota této oceli dosáhla 3 354,70 MPa. Oceli 1.0060, 1.0535 a 1.7147 dosahují podobného tepelného ovlivnění při zatížení 0,5 N, viz obr. 40. Při zkušebním zatížení 5 N se naměřené hodnoty tvrdosti do vzdálenosti 0,3 mm od místa řezu liší, viz obr. 41. Jednou z nejvíce ovlivněných ocelí je ocel 1.7131, která jako jediná byla řezána plazmou. Největší naměřená hodnota tvrdosti je 6 296 MPa a hodnoty v neovlivněné oblasti se pohybují v rozmezí 2 200 až 3 000 MPa. Podle našeho měření je nejvíce ovlivněným materiálem ocel 1.2510, u které se naměřila největší hodnota vtiskové tvrdosti 8 436,20 MPa. Hodnoty více vzdálené od místa řezu se pohybují od 2 300 do 3 500 MPa.

6.2.2 Tvrdost podle Vickerse

Tvrdost podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně a udává nám tvrdost materiálů, Vickersova tvrdost je určena poměrem vlačovací síly F a povrchu vtisku



Obr. 44 Graf závislosti Vickersové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N

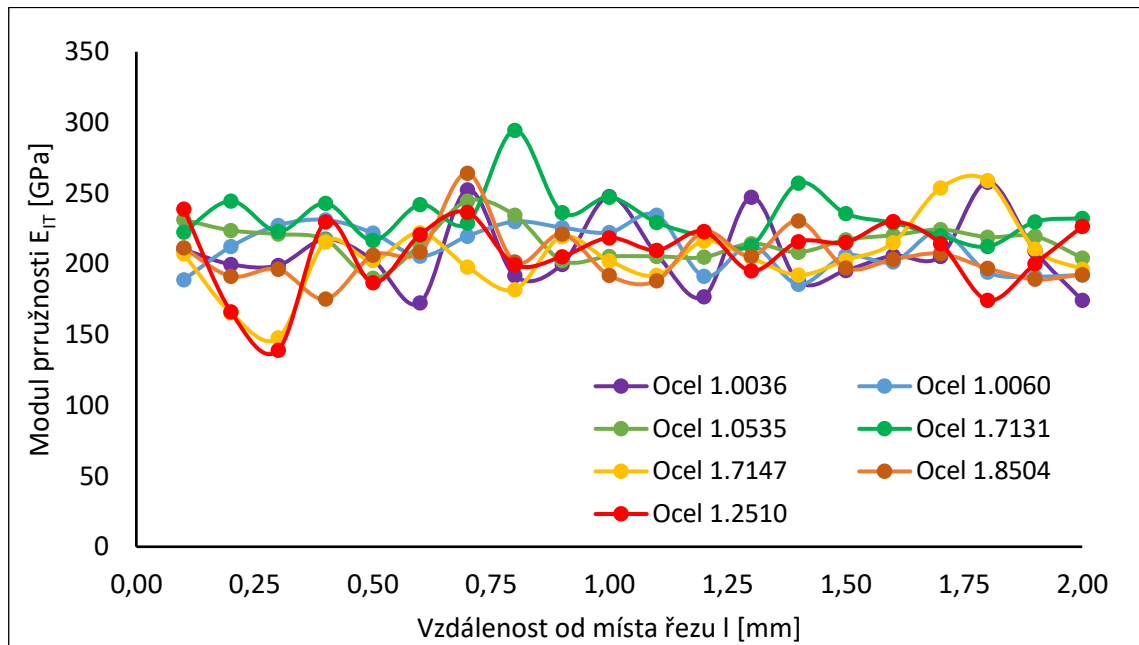


Obr. 45 Graf závislosti Vickersové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N

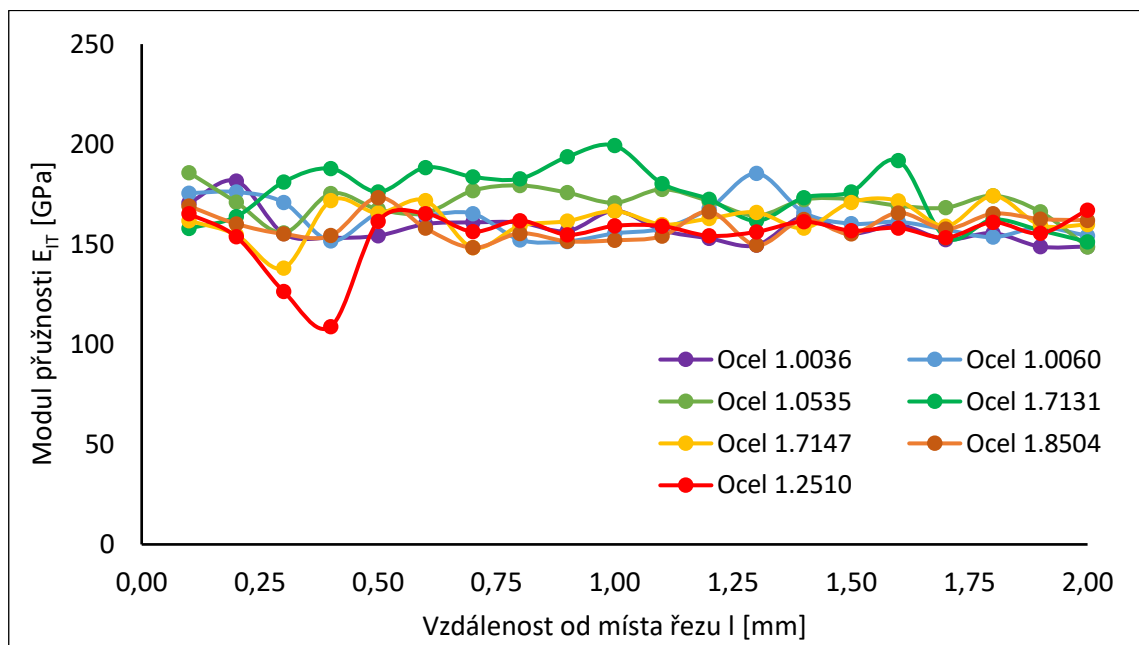
Tvrдость podle Vickerse byla naměřena instrumentovanou zkouškou tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 a 5 N. Při zatížení 0,5 N bylo zjištěno, že oceli byli výrazně tepelně ovlivněny do vzdálenosti cca 0,3 mm od místa řezu. U zatížení 5 N se vzdálenost téměř nezměnila, pouze u oceli 1.2510 se vzdálenost posunula do 0,5 mm. Jak z uvedených grafů (obr. 42, 43) vyplývá, naměřené hodnoty tvrdosti vybraných druhů ocelí při našich zatíženích se nijak výrazně neliší. Tepelné ovlivnění je důsledkem procesu řezání při, kterém dochází k vysokým teplotám. U laseru v místě řezu se teplota pohybuje okolo 35 000 °C a u plazmy okolo 15 000 °C, zatímco okolní teplota se pohybuje kolem 20 °C. Tento výrazný tepelný spád způsobí ochlazení kritickou rychlostí, což způsobí zakalení povrchu a tím pádem změnu struktury materiálů. Nejméně ovlivněné oceli jsou 1.0036 a 1.8504, protože tvrdosti jednotlivých vpichů se příliš neliší. Rozdíl mezi těmito oceli spočívá naměřených hodnotách. Ocel 1.0036 dosáhla největší hodnoty 235,08 HV, což odpovídá tvrdosti perlitu hrubého. Ve větší vzdálenosti od místa řezu se hodnoty pochybují okolo 147 až 180 HV, kde tvrdost odpovídá struktuře austenitu. Největší naměřená hodnota u oceli 1.8504 byla 316,64 HV, která dosahuje svou tvrdostí struktury bainitu horního. Další naměřené hodnoty se pohybují v rozmezí od 240 do 300 HV, což odpovídá sktruktuře perlitu. Oceli 1.0060, 1.0535 a 1.7147 dosahují podobného ovlivnění. Největší naměřené hodnoty těchto ocelí se pohybují v rozmezí 376 až 420 HV, což odpovídá struktuře bainitu. U těchto ocelích ve větší vzdálenosti od místa řezu se hodnoty tvrdosti pohybují od 200 do 300 HV, což odpovídá sktruktuře perlitu. Materiál, který byl jako jediný řezaný plazmou, byla ocel 1.7131. Důsledkem toho je ocel výrazně teplotně ovlivněná do 0,25 mm, kde její největší naměřená hodnota tvrdosti dosáhla 594,26 HV. Zjištěná tvrdost je na rozmezí struktury bainitské a marterzické. Ve větší vzdálenosti od místa řezu se Vickersova tvrdost pohybuje okolo 200 až 300 HV, která odpovídá struktuře perlitu. Nejvíce ovlivněnou ocelí byla ocel 1.2510. Tato ocel ve vzdálenosti bez tepelného ovlivnění dosáhla hodnoty okolo 200 až 300 HV, což reprezentuje strukturu perlitu. Při měření byla zjištěna největší hodnota 796,26 HV, která odpovídá sktruktuře martenzitu. Struktury martenzitu je dosaženo důsledkem chemického složení oceli, ve které je vysoký obsah uhlíku.

6.2.3 Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje závislost mezi napětím a jím vyvolané deformace. Modul pružnosti E je udávána v Pa.



Obr. 46 Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N

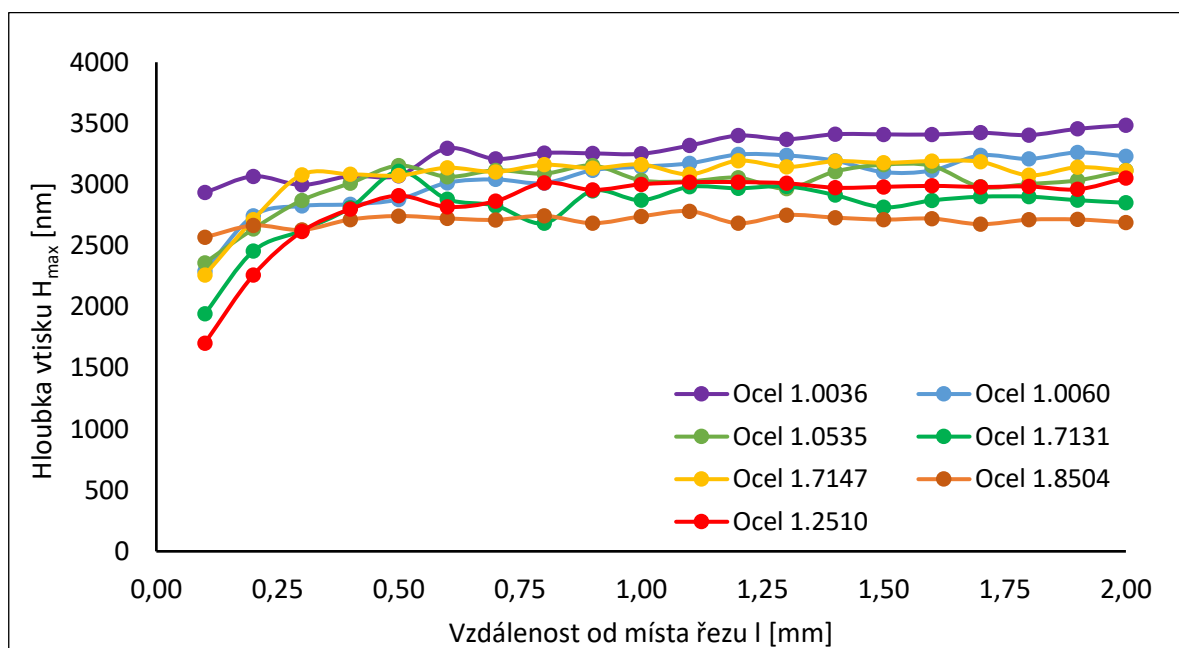


Obr. 47 Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N

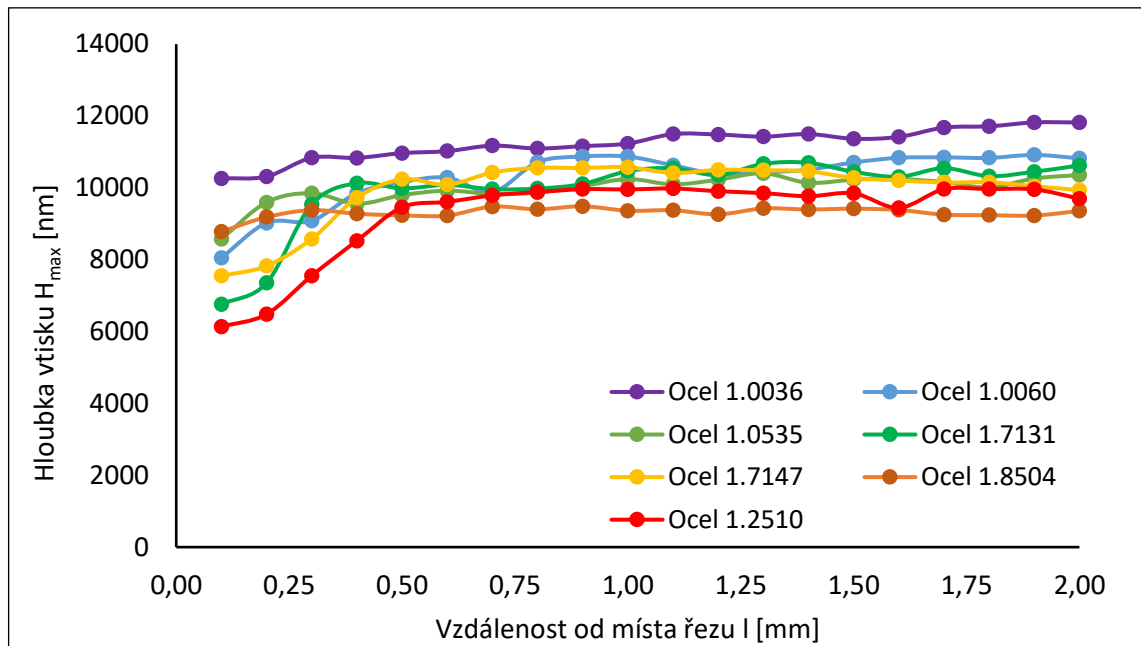
Instrumentovanou zkouškou tvrdosti při dvou zkušebních zatíženích byla také použita na zjištění modulu pružnosti u vybraných druhů ocelí. U zatížení 0,5 N dosahuje modul pružnosti hodnot v průměru 220 GPa. Při zatížení 5 N se hodnoty modulu pružnosti pohybují v průměru 170 GPa. Porovnáním těchto hodnot modulu pružnosti bylo zjištěno, že naměřené hodnoty se příliš neliší. Modul pružnosti není jinak výrazně tepelně ovlivněn způsobem dělení materiálu po celé měřené délce. Na obr. 44 a 45 můžeme vidět, že došlo pouze k občasným výkyvům hodnot modulu pružnosti nezávisle na vzdálenosti od místa řezu, jak tomu bylo při měření tvrdosti. Nižší zatížení se vyznačuje častějším kolísáním hodnot modulu pružnosti u všech vybraných ocelí. U většího zatížení můžeme pozorovat pouze občasné výkyvy, z nichž nejvyšší byl naměřen u oceli 1.2510, kde došlo ke změně o 60 GPa.

6.2.4 Maximální hloubka vtisku

Maximální hloubka vtisku nám udává hodnotu, do jaké hloubky v dané vzdálenosti od místa řezu se dostal indenter při provádění instrumentované zkoušky tvrdosti.



Obr. 48 Graf závislosti maximální hloubky indenteru u materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N

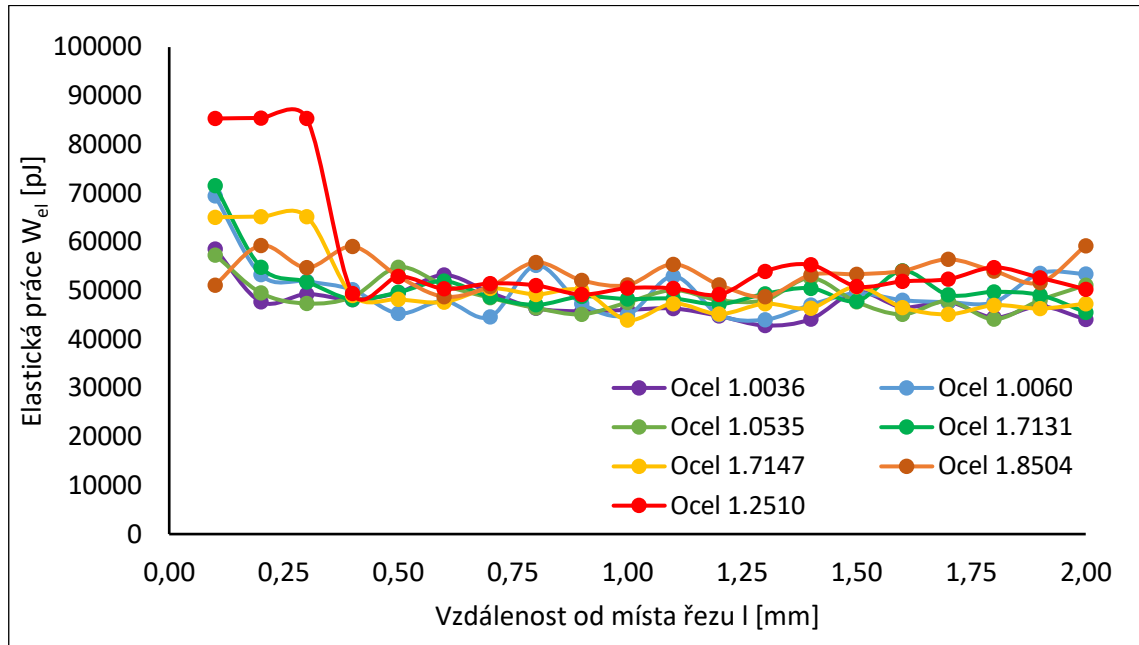


Obr. 49 Graf závislosti maximální hloubky indentoru u materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N

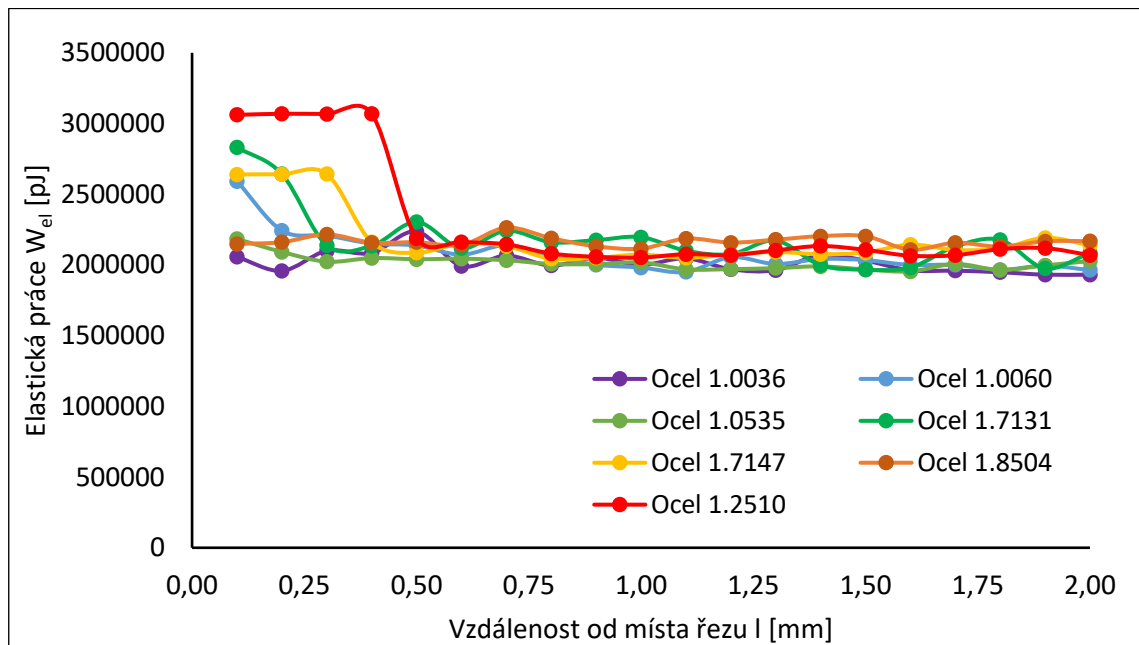
Dalším zjišťovaným parametrem po provedení instrumentované zkoušky tvrdosti byla maximální hloubka vtisku indentace v určité vzdálenosti od místa řezu. Tepelně ovlivněná oblast při zkušebním zatížení 0,5 N byla do vzdálenosti 0,3 mm od místa řezu a při zkušebním zatížení 5 N se vzdálenost posunula do 0,5 mm. Toto posunutí je způsobeno tím, že při větším zatížení se indenter dostane více do hloubky, kde je ocel méně tepelně ovlivněná. Tepelné ovlivnění je důsledkem procesu řezání při, kterém dochází k vysokým teplotám. U laseru v místě řezu se teplota pohybuje okolo 35 000 °C a u plazmy okolo 15 000 °C, zatímco okolní teplota se pohybuje kolem 20 °C. Tento výrazný tepelný spád způsobí ochlazení kritickou rychlostí, což způsobí zakalení povrchu a tím pádem změnu struktury materiálů. Grafy obr. 46, 47 vykazují podobnou strukturu jako grafy naměřené tvrdosti. Je to dáno tím, že materiál v ovlivněné oblasti vykazuje větší tvrdost a tím pádem i větší odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Stejně jako u měření tvrdosti i zde dosahuje ocel 1.0036 a 1.8504 nejmenšího tepelného ovlivnění. Jejich hloubky měřené v nejkratší a nejdelší vzdálenosti od místa řezu jsou téměř stejné. Naopak u oceli 1.2510, která je nejvíce tepelně ovlivněná je hloubka v blízkosti řezu 6138,46 nm, kdežto hodnoty naměřené v teplotně neovlivněné oblasti se pohybují okolo 9500 nm při zkušebním zatížení 5 N. Tento rozdíl je způsoben tím že po zakalení povrchu po způsobu řezání se u oceli 1.2510 vytvoří martenzická struktura která vykazuje větší tvrdost.

6.2.5 Elastická práce

Elastická práce, u které je základní jednotka joul [J] nám udává, do jaké míry je zkoumaný materiál elastický.



Obr. 50 Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N

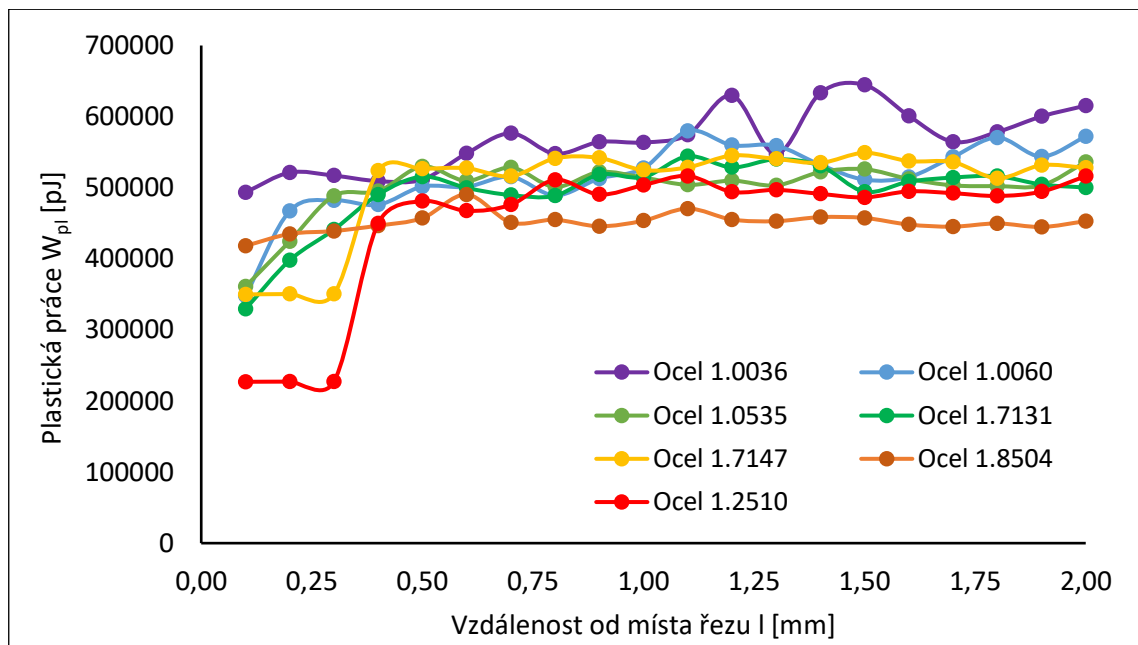


Obr. 51 Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N

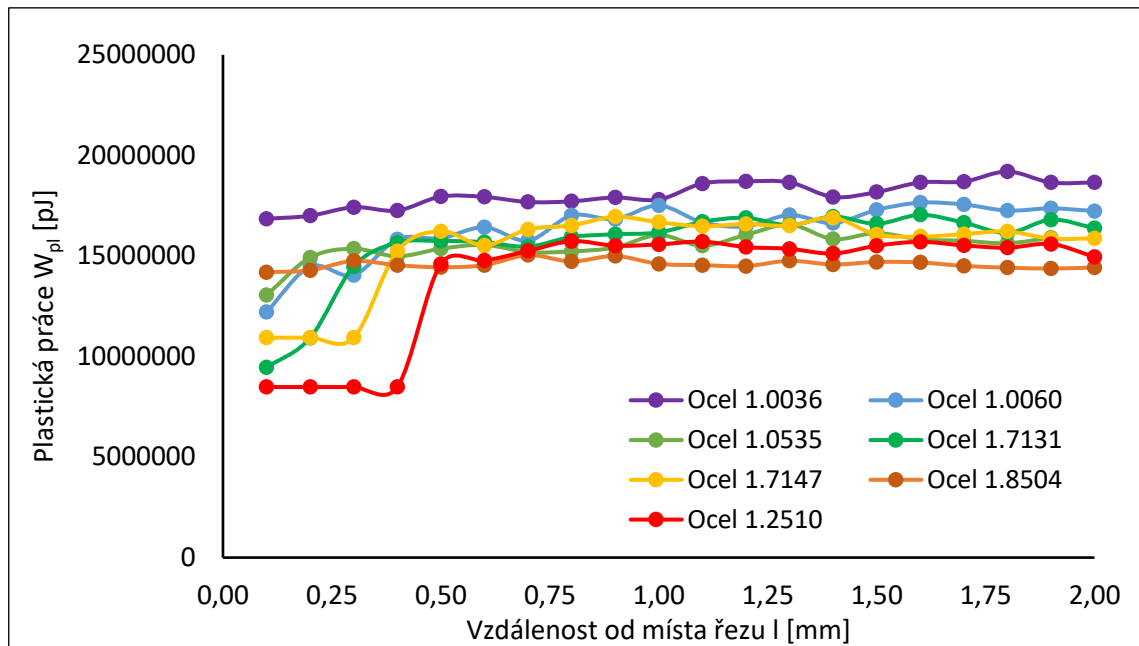
Elastická práce u ocelí byla naměřena instrumentovanou zkouškou tvrdosti při dvou zkušebních zatížení a to 0,5 a 5 N. Jak můžeme vidět v grafech obr. 48, 49 průběh elastické práce u zkoumaných ocelí je obdobný, avšak velikost zatížení zde hraje významnou roli. U zatížení 0,5 N se naměřené hodnoty pohybují v řádu desetitisíců a při zatížení 5 N v řádu milionů. Výrazně ovlivněná oblast při zatížení 0,5 N byl do vzdálenosti 0,3 mm od místa řezu a u zatížení 5 N se vzdálenost posunula do 0,5 mm, stejně tak jako u ostatních měřených vlastností. Při zatížení 0,5 N se naměřené hodnoty pohybují v průměru 55 000 pJ a u zatížení 5 N v průměru 2 200 000 pJ. Ocel 1.2510 je nejvíce ovlivněnou ocelí, u které jsme naměřili nejvyšší hodnotu 85 338,56 pJ při zatížení 0,5 N a hodnotu 3 061 121,57 pJ u zatížení 5 N. Hodnoty elastické práce se výrazně změnili, protože po řezání v ovlivněné oblasti došlo k výrazným teplotním rozdílům mezi teplotou v místě řezu a okolní teplotou. Tento teplotní rozdíl způsobí ochlazení kritickou rychlostí, což vede k zakalení povrchu a tím ke zvýšení tvrdosti a snížení elasticity materiálů.

6.2.6 Plastická práce

Plastická práce, u které je základní jednotka joule [J] nám udává, do jaké míry je zkoumaný materiál plastický.



Obr. 52 Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N



Obr. 53 Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N

Instrumentovaná zkouška tvrdosti byla použita i pro změření poslední zkoumané vlastnosti, kterou byla plastická práce. Opět byla zkouška provedena při dvou zkušebních zatížení, kde naměřené hodnoty při zatížení 0,5 N se pohybují v řádu desetitisíců a při zatížení 5 N v řádu až deseti milionů. Z porovnání grafů elastické a plastické práce je patrné, že plastická práce je opakem elastické práce. Při zatížení 0,5 N se naměřené hodnoty pohybují v průměru 500 000 pJ a u zatížení 5 N v průměr 15 000 000. Nejvíce plastickou ocelí je ocel 1.2510, která u zatížení 0,5 N dosáhla hodnoty 226981,91 pJ a při zatížení 5 N hodnoty 84828962,23 pJ. U plastické práce také platí, že tepelně ovlivněná oblast je do vzdálenosti 0,3 a 0,5 N od místa řezu. Změna hodnot plastické práce je způsobena výrazným teplotním rozdílem, který vzniká mezi teplotou při způsobu řezání a okolní teplotou. Tento teplotní rozdíl způsobí ochlazení kritickou rychlostí, což vede k zakalení povrchu a tím ke zvýšení tvrdosti a plasticity materiálů.

ZÁVĚR

Bakalářská práce řešila, jaký vliv má proces dělení kovových materiálů nekonvenčními metodami na výsledné mechanické vlastnosti těchto materiálů. Mechanické vlastnosti byly zjišťovány u 7-mi vybraných druhů ocelí. Ocel 1.0036, 1.0060, 1.0535, 1.7147, 1.8504 a 1.2510 byla řezána pomocí laserem a ocel 1.7131 byla řezána pomocí plazmy. Zkušební vzorky byly nařezány firmou TAJMAC-ZPS a.s., Zlín a změřeny ve školní laboratoři pomocí mikrotvrdoměru, kde byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při dvou zkušebních zatíženích. Naměřené hodnoty byly číselně a graficky vyhodnocené v programu Microsoft Excel. Ze získaných hodnot jsme určili, do jaké vzdálenosti od místa řezu a jak jsou jednotlivé druhy ocelí tepelně ovlivněny.

Z výsledků měření vyplynulo, že tepelně ovlivněná oblast se pohybovala do vzdálenosti 0,5 mm od místa řezu. Tato oblast vznikla důsledkem velkého teplotního rozdílu mezi teplotou v místě řezu a okolní teplotou. Tento výrazný tepelný spád způsobil ochlazení kritickou rychlostí, což vedlo k zakalení povrchu. Zakalená vrstva vedla ke změně struktury materiálů v ovlivněné oblasti a tím i k větší tvrdosti materiálů. Vykazované hodnoty tvrdosti a velikost tepelného ovlivnění byli způsobeny chemickým složením jednotlivých materiálů, z nichž největší roli sehrál obsah uhlíku.

Ocel 1.2510 je jedna z nejvíce ovlivněných ocelí z našich vybraných druhů. Tato ocel dosahovala v neovlivněné oblasti hodnotu tvrdosti v průměru 250 HV. Tyto hodnoty tvrdosti odpovídají struktury perlitu. Zatímco největší naměřená hodnota tvrdosti podle Vickerse vyšplhala na 796,26 HV a tím se změnila struktura na martenzickou. Tato změna struktury byla dosažena z důvodu velkého obsahu uhlíku, který u oceli 1.2510 je až 1 %.

Ocel 1.7131 byla jako jediná nařezána plazmou, což sehrálo určitou roli v ovlivněné oblasti. Tato ocel obsahuje cca 0,17 % uhlíku, což vedlo ke změně struktury v ovlivněné oblasti z perlitické na bainitickou. Největší naměřenou hodnotou tvrdosti podle Vickerse bylo 594,26 HV v blízkosti místa řezu, zatímco vzdálenější hodnoty se pohybovali v rozmezí 200–270 HV.

Ocel 1.7147 obsahuje téměř shodné procento uhlíku jako o cel 1.7131, ale kvůli laserovému dělení dosahuje v nejbližším místě řezu nižších hodnot tvrdosti. V neovlivněné oblasti se hodnoty pohybovali v rozmezí 200-230 HV, což odpovídalo struktuře perlitu. V tepelně ovlivněné oblasti Vickersova tvrdost dosáhla hodnoty 403,08 HV a struktura se změnila na bainitickou.

Ocel 1.0060 má strukturu perlitu a v místě řezu zakalené vrstvy se přeměnila na strukturu bainitu. Největší naměřená hodnota tvrdosti podle Vickerse byla 417,12 HV a průměrná hodnota vykazuje 230 HV.

Ocel 1.0535 v ovlivněné oblasti dosáhla největší hodnoty 376,14 HV, což odpovídá struktuře bainitu, kdežto hodnoty vzdálenější od místa řezu se pohybovali v průměru 200 HV a shodují se s tvrdostí struktury perlitu.

Ocel 1.8504 byla jednou z nejméně ovlivněných ocelí v místě řezu zakalené vrstvi a dosáhla největší hodnoty 316,64 HV. Struktura této oceli se v zakalené vrstvě jen minimálně nezměnila, ale i tak dosáhla hodnoty tvrdosti bainitu. Průměrná hodnota v neovlivněné oblasti kolísá v rozmezí 240-280 HV, což odpovídá struktuře perlitu.

Ocel 1.0036 dosáhla nejmenších hodnot tvrdosti důsledkem svého chemického složení a tím i nejmenšího tepelného ovlivnění. Hodnoty v neovlivněné oblasti se pohybovali v průměru 170 HV a spadá podle tvrdosti pod strukturu austenitu. Největší naměřená hodnota vyšplhala na 235,08 HV. Opět zde nedošlo k výraznému tepelnému ovlivnění i přes to se struktura změnila na perlitskou.

Dalšími porovnávanými mechanickými vlastnostmi zjištěnými instrumentovanou zkouškou tvrdosti byl modul pružnosti, plastická a elastická práce, maximální hloubka vtisku a vtisková tvrdost. Vtisková tvrdost vykazuje stejnou strukturu, jak při měření Vickersovi tvrdosti jen je udávána v jednotkách Pa. Maximální hloubka vtisku souvisí s naměřenou tvrdostí. Tvrdost nám udává odpor materiálů vůči vniknutí cizího tělesa a platí čím větší tvrdost, tím nižší namořená hloubka. Podle získaných hodnot jsme zjistili že modul pružnosti nebyl jinak výrazně tepelně ovlivněn způsobem dělení materiálu, a to po celé měřené délce. Pomocí naměřených údajů bylo také zjištěno, že zakalená vrstva ovlivňuje i plastickou a elastickou práci. U elastické práce dochází ke zvýšení hodnot a při plastické se naopak hodnoty snižují.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PTÁČEK, L. a kolektiv *Nauka o materiálu I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, kovové materiály 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [2] PTÁČEK, L. a kolektiv *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. 185 s. ISBN 80-7080-600-1.
- [4] LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, 1992. 273 s.
- [5] DILLINGER, J a kolektiv. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa – Sobotáles, 2007. 608 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [6] MOŘÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň: západočeská univerzita, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [7] HLUCHÝ, M. KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1. Díl 1, Nauka o materiálu*. Praha: Scientia, 2007. 266 s. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [8] HLUCHÝ, M. KOLOUCH, J. PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 2. Díl 1, Polotovary a jejich technologičnost*. Praha: Scientia, 2001. 316 s. ISBN 80-7183-244-8.
- [9] ŘASA, J. GABRIEL, V. POKORNÝ, P. *Strojírenská technologie 3. Díl 2*, Praha: Scientia, 2005. 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
- [10] Opi.zcu.cz, 2005. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. 2005 [cit. 28.11.2018]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf
- [11] DUŠEK, J. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 17 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [12] ČSN EN ISO 14577-1 *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda*, Říjen 2002. 31 s.
- [13] ČSN 41 1373 *Ocel 11 373*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 24 s.
- [14] ČSN 41 1600 *Ocel 11 600*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 16 s.
- [15] ČSN 41 2060 *Ocel 12 060*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 20 s.
- [16] ČSN 41 4220 *Ocel 14 220*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 12 s.
- [17] ČSN 41 4221 *Ocel 14 221*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 8 s.
- [18] ČSN 41 4340 *Ocel 14 340*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 8 s.
- [19] ČSN 41 9314 *Ocel 19 314*. Český normalizační institut, Praha, 1994. 8 s.

- [20] BALTÁ-CALLEJA, F. J. a Stoyko FAKIROV. *Microhardness of polymers*. Cambridge, [England]: Cambridge University Press, 2000. 237 s. ISBN 0-521-64218-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	[mm ²]	Plocha povrchu vtisku
Al		Hliník
C		Uhlík
CO ₂		Oxid uhličitý
Cr		Chrom
Cu		Měď
ČSN		Česká stání norma
D	[mm]	Průměr kuličky
d	[mm]	Průměr vtisku kuličky
DSI		Instrumentovaná zkouška tvrdosti
E	[Pa]	Modul pružnosti
F	[N]	Vtlačovací síla
Fe		Železo
h	[mm]	Hloubka vtisku
H _{IT}	[MPa]	Vstiková tvrdost
HB		Tvrdost podle Brinella
He		Helium
HM		Tvrdost podle Martense
HR		Tvrdost podle Rockwella
HV		Tvrdost podle Vickerse
K		Materiálový koeficient
l	[mm]	Vzdálenost od místa řezu
Mn		Mangan
N		Dusík

Ni		Nikl
P		Fosfor
PVC		Polyvinylchlorid
S		Síra
Si		Křemík
u	[mm]	Aritmetický průměr délek uhlopříček vtisku
V		Vanad
W		Wolfram
Wel		Elastická práce
Wpl		Plastická práce

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozdělení konstrukčních materiálů [5].....	12
Obr. 1 Rozdělení konstrukčních materiálů [5].....	13
Obr. 3 Rovnovážený diagram soustavy železo-uhlík [2]	14
Obr. 4 Rozdělení ocelí do skupin [2]	15
Obr. 5 Schéma značení ocelí dle ČSN EN 10027-2 [7].....	17
Obr. 6 Technické a technologické parametry [6]	20
Obr. 7 Výstupní výkon režimů [6].....	20
Obr. 8 Schéma řezání laserem [8].....	21
Obr. 9 schéma řezání plazmou [8]	23
Obr. 10 schéma řezání vodním paprskem [8]	25
Obr. 11 Porovnání pracovního diagramu při statické a dynamické zkoušce [4]	27
Obr. 12 Zkouška tvrdosti podle Brinella [7].....	29
Obr. 13 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [7]	30
Obr. 14 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [7]	31
Obr. 15 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [7]	32
Obr. 16 Průběh zkoušky tvrdosti podle Rockwella [5].....	32
Obr. 17 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [7]	33
Obr. 18 Schématické znázornění indentační křivky [11]	34
Obr. 19 Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Martense [12]	35
Obr. 20 Znázornění vzorku při maximálním zatížení a odlehčení [11].....	36
Obr. 21 Závislost zatížení na hloubce [11]	37
Obr. 22 Zařízení na zalisování vzorků Simpli-Met 1000	40
Obr. 23 Leštička Buehler Eco-Met 250 PRO	41
Obr. 24 Zkušební vzorek materiálu	41
Obr. 25 Měřicí přístroj MicroCombi Tester (MHT ³) od firmy Anton-Paar	44
Obr. 26 Znázorněné vpichy při indentaci	45
Obr. 27 Mikroskopická fotka vpichů	45
Obr. 28 Indentační křivka pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	46
Obr. 29 Indentační křivka pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 5 N.....	47
Obr. 30 Indentační křivka pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	48
Obr. 31 Indentační křivka pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 5 N.....	49
Obr. 32 Indentační křivka pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	50

Obr. 33 Indentační křivka pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 5 N.....	51
Obr. 34 Indentační křivka pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	52
Obr. 35 Indentační křivka pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 5 N.....	53
Obr. 36 Indentační křivka pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	54
Obr. 37 Indentační křivka pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 5 N.....	55
Obr. 38 Indentační křivka pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	56
Obr. 39 Indentační křivka pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 5 N.....	57
Obr. 40 Indentační křivka pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	58
Obr. 41 Indentační křivka pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 5 N.....	59
Obr. 42 Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N	61
Obr. 43 Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N	61
Obr. 44 Graf závislosti Vickersové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N	63
Obr. 45 Graf závislosti Vickersové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N	63
Obr. 46 Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N	65
Obr. 47 Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N	65
Obr. 48 Graf závislosti maximální hloubky indentoru u materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N	66
Obr. 49 Graf závislosti maximální hloubky indentoru u materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N	67
Obr. 50 Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N	68
Obr. 51 Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N	68
Obr. 52 Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N	69
Obr. 53 Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N	70

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Typy zkoušek a rozsahy použití podle Vickerse [7].....	31
Tab. 2 Stupnice tvrdosti podle Rockwella [7]	33
Tab. 3 Chemické složení oceli 1.0036 [13]	42
Tab. 4 Chemické složení oceli 1.0060 [14]	42
Tab. 5 Chemické složení oceli 10535 [15]	42
Tab. 6 Chemické složení oceli 1.7131 [16]	43
Tab. 7 Chemické složení oceli 1.7147 [17]	43
Tab. 8 Chemické složení oceli 1.8504 [18]	43
Tab. 9 Chemické složení oceli 1.2510 [19]	43
Tab. 10 Tvrdost strukturních složek	45
Tab. 11 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	47
Tab. 12 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0036 při zkušebním zatížení 5 N.....	48
Tab. 13 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	49
Tab. 14 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0060 při zkušebním zatížení 5 N.....	50
Tab. 15 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	51
Tab. 16 Naměřené hodnoty pro ocel 1.0535 při zkušebním zatížení 5 N.....	52
Tab. 17 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	53
Tab. 18 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7131 při zkušebním zatížení 5 N.....	54
Tab. 19 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	55
Tab. 20 Naměřené hodnoty pro ocel 1.7147 při zkušebním zatížení 5 N.....	56
Tab. 21 Naměřené hodnoty pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	57
Tab. 22 Naměřené hodnoty pro ocel 1.8504 při zkušebním zatížení 5 N.....	58
Tab. 23 Naměřené hodnoty pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 0,5 N.....	59
Tab. 24 Naměřené hodnoty pro ocel 1.2510 při zkušebním zatížení 5 N.....	60

SEZNAM PŘÍLOH

P I – CD Disk