

# **Vliv tepelného ovlivnění při dělení materiálů na mechanické vlastnosti**

Gabriela Jakešová

---

Bakalářská práce  
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Gabriela Jakešová**  
Osobní číslo: **T18437**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Vliv tepelného ovlivnění při dělení materiálů na 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

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

**Seznam doporučené literatury:**

PTÁČEK, L a kol. Nauka o materiálu I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2

PTÁČEK, L. a kol.,: Nauka o materiálu II, Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

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 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

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

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta: Gabriela Jakešová

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce řeší problematiku vlivu tepelného ovlivnění při dělení na mechanické vlastnosti materiálu.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. V první je zařazena teoretická část, věnující se konstrukčním materiálům, převážně kovům, jejich dělení pomocí nekonvenčních metod a měření mechanických vlastností – zkoušky tvrdosti. Druhá část práce je věnována praktické části, která obsahuje naměřené hodnoty a jejich statistické vyhodnocení.

Klíčová slova: teplotní ovlivnění, tvrdost, ocel, mechanické vlastnosti, instrumentovaná zkouška tvrdosti

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the issues of the effect of thermal influence on the mechanical properties of materials.

The bachelor thesis is divided into two parts. The first part includes the theoretical part dealing with construction materials, especially metals, their division by unconventional methods and measurement of mechanical properties – hardness tests. The second part deals with the practical part, which contains the measured values and their statistical evaluation.

Keywords: temperature, hardness, steel, mechanical properties, instrumented hardness test

Poděkování:

Jako první v této bakalářské práci bych chtěla poděkovat svému vedoucímu Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za vstřícnost při konzultacích a odbornou pomoc při vypracování bakalářské práce i v nelehké situaci, která nastala. Dále děkuji také svojí rodině a blízkým, kteří mě podporovali nejen během zakončování studia.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>7</b>
<b>1 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>8</b>
1.1 KOVOVÉ MATERIÁL .....	8
1.2 SLITINY ŽELEZA .....	9
1.3 OCELI.....	11
1.3.1 legované oceli.....	12
1.3.2 nelegované oceli.....	12
1.3.3 označení oceli.....	13
<b>2 NEKONVENČNÍ METODY DĚLENÍ MATERIÁLU</b> .....	<b>14</b>
2.1 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ LASEREM .....	14
2.1.1 Princip a charakteristika laseru .....	14
2.1.2 Způsob řezání materiálu laserem .....	16
2.1.3 Výhody a nevýhody laseru.....	17
2.2 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ VODNÍM PAPSKEM .....	17
2.2.1 Princip a charakteristika vodního paprsku .....	17
2.2.2 Způsob řezání materiálu vodním paprskem .....	18
2.2.3 Výhody a nevýhody vodního paprsku.....	19
2.3 DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ PLAZMOU .....	19
2.3.1 Princip a charakteristika plazmy .....	19
2.3.2 Způsob řezání materiálu plasmou .....	20
2.3.3 Výhody a nevýhody plazmy.....	20
2.4 TEPelné OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU.....	21
<b>3 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTOSTÍ</b> .....	<b>22</b>
3.1 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	23
3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	23
3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella .....	24
3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	26
3.1.4 Instrumentovaná zkouška tvrdosti - DSI.....	27
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>33</b>
<b>4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>34</b>
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>35</b>
5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	35
5.1.1 Řezání vzorků.....	35
5.1.2 zalisování vzorků .....	36
5.1.3 leštění vzorků .....	36
5.2 FÁZE A STRUKTURNÍ SLOŽKY .....	37
5.3 ZVOLENÉ MATERIÁLY .....	37
5.3.1 Ocel 1.057 (11 483).....	37
5.3.2 Ocel 1.0070 (11 700).....	38
5.3.3 Ocel 1.5122 (13 240).....	38
5.3.4 Ocel 1.7102 (14 240).....	38
5.3.5 Ocel 1.8161 (15 261).....	38

5.3.6	Ocel 1.2379 (19 573).....	39
5.3.7	Korozivzdorná ocel 17 460 .....	39
5.4	MĚŘENÍ TVRDOSTI METODOU DSI.....	39
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....</b>	<b>41</b>
6.1	HODNOTY ZÍSKANÉ Z MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ METODOU DSI.....	41
6.1.1	Vzorek č.1: ocel 1.057 (11 483), řezáno laserem.....	42
6.1.2	Vzorek č.2: ocel 1.0070 (11 700), řezáno laserem.....	43
6.1.3	Vzorek č.3: ocel 1.5122 (13 240), řezáno laserem.....	45
6.1.4	Vzorek č.4: ocel 1.7102 (14 240), řezáno laserem.....	46
6.1.5	Vzorek č.5: ocel 1.8161 (15 261), řezáno laserem.....	48
6.1.6	Vzorek č.6: ocel 1.2379 (19 573), řezáno laserem.....	49
6.1.7	Vzorek č.7: nerezová ocel 17 460, řezáno laserem.....	51
6.1.8	Vzorek č.8: ocel 1.7102 (14 240), řezáno plazmou .....	52
6.2	GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ OCELÍ.....	54
6.2.1	Vtisková tvrdost ( $H_{IT}$ ) .....	54
6.2.2	Tvrdost podle Vickerse ( $H_{IT}$ ) .....	57
6.2.3	Vtiskový modul ( $E_{IT}$ ) .....	59
6.2.4	Maximální hloubka vtisku ( $H_{max}$ ) .....	61
6.2.5	Elastická práce ( $W_{el}$ ) .....	63
6.2.6	Plastická práce ( $W_{pl}$ ) .....	66
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>78</b>



## ÚVOD

Bakalářská práce má za cíl prozkoumat vliv technologického procesu dělení kovů nekonvenčními metodami a s ním spojené teplotní ovlivnění mechanických vlastností materiálů. V současném strojírenství se klade důraz na kvalitu výrobků a proto je nutné volit správné materiály s ohledem na funkčnost a možnost jejich dělení a následného zpracování. V případě mechanického tak i nekonvenčního dělení dochází k teplotnímu ovlivnění řezaného materiálu, a tím pádem ke změně jeho mechanických vlastností.

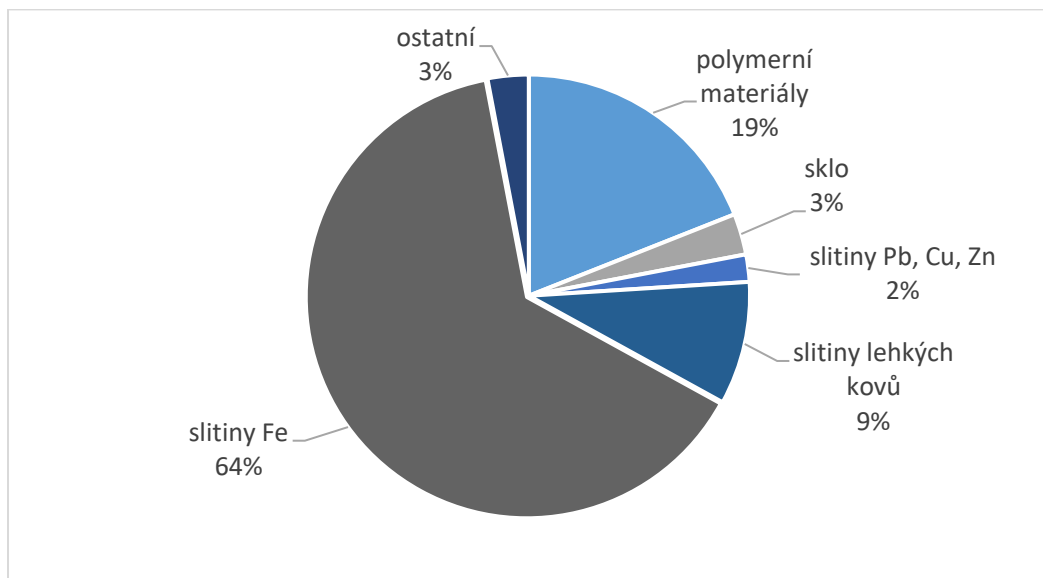
Nekonvenční metody pro odebrání materiálu nepoužívají mechanickou práci, ale jiné fyzikální principy. Nejrozšířenější je metoda využívající laserový paprsek nebo plazmu. Používají se hlavně u těžkoobrobitelných materiálů. Dostávají se do popředí díky jejich vysoké efektivitě obrábění.

Mezi jedny z nejdůležitějších a nejpožadovanějších mechanických vlastností patří vysoká tvrdost. Zkoušky tvrdosti se začali provádět v 19. století v oblasti mineralogie. Z té doby pochází první známá stupnice tvrdosti podle Friedricha Mohse. Seřadil deset minerálů na základě vrypové zkoušky. Jako nejtvrdší materiál z testu vyšel diamant, který se dodnes používá ve strojírenství k řezání, broušení materiálů či jako materiál indentorů. V dalším století vznikly metody jako je např. zkouška tvrdosti podle Brinella, Rockwella nebo Vickerse. Tyto zkoušky se stále využívají. Moderní trendy a požadavky jdou však rychle dopředu a proto bylo potřeba začít zkoušky nahrazovat vylepšenými metodami. V 70. letech 20. století byly položeny základy instrumentované metodě měření tvrdosti (DSI). Principem metody DSI je plynulý záznam okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu v závislosti na plynulém nárůstu (poklesu) zatížení v průběhu celého procesu. Propojení s počítačem usnadňuje získávání kromě tvrdosti i další mechanické vlastnosti, které napomáhají k výběru vhodných konstrukčních materiálů.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY

Pod pojmem materiály se rozumí pevné látky, které člověk využívá ke své činnosti. 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 ale také technologové, aby mohli dodržovat správný technologický proces. Materiály využívané v konstrukcích (konstrukční materiály) rozdělujeme do tří základních skupin, které se výrazně liší svými vlastnostmi a látkovou podstatou. [3,7]



Obr. 1: diagram konstrukčních materiálů [1]

## 1.1 kovové materiál

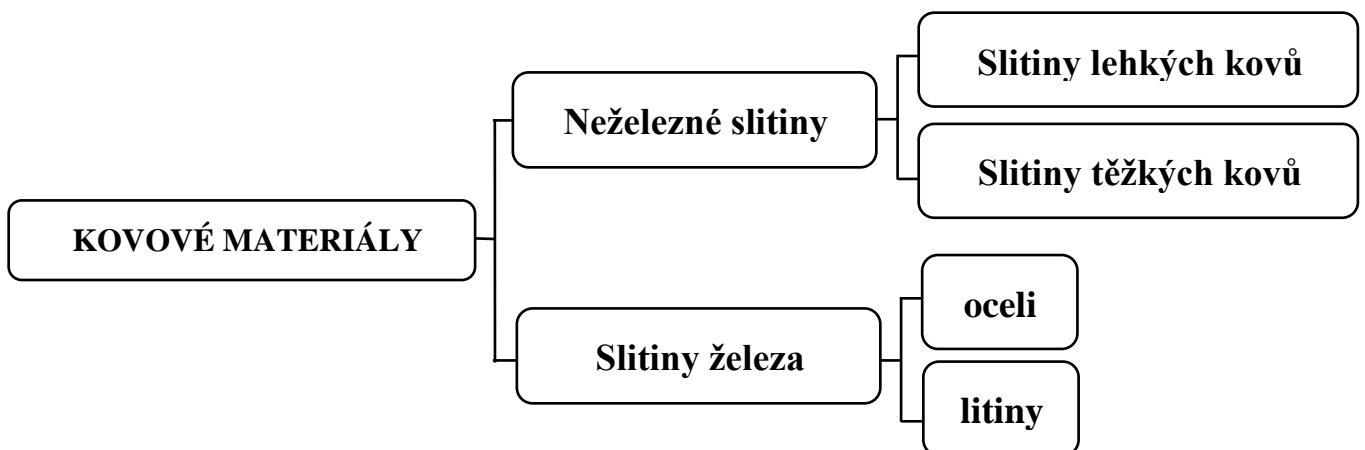
Kovové materiály jsou důležité a univerzální technické materiály. Hlavní složkou kovových materiálů je kovový prvek (Fe, Cu, Al, Au atd.). Vzhledem k tomu, že nelze vyrobit absolutně čistý kov, vždy hovoříme o slitinách více kovů. Pojem slitina znamená, že materiál vznikl společným roztavením a následným ztuhnutím (slitím) složek. Příměsi jsou považovány buď za nečistoty, nebo za legující prvky. Legující prvky jsou přidávány záměrně za účelem zlepšení zejména mechanických vlastností. [2]

Kovové materiály se využívají ve všech odvětvích lidské činnosti od stavebnictví, přes lehké strojní součásti, až po náročné konstrukce například pro letecký a kosmický průmysl. Univerzálnost kovových materiálů je dána jejich obrovskou rozmanitostí mechanických, funkčních a fyzikálních vlastností. V praxi se setkáváme s materiály, které mají velmi nízkou teplotu tání menší než 100°C, ale také naopak s velmi vysokými teplotami tání stoupající až

k 2000°C. Rozlišujeme materiály měkké a tvárné (olovo) a naproti tomu extrémně pevné (titan).

V dnešní době díky znalostem z metalurgie můžeme vyrábět kovový materiál přímo na míru podle požadavků na aplikaci. I přes široké spektrum vlastností můžeme definovat skupiny vlastností společné pro určité kovové materiály. Těmito vlastnostmi jsou: [2,3]

- Tvárnost (kujnost).** Tato vlastnost charakterizuje schopnost kovů trvalé (plastické) deformace. Je tak velice důležitá pro zpracování do požadovaných tvarů. Tvárnost je důsledkem zvláštního typu chemické vazby v kovech a z něj vyplívající krystalické struktury.
- Elektrická a tepelná vodivost.** Kovy jsou dobrými elektrickými i tepelnými vodiči. Obě vlastnosti jsou důsledkem elektronové struny kovů.
- Kovový lesk, odrazivost.** Tato vlastnost také úzce souvisí s elektronovou strukturou kovů.



Obr. 2: rozdělení kovových materiálů [7]

## 1.2 slitiny železa

Železo je kov, jehož hlavní vlastnosti jsou měkkost, tvárnost a poměrně nízká pevnost. V závislosti na teplotě se vyskytuje železo v různých krystalových modifikacích, které se s rostoucí teplotou mění následovně:

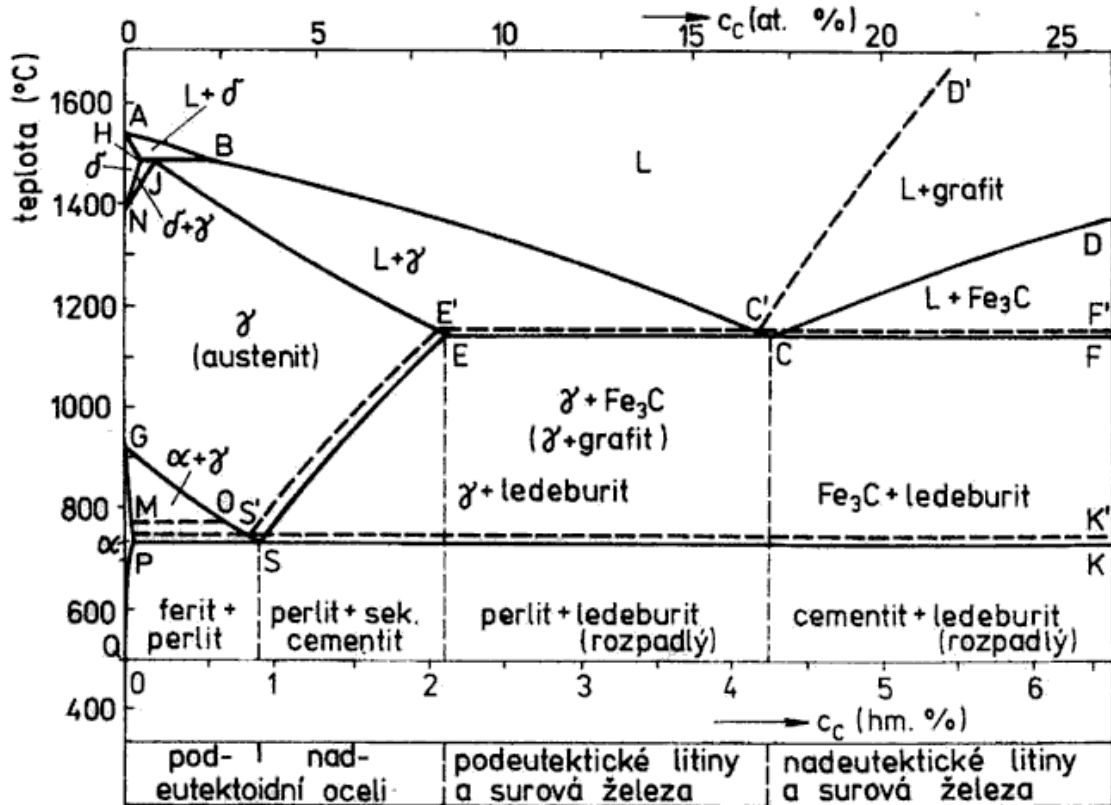
- $\alpha$  (Fe) s krystalovou mřížkou kubickou prostorově centrovanou. Tato struktura je stabilní do teploty 910°C,
- $\gamma$  (Fe) s krystalovou mřížkou kubickou plošně centrovanou. Tato struktura je stabilní v rozmezí teplot 910-1400 °C,

- $\delta$  (Fe) s krystalovou mřížkou kubickou plošně centrovanou. Tato struktura je stabilní v rozmezí teplot 1400-1539 °C.

Výroba surového železa probíhá ve vysokých pecích. V pecích dochází k redukci železných rud obsahující  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  redukcí uhlíkem a oxidem uhelnatým. Právě uhlík má dále zásadní vliv na vlastnosti materiálu. Při odhadu vlastností železných slitin můžeme vycházet z rovnovážného diagramu železo-uhlík. Tyto dva prvky tvoří tuhé roztoky s omezenou rozpustností. Po překročení této rozpustnosti se uhlík vylučuje jako samostatná fáze. Pokud je uhlík v nízkém zastoupení tvoří se sloučenina  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Prvky v této sloučenině jsou nestabilní a můžou se rozkládat na grafit (forma uhlíku) a železo. Soustava Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  je nazývána metastabilní a podle této soustavy chladnou a tuhnou hlavně oceli. Větší využití v praxi má však stabilní diagram, kde se uhlík vylučuje jako grafit. Rovnovážný diagram železo-uhlík je významný při posuzování změn při chladnutí a tuhnutí litin a surových želez. [2,3]

Fáze:

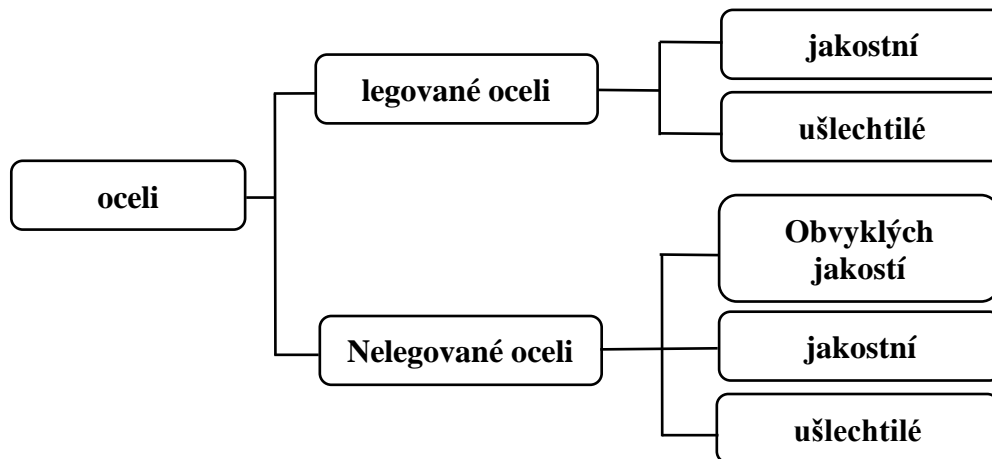
- ferit – intersticiální tuhý roztok v  $\alpha$  (Fe),
- austenit – intersticiální tuhý roztok v  $\gamma$  (Fe),
- $\delta$  (delta ferit) – intersticiální tuhý roztok v  $\delta$  (Fe),
- cementit – intersticiální chemická sloučenina železa a uhlíku  $\text{Fe}_3\text{C}$ ,
- grafit – čistý uhlík 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 krystalů austenitu a grafitu),
- eutektoid – v metastabilní soustavě se nazývá perlit a skládá se z feritu a cementitu. Morfologicky rozeznáváme perlit lamelární a zrnitý.



Obr. 3: Rovnovážný binární diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C [2]

### 1.3 oceli

Slitinu železa, uhlíku a dalších prvků označujeme jako ocel. Chemickým složením, způsobem tváření za tepla nebo tepelným zpracováním je možné měnit fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti oceli ve velkém rozsahu. Díky širokému spektru vlastností řadíme ocel mezi nejdůležitější a nejpoužívanější technické materiály a využívá se převážně k výrobě strojů, zařízení a nástrojů. Podle chemického složení a podle jakosti rozdělujeme oceli do následujících nejvýznamnějších skupin: [3, 5]



Obr. 4: základní rozdělení ocelí [2]

### 1.3.1 legované oceli

Do této skupiny ocelí se přidávají legující prvky, jejichž množství ve slitině přesahuje stanovenou mezní hodnotu. Legování se provádí za účelem zlepšit některé zejména mechanické, fyzikální vlastnosti či korozní odolnost výrobků. Podle celkového obsahu přidaných legujících prvků se dále legované oceli dělí na: [3]

- nízkolegované oceli – méně než 5 % legujícího prvku,
- středně legované oceli – 5-10 % legujícího prvku,
- vysokolegované oceli - více než 10 % legujícího prvku.

#### legované oceli jakostní

Jsou oceli se speciálními požadavky na obsah legujících prvků pro funkci v daných podmínkách. Mezi jakostní legované oceli řadíme hojně využívané konstrukční oceli pro ocelové konstrukce, tlakové nádoby a potrubí, ocel na kolejnice, výztuže atd. [7]

#### legované oceli ušlechtilé

U této skupiny ocelí je přesně stanoveno chemické složení a speciální podmínky pro výrobu. Tím dosahujeme požadovaných podmínek. Patří sem hlavně korozivzdorné a žáruvzdorné oceli, nástrojová ocel atd. [5,7]

### 1.3.2 nelegované oceli

#### nelegované oceli obvyklých jakostí

Na tyto druhy nelegovaných ocelí, nejsou kladeny vysoké požadavky na jakost a nepotřebují ani zvláštní opatření při výrobě. Nejsou však určeny pro tepelné zpracování. Oceli jsou určeny hlavně k výrobě plochých výrobků, plechů, které se zpracovávají ohýbáním za studena. [2,5]

#### nelegované oceli jakostní

Stejně jako u předchozí skupiny jde o oceli, pro které není předepsaná reakce na tepelné zpracování ani požadavky na jakost. Kladou se na ně ale přísnější požadavky na namáhání, takže výroba jakostní oceli vyžaduje větší přesnost. Ocel se využívá např. pro výrobu tlakových nádob. [2, 5]

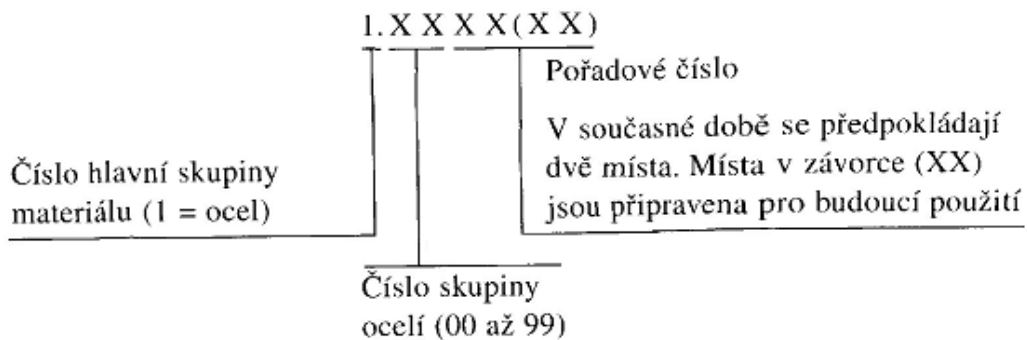
#### nelegované oceli ušlechtilé

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. [5]

### 1.3.3 označení oceli

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. [5]



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



## 2 NEKONVENČNÍ METODY DĚLENÍ MATERIÁLU

Klasické metody dělení materiálu řezáním neboli třískového obrábění se v mnoha případech nedají vůbec použít nebo nejsou příliš vhodné pro daný opracováváný materiál a součást. Hlavními nevýhodami klasického třískového obrábění je špatná kvalita obroběného povrchu, produktivita práce, nelze je použít na těžce obrobitelné materiály a u tvarově složitějších součástí mohou být problém samotné dráhy obráběcích nástrojů. Proto se z hlediska ekologického používají nekonvenční metody obrábění. Tyto metody nevyužívají k dělení materiálu mechanickou práci, ale tepelné, elektrické, ultrazvukové, chemické, abrazivní a jiné fyzikální jevy nebo jejich kombinace. Největší výhodou je, že při obrábění nedochází ke vzniku třísky. Většina technologií řadících se do skupiny nekonvenčního obrábění není limitována mechanickými vlastnostmi materiálu, váží se hlavně k fyzikálním vlastnostem. Největší vliv mají tepelná vodivost, teplota tavení, chemické složení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost apod. [4]

Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění využívaného fyzikálního principu nebo způsobu využití energie: [4]

- elektroerozivní obrábění,
- elektrochemické a chemické obrábění,
- obrábění paprskem laseru,
- obrábění paprskem plasmu,
- obrábění elektronovým paprskem,
- obrábění ultrazvukem,
- obrábění kapalinovým paprskem,
- abrazivní obrábění.

Při řezání dochází k destrukci materiálu v místě řezu. Při dělení chceme dosáhnout buď povrchu s co nejlepší kvalitou řezné plochy a v malých rozměrových tolerancích (konstrukční řezání) nebo bez ohledu na kvalitu řezu (destrukční řezání). Podle těchto požadavků se následně volí metoda obrábění. [5]

### 2.1 Dělení kovových materiálů laserem

#### 2.1.1 Princip a charakteristika laseru

Laser je zdroj elektromagnetického záření. Jeho princip využívá princip kvantové fyziky a termodynamiky. Světlo je soustředěno do úzkého svazku a fotony jsou emitovány v koherentní paprsek.

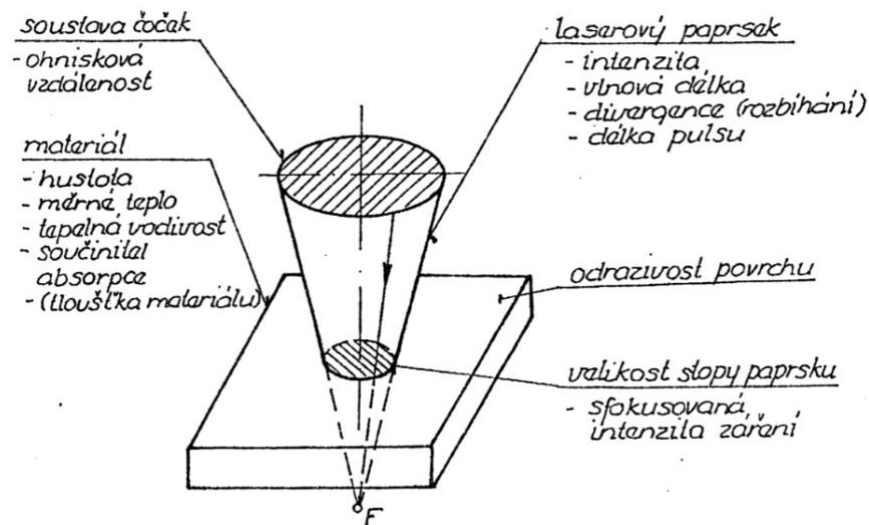
Základ řezání laserem je koncentrace energie na malé ploše obrobku. Přeměna této energie záření na energii tepelnou pak v místě dopadu zahřívá materiál na velmi vysoké teploty. Jakmile teplota přesáhne teplotu tavení materiálu dochází v místě k řezu a vypařování materiálu.

V technologické praxi se rozdělují lasery podle aktivního prostředí na:

- pevnolátkové,
- plynové,
- kapalinové,
- polovodičové.

Dnes se nejčastěji setkáme s plynovými lasery, které využívají směsi oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>), dusíku (N<sub>2</sub>) a helia (He).

Působení laseru na obráběný materiál ovlivňuje spoustu technologických a technických parametrů znázorňující obr.6: [4]

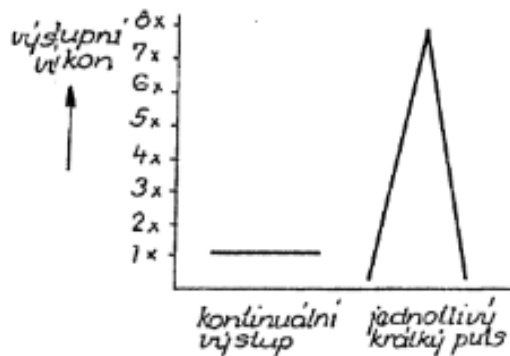


Obr. 6: technologické a technické parametry laseru [4]

Podle délky impulsu paprsku lze dále rozdělit lasery na: [11]

- kontinuální – buzení aktivního prostředí probíhá bez přerušování a tím dosáhnout konstantní energie po celou dobu,
- pulzní – opakované přerušování budícího výboje v rezonátoru generuje pulzní laserový svazek, dosahuje tak velké energie na krátký čas.

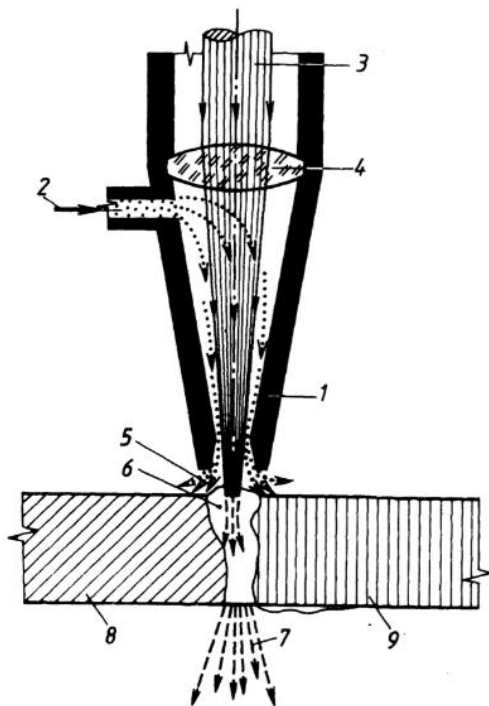
Porovnání výkonů obou typů lze vidět na obr.7:



Obr. 7: výstupní výkony režimů [4]

### 2.1.2 Způsob řezání materiálu laserem

Jak již bylo zmíněno výše princip řezání laserem spočívá ve spalování nebo protavování materiálu. Laserový paprsek je soustředěn na místo řezání tzv. ohnisko. Průměr místa dopadu se pohybuje v rozmezí 0,05 – 0,25 mm a hustota energie je větší než  $10^8 \text{ Wcm}^{-2}$  a teplota materiálu v tomto místě dosahuje až  $25\,000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Schéma řezání je na obr.8: [4]



- 1- těleso hořáku tryska
- 2- přívod kyslíku
- 3- laserový paprsek
- 4- optika
- 5- Výstup plynu
- 6- ohnisko
- 7- vyfukování roztaveného materiálu
- 8- dělený materiál
- 9- rozdělený materiál

Obr. 8: schéma řezání laserem [6]

Ohřev řezaného materiálu způsoben laserovým paprskem a následné řezání je důsledkem reakce přivedením kyslíku do místa řezu. Tato technologie je charakterizována úzkou reznou spárkou a velmi dobrou jakostí řezu, na druhou stranu má vyšší spotřebu energie na jednotku délky řezu. Při řezání protavováním je roztavený materiál z rezné 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 důvodu ochrany proti vznícení nebo opálení řezných hran. Toto řezání je charakteristické vysokou rychlostí a nízkou spotřebou energie na jednotku délky řezu. Po řezu jsou vidět malé stopy po odběru materiálu a v některých případech kapičky rozstříknutého kovu na spodní straně řezaného materiálu. [4, 6]

### 2.1.3 Výhody a nevýhody laseru

#### Výhody:

- velké řezné rychlosti,
- kvalitní řez - dobrá jakost povrchu bez nutnosti následných úprav,
- automatizace řezných drah,
- možnost řezání velkého spektra materiálů (oceli, keramika, plast, atd.),
- různé velikosti trysek umožňující tvarové řezy s malými rádiusy.

#### Nevýhody:

- drahé pořizovací náklady,
- nutnost bezpečnostních opatření při provozu,
- malá účinnost. [4,7,11]

## 2.2 Dělení kovových materiálů vodním paprskem

Pod pojmem vodní paprsek rozumíme vysokorychlostní sdružený vodní proud o malém průměru a s tlakem nad 100 MPa. Tato technologie je založena na abrazivních schopnostech vodního paprsku při obrábění materiálu. Metoda byla vyvinuta při vývoji technologií zpracovávající převážně nekovové materiály. Díky univerzálnímu uplatnění a řadě výhod nalézá uplatnění v mnoha průmyslových oborech. [4,11,12]

### 2.2.1 Princip a charakteristika vodního paprsku

Základ tvoří pístové čerpadlo, které slouží k dopravě hydraulického oleje o regulovatelném tlaku do multiplikátoru. Multiplikátor je zařízení, na kterém z přiváděného oleje závisí tlak řezné kapaliny. Pro zvýšení objemových průtoků se využívají paralelní zesilovače tlaků. Jako nejčastější řezná kapalina se používá voda. Ta prochází přes filtrační jednotku, která vodu zbavuje nečistot a následně je přiváděna do multiplikátoru, kde se dosahuje požadovaného řezného tlaku. Kapalina je v těchto podmínkách přiváděna do speciálního vysokotlakého akumulátoru, kde se vyvažují tlakové rázy. Odtud pak vychází uklidněná kapalina, která je rozvedena vysokotlakým potrubím do řezacích hlav. [12]

Kapalinový paprsek lze využít jako:

- a) Čistý kapalinový paprsek

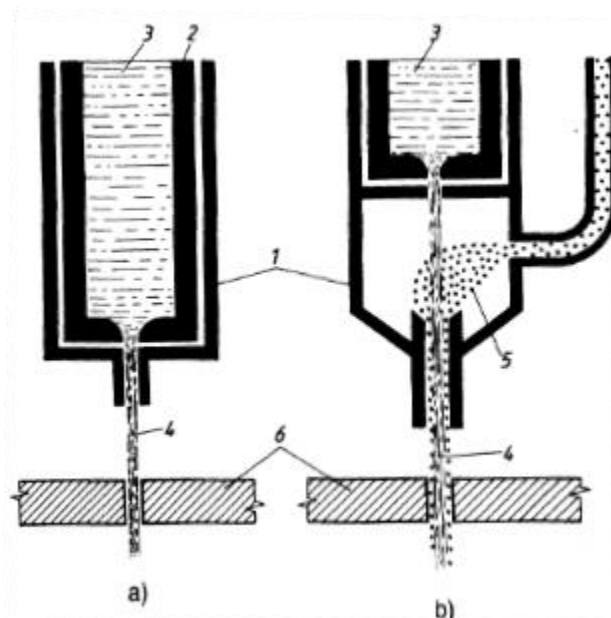
Regulace tlaku kapaliny je možná podle technologických potřeb a druhu řezaného materiálu. Vodní trysky jsou z diamantu, safíru, rubínu a jejich velikost ovlivňuje kinetickou energii vodního paprsku. Používá se k řezání materiálů tlouštěk 5 – 15 mm a pro materiály měkké a málo houževnaté.

- b) Abrazivní paprsek

Tato technologie zvyšuje účinnost řezání přidáním brusných zrn do vody. Jako abrazivní materiály se používají jak syntetické, tak přírodní materiály jako např. křemičitý písek olovín, korund apod. Aby tryska odolávala vysokým brusným účinkům musí být zhotovena ze speciálních materiálů. Tato technologie umožňuje řezat téměř všechny konstrukční materiály. [4,11]

### 2.2.2 Způsob řezání materiálu vodním paprskem

Technologie vodního paprsku probíhá tak, že se stlačená voda odvádí do řezací hlavy. Odtud je přes trysku o průměru 0,1-0,5 mm vstříkována ven na řezaný materiál. Řezná rychlost závisí na tvrdosti a soudržnosti řezaného materiálu a také na kvalitě řezu. Rychlost vodního paprsku je přibližně 1 000 ms<sup>-1</sup>.



- 1- řezací hlava
- 2- vysokotlaký válec
- 3- řezná kapalina
- 4- vodní paprsek
- 5- abrazivo (brusné částice)
- 6- dělený materiál

Obr. 9: schéma řezání vodním paprskem,  
a) vysokotlakým, b) abrazivním [6]

### 2.2.3 Výhody a nevýhody vodního paprsku

#### Výhody:

- minimální odpad,
- tenký řez,
- bezprašná technologie,
- nulové deformace v místě řezu způsobené teplem,
- univerzální metoda na všechny materiály, které jsou citlivé na teplotu.

#### Nevýhody:

- vysoké pořizovací náklady,
- náchylné na korozi. [4,6,11]

## 2.3 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. V roce 1955 nahradil řezání materiálu kyslíkovým plamenem. [11,12]

### 2.3.1 Princip a charakteristika plazmy

Plazma je vodivý stav plynu, díky volným elektronům dodaným ionizací plynu. Plazma má velmi vysoké teploty 10 000 – 30 000 °C. Vzniká za potřeby elektrického oblouku, který zahřívá plyn mezi katodou a anodou. Katodu představuje nejčastěji netavící se wolframová elektroda a anodu řezaný materiál. Dělený materiál je v místě dopadu paprsku plazmy postupně odtavován, odpařován a rozprašován.

V technické praxi se používá několik druhů hořáků, u kterých používané plyny zajišťují danou funkci : [4,11]

- **plazmové plyny** jsou přiváděny do obloukového výboje a vytvářejí ionizovaný paprsek plazmy. Např.: argon, helium, argon+ helium, dusík, oxid uhličitý,
- **fokusační plyny** zaostřují (zuzují) paprsek plazmatu při jeho výstupu z trysky hořáku. Např.: argon, argon+ helium, dusík, argon+ dusík,
- **ochranné plyny** obklopují paprsek a oblast tavení materiálu a chrání před účinky atmosféry. Např.: argon, argon+ helium.

Mezi základní typy hořáků dle stabilizačního média patří: [4]

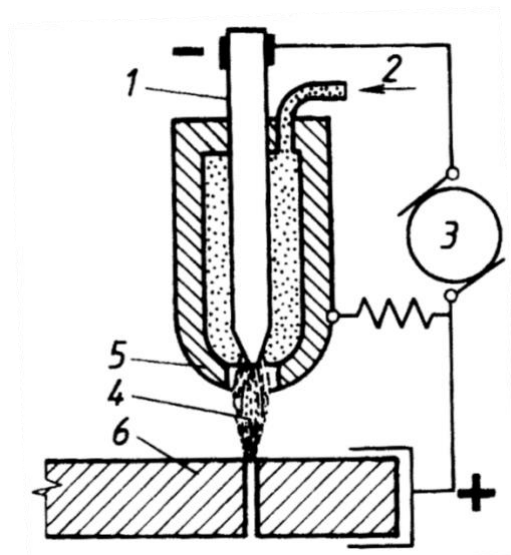
- **hořák s transferovým obloukem (PAM)**, kde je anoda tvořená obrobkem a katoda vnitřní elektroda,
- **hořák s netransferovým obloukem (PBM)**, ve kterém tvoří anodu výstupní tryska hořáku a katodu vnitřní elektroda.

Tyto dva typy se používají hlavně pro řezání ušlechtilých ocelí a neželezných kovů.

- **hořák se vstřikováním vody**, která se vstřikuje do plasmového paprsku a tím se zvyšuje trvanlivost trysky. Jelikož se ve většině případů řez provádí pod hladinou vody, dochází ke snížení hlučnosti a prašnosti. Tento hořák se používá pro řezání konstrukčních i vysoce legovaných ocelí, hliníku, titanu a mědi.

### 2.3.2 Způsob řezání materiálu plasmou

Elektrický oblouk vznikající mezi elektrodou a řezací tryskou společně s přiváděným řezacím plynem (argon, dusík, helium a různé plyny a směsi plynů) vytváří plazmu a pohyb k materiálu je urychlován elektrickým polem. V ohnisku dopadu paprsku plazmatu na materiál dojde k jeho tavení a okamžitému odpařování.



- 1- wolframová elektroda
- 2- plyn
- 3- zdroj proudu
- 4- plazma
- 5- měděná elektroda (tryska)
- 6- řezný materiál

Obr. 10: schéma řezání plasmou [6]

### 2.3.3 Výhody a nevýhody plazmy

#### Výhody:

- možnost řezání všech kovových materiálů,
- vysoké řezné rychlosti,

- kvalita řezu,
- řezání materiálu velkých tlouštěk.

**Nevýhody:**

- vznik velkého množství emisí,
- vyšší pořizovací náklady,
- velký hluk při provozu,
- nutnost bezpečnostních opatření. [4,11]

**2.4 tepelné ovlivnění materiálu**

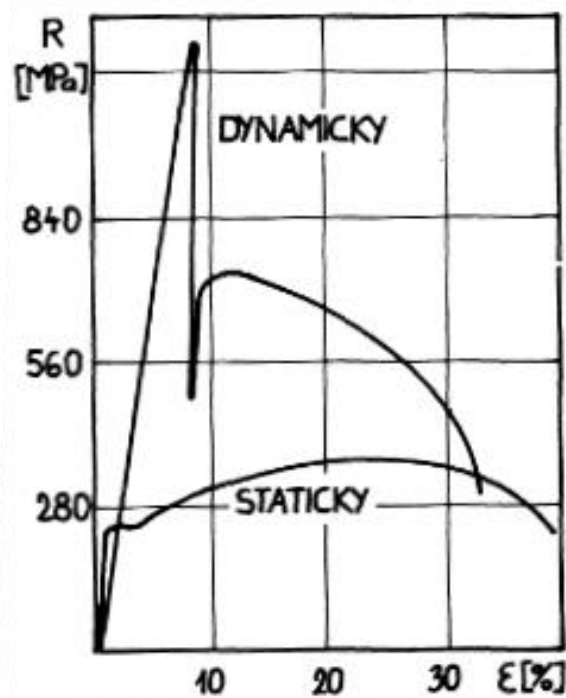
Při dělení materiálů vzniká třením tepelná energie a ta je spojena s tepelně-deformačním cyklem jako například při svařování. Díky tomu mohou vznikat v místě řezu vady materiálu. Lze předpokládat hlavně vznik trhlin, zakalení, vyžhání, rekrytalizaci nebo ztrátu vlastností jako je korozní odolnost. Tyto vady jsou způsobené velkým rozdílem teplot mezi materiálem a okolním prostředím. Udělení materiálu nekonvenčními způsoby, například plasmou, se teplota pohybuje až nad 10 000 °C, kdežto teplota okolí pouhých 20°C. Následně při ochlazování kritickou rychlostí tak dochází k tepelnému ovlivnění děleného materiálu. Abychom se vyvarovali těmto problémům je nutné předepsat určitý teplotní režim a materiál je potřeba posuzovat odděleně. [12]



### 3 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTOSTÍ

Výběr materiálu pro výrobu různých součástí a stavbu konstrukcí a zařízení je založen na znalosti mechanických, technologických, fyzikálních i chemických vlastností materiálu. První krok pro výběr materiálu je rozbor vlastností, které jsou nejdůležitější pro daný účel. Pokud známe tyto vlastnosti pak můžeme vybrat správný materiál. Při rozhodování bereme ohled na pevnost, tvárnost, zatíženost v aplikaci, teplotu prostředí ve kterém součást bude používána. Pro přesný výběr správného materiálu je potřeba tyto klíčové vlastnosti vyjádřit číselně. Takto zapsané vlastnosti pak označujeme jako materiálové charakteristiky, které nám kvantifikují určitou vlastnost, která se určuje experimentálně. [1]

Mechanické vlastnosti, které vyjadřují deformační chování materiálu a podmínky porušení vzorků za působení vnějších sil, zjišťujeme pomocí mechanických zkoušek. Díky těmto zkouškám získáváme nejdůležitější hodnoty pro klasifikaci materiálu. Mezi hlavní destrukční zkoušky patří zkouška tahem, tlakem, ohybem, kroucením a rázem. Tyto zkoušky jsou odvozeny od nejčastějších druhů namáhání součástí v technologických zařízeních. Abychom dostali přesnější hodnoty provádějí se zkoušky až do porušení materiálu. Z tohoto důvodu se provádějí na speciálních zkušebních vzorcích (zkušebních tělísek). Mechanické zkoušky rozdělujeme nejčastěji na zkoušky statické (zkušební síla narůstá pomalu nebo je stálá) a zkoušky dynamické (zkušební síla je proměnná v čase nebo působí rázem). [12]



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

### 3.1 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot jako odpor kladený materiálem proti vnikání cizímu tělesu je zejména u kovů velmi důležitou vlastností. I z tohoto důvodu lze zjistit rychle, levně a na předmětech všech rozměrů. Z tvrdosti se dále dají určit i další vlastnosti materiálu jako pevnost v tahu, obrobitelnost apod. Lze zkoušet jak na zkušebních vzorcích tak i na hotových součástech.

Na základě definice tvrdosti se posuzuje právě velikost vtisku zkušebního tělesa nebo nárazová energie. Výsledná hodnota je ovlivněna způsobem provádění zkoušky. Proto je nutno výsledky porovnávat na základě empirických vztahů. [1,5]

Podle použitého principu dělíme metody na:

- vrypové,
- odrazové,
- vtiskové.

Zkoušky můžeme také rozdělit podle druhu použité síly:

- statické,
- dynamické.

#### 3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

(ČSN EN ISO 6507-1)

Zkoušku podle Vickerse řadíme mezi statické zkoušky a provádí se vtlačováním zkušebního tělesa tzv. indenturu. Ten má podobu čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° a nejčastěji je vyroben z diamantu. Na indentor působí zkušební síla  $F$  obvykle volena od 98 N do 980 N. doba zatěžování se pohybuje od 10 do 15 sekund. Po vyjmutí indentoru se hodnotí rozměry úhlopříčky základny vytvořeného jehlanového vtisku ve zkoušeném materiálu. Do finálního vzorce se pak dosazuje aritmetický průměr obou úhlopříček.

Výsledná tvrdost je poměr zatěžovací síly  $F$  [N] a velikosti plochy vtisku  $A$  [mm<sup>2</sup>].

Tvrdot podle Vickerse se označuje HV a je definována vzorcem (1):

$$HV = \frac{F}{A} = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

kde:  $F$  je zkušební zatěžovací síla v N

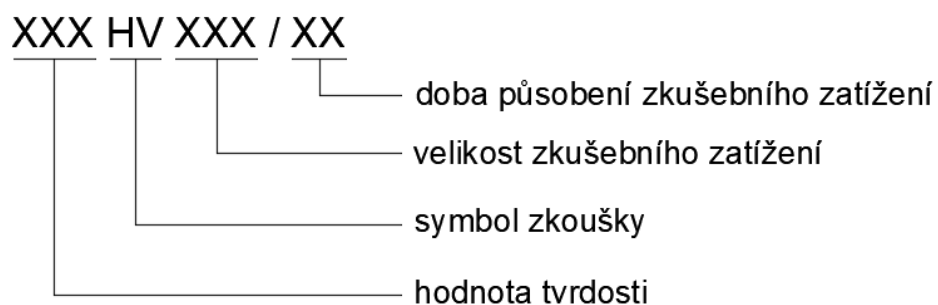
$A$  je plocha vtisku v mm<sup>2</sup>

$d$  je právě aritmetický průměr úhlopříček v mm (viz obr.15)

Vickersova metoda je velmi přesná a je hojně používaná pro laboratorní účely. Výhodou této zkoušky je její univerzálnost. Může se použít jak pro měkké a tak i tvrdé materiály a pro všechny má stejnou stupnici. Obrovskou nevýhodou pak přináší vysoké nároky a následná příprava zkoušeného povrchu. Je potřeba zamezit chvění a rázy na tvrdoměr. Metoda není vhodná pro hrubozrnné a heterogenní struktury materiálu, jelikož vtisk má velké rozměry a mohl by vzniknout právě na zrnu některé fáze a ovlivnit tak výsledky, které by neodpovídali celkové (průměrné) tvrdosti součásti. Obdobně používá i zkouška podle Vickerse pro měření mikrostruktury, kde je zatížení znatelně menší.

Tabulka 1.: Typy zkoušek a rozsahy použití podle Vickerse [5]

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	0,2 až HV 5	$1,961 \leq F < 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$HV 0,01 < HV 0,2$	$0,09807 \leq F < 1,961$



Obr. 12: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [5]

### 3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

(ČSN EN ISO 6505-1)

Zkouška podle Brinella se zařazuje stejně jako předchozí zkouška a taktéž i probíhá obdobně. Do zkoušeného materiálu se vtlačuje zkušební silou  $F$  tentokrát ocelová kalená nebo tvrdokovová kulička o různých průměrech  $D$  (1; 2,5; 5; 10 mm) po dobu 10-15 sekund.

Po odstranění indentoru se mohou vyhodnocovat dva rozměry. Buď hloubka vtisku  $h$  nebo jeho průměr  $d$ .

Výsledná tvrdost je poměr zatěžovací síly  $F$  [N] a velikosti plochy vtisku  $A$  [mm<sup>2</sup>], což představuje plocha kulového vrchlíku o průměru  $D$ .

Tvrdost podle Brinella se označuje BR a je definována vzorcem (2):

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

kde:  $F$  je zkušební zatěžovací síla v N

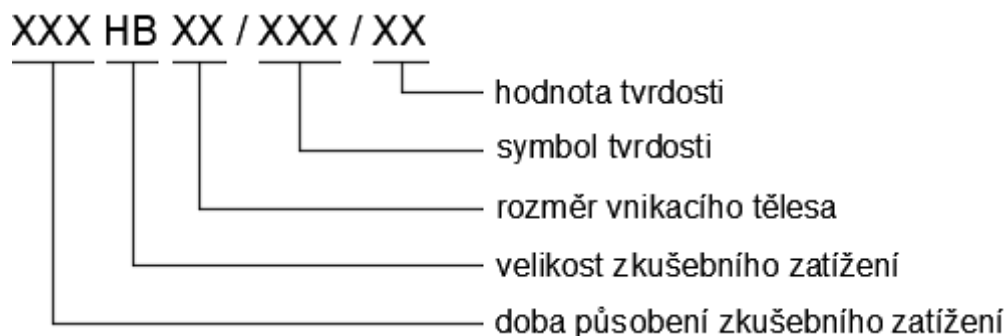
$A$  je plocha vtisku v mm<sup>2</sup>

$D$  je průměr indentoru v mm

$d$  je aritmetický průměr vtisku kuličky v mm (viz obr.)

V praxi se hodnoty odečítají z tabulek nebo jsou vyhodnoceny počítačem připojeným k tvrdoměru.

Zkoušený povrch musí být rovný a dostatečně hladký. Aby měření nebylo ovlivněno tvrdostí podložky, nesmí být tloušťka zkoušeného tělesa menší než desetinásobek výsledného vtisku indentoru. Metoda je vhodná pro heterogenní materiály s nižší až střední tvrdostí. Tvrdost podle Brinella se značí čísla a písmeny např. 185 HB 5/750/20 a to podle obecného schématu pro označení které je na obrázku:



Obr. 13: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [5]

### 3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

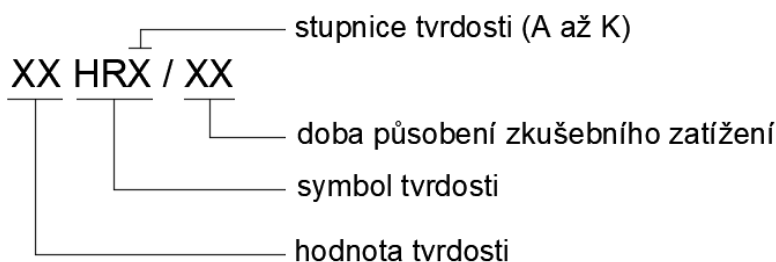
(ČSN EN ISO 6508)

Rockwellovu zkoušku řadíme mezi vtiskové, statické zkoušky. Tato metoda se skládá ze čtyř kroků. Jako indentor se používá buď malá kulička nebo diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. To jak bude indentor vypadat a také sílu, kterou na něj budeme působit, volíme podle tvrdosti materiálu. Zvolené zkušební těleso se nejdřív pod předběžnou silou vtlačí do vzorku a na této úrovni se vynuluje měřící zařízení. Dále se zatěžující síla zvedne o hodnotu přídavného zatížení. V materiálu vzniká jak trvalá tak i pružná deformace, díky které se po odlehčení přídavné síly indentor vrátí do nové polohy. Rockwellovo číslo se pak odečítá jako rozdíl hloubek vtisku přímo na stupnici hloubkoměru, který bývá součástí tvrdoměru.

Tabulka 2.: Stupnice tvrdosti podle Rockwella [5]

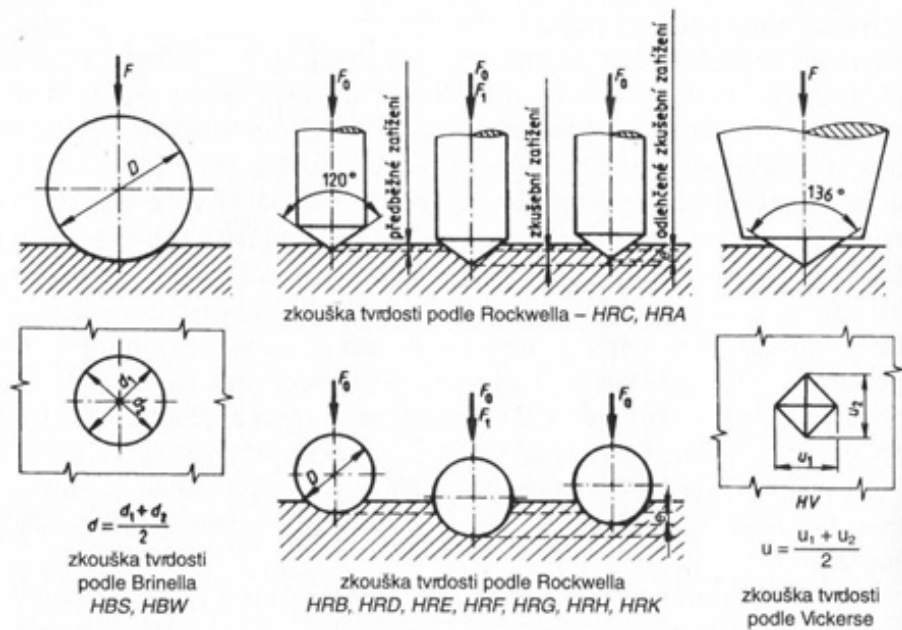
Stupnice tvrdosti	Značení	Typ indentoru	Předběžné zatížení $F_0$ [N]	Přídavné zatížení $F_1$ [N]	Celkové zatížení $F$ [N]	Oblast využití
A	HRA	Diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 až 88
B	HRB	Kulička 1,5875 mm	98,07	882,6	980,7	20 až 100
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	20 až 70
D	HRD	Diamantový 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 čísla jako např. 60 HRB, a to podle obecného schématu pro značení.



Obr. 14: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwella [5]

Měření je rychlé a na rozdíl od předchozích metod nenáročný na úpravu zkoušeného povrchu právě díky prvnímu kroku zkoušky.



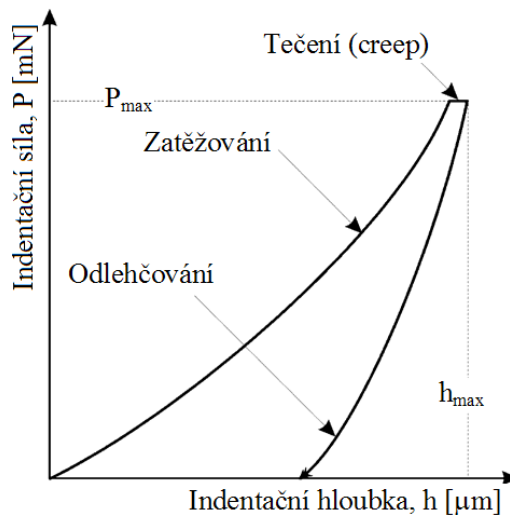
Obr. 15: zkoušky tvrdosti [5]

### 3.1.4 Instrumentovaná zkouška tvrdosti - DSI

Oproti výše zmíněným zkouškám je metoda DSI (Deep sensing indentation) novější. Její český ekvivalent je instrumentovaná zkouška tvrdosti. Tato metoda vznikla hlavně kvůli možnosti měření mechanických vlastností velmi tenkých a elastických vrstev. Jejími autory jsou Bulichev a Alekin, kteří se touto problematikou zabývali v sedmdesátých letech dvacátého století. Na počátku osmdesátých let provedli následné finální vylepšení zkoušky Oliver a Pharr.

Principem metody je okamžité zaznamenávání hloubky vtisku indentoru do zkušebnímu tělesu v závislosti na nárůstu nebo poklesu zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího cyklu. Následným zpracováním dat vzniká charakteristická indentační křivka.

Metoda DSI umožňuje zkoumat creep (tečení) tak, že se mezi fázi zatěžování a odlehčování vkládá prodleva, při které je zkušební těleso zatíženo maximální zatěžovací silou.



Obr. 16: Indentační křivka [8]

Pro DSI jsou stanoveny tři rozsahy tvrdosti:

- Makro rozsah:  $2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$
- Mikro rozsah:  $2 \text{ N} > F$ ,  $h > 0,2 \text{ μm}$
- Nano rozsah:  $h \leq 0,2 \text{ μm}$  [9]

Pro stanovení správných mechanických vlastností se musí použít indentor z tvrdšího materiálu, než je zkoušený materiál. Lze použít následující tvary a materiály:

- diamantové vnikací těleso tvaru čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou (jehlan podle Vickerse),
- diamantový jehlan s trojúhelníkovou základnou (jehlan podle Berkoviche),
- tvrdokovová kulička (zejména pro stanovení elastického chování materiálů),
- diamantové kuželové vnikací těleso se sférickým vrcholem. [9]

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. [9]

### Stanovení tvrdosti podle Martense

Pokud jsou k dispozici data z indentační křivky (zatížení/hloubka vtisku), je možné stanovit tvrdost podle Martense, která definuje průběh stanoveného zkušebního zatížení. Tvrdost je stanovena jako podíl zkušebního zatížení  $F$  a plochy povrchu indentoru  $A_s$ . tvrdost je

vyjádřena v MPa podle vzorce (3): [10]

$$MH = \frac{F}{A_s} \quad (3)$$

kde:  $F$  je zkušební síla v N

$A$  je plocha vtisku indentoru v mm<sup>2</sup>

Plochy povrchů  $A_s$  u vnikacích těles udávají rovnice: [10]

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

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

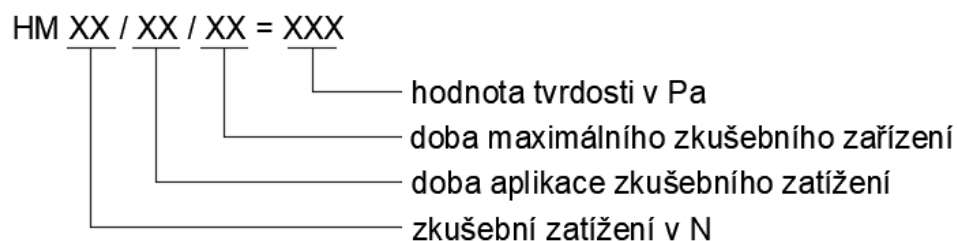
b) Vnikací těleso podle Berkoviche ( $\alpha = 65,03^\circ$ )

$$A_s = \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot \tan \alpha}{\cos \alpha} \cdot h^2 \quad (5)$$

Tvrдость podle Martense je určena pouze pro vnikající tělesa tvaru jehlanu podle Vickerse a Berkoviche. Není definovaná pro tělesa podle Knoopu nebo pro kulová vnikací tělesa.

Díky tomu, že tvrдость podle Martense zahrnuje plastickou i elastickou deformaci je možné stanovit ji pro všechny materiály. [10]

Tvrдость se označuje písmeny a čísly jako např. HM 0,5 / 20 / 20 = 8,700 GPa, a to podle obecného schématu pro značení. [10]



Obr. 16: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Martense [10]



### 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 (6): [9]

$$F_t = \frac{2}{\pi} \cdot E^* \cdot h_e^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha' \quad (16)$$

Kde:  $F_t$  je maximální působící síla v N

$E$  je kombinovaný elastický modul v Pa

$h_e$  je hloubka po odlehčení v mm

$\alpha$  je úhel indentoru ve °

Pokud rovnici (7) derivujeme dostaneme vztah určující sklon tangenty (7):

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

Po úpravě a následném dosazení do rovnice získáváme vztah na určená kontaktní hloubky (8):

$$h_p = h_t - \varepsilon \cdot \frac{F_t}{\frac{dF}{dh}} \quad (8)$$

Kde:  $F_t$  je maximální působící síla

$\varepsilon$  je geometrická směrnice, která závisí na geometrii indentoru

$h_p$  je kontaktní hloubka v mm

$h_t$  je hloubka při maximálním zatížení v mm

### Vtisková tvrdost

Vtisková tvrdost  $H_{IT}$  představuje míru rezistence k trvalé deformaci či poškození. Obecně je definována jako maximální zatěžující síla  $P_{max}$  podělená průmětem kontaktní plochy vnikajícího tělesa  $A_p$ . [8]

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (9)$$

### Modul pružnosti

Z indentační křivky metody DSI, lze dále určit vtiskový neboli indentační modul  $E_{IT}$ . V ideálním případě vtiskový modul odpovídá významově elastickému (Youngův) modulu. Pro vtiskový modul platí vzorec: [8]

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (10)$$

kde:  $\nu_s$  je Poissonův poměr zkušebního tělesa (pro kovové materiály 0,2- 0,4, pro polymerní materiály 0,3- 0,4)

$E^*$  je komplexní modul

Komplexní modul  $E^*$  je určen jako: [8]

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (11)$$

kde:  $E_i$  je modul vnikajícího těles

$E_r$  je redukovaný modul vtiskového kontaktu

$\nu_i$  je Poissonův poměr vnikajícího tělesa

Redukovaný modul  $E_r$  pak určuje následující rovnice: [8]

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \cdot \sqrt{A_p}} \quad (12)$$

kde:  $C$  je kontaktní poddajnost

$A_p$  je průmět kontaktní plochy

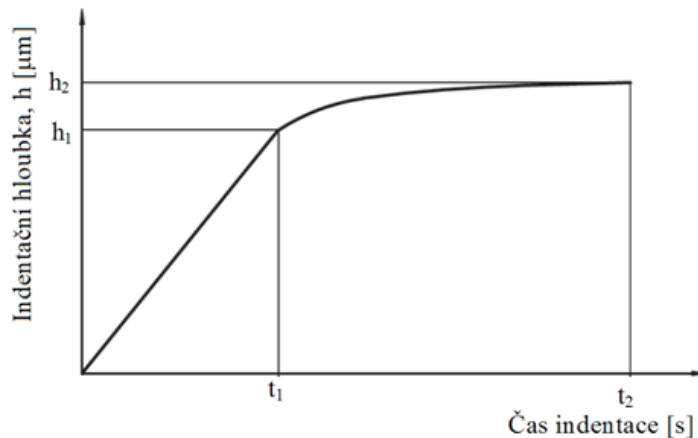
### Vtiskové tečení

Hodnota tečení materiálu (creep) se určí za pomoci měřené změny hloubky vtisku která se měří za konstantního zatížení a z ní vypočítané relativní hloubky vtisku. Vtiskové tečení  $C_{IT}$  je určeno ze vztahu: [8]

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (13)$$

Kde:  $h_1$  je houbka vtisku v čase  $t_1$ , kdy je dosaženo zkušebního zatížení

$h_2$  je hloubka vtisku v čase  $t_2$ , při výdrži na dosaženém maximálním zkušebním zatížení (obr.18) [8, 13]



Obr. 17: znázornění vtiskového tečení [8]

### Vtisková relaxace

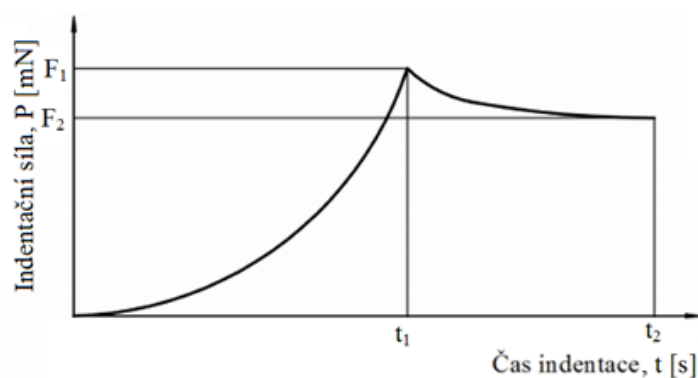
Pokud je naměřena změna zkušebního zatížení při konstantní hloubce vtisku, pak lze určit hodnotu relaxace  $R_{IT}$  neboli relativní změna zkušebního zatížení. [8]

$$R_{IT} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (14)$$

kde:  $P_1$  je ztížení po dosažené hloubky vtisku, udržované na konstantní úrovni

$P_2$  je zatížení po čase, kdy byla hloubka vtisku udržována konstantní

Průběh vtiskové relaxace je znázorněn v grafu (obr.19): [8]



Obr. 18: vtisková relaxace [8]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tato bakalářská práce má za cíl ověřit jaký vliv má teplotní ovlivnění při dělení materiálu plazmou a laserem na výsledné mechanické vlastnosti v řezaném místě. Ke zkoumání vlivu je volena instrumentována zkouška tvrdosti (DSI).

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 byly řezány vzorky pomocí laseru na zařízení od firmy TRUMPF s výkonem 1837 W a rychlostí posuvu 2090 mm/min. Takto nařezané vzorky byly poté zalisovány a vyleštěny z důvodu dosažení co nejpřesnějších výsledků měření tvrdosti. Teplotní ovlivnění bylo zjišťováno pomocí mikrotvrdoměru, který nám umožňuje provést instrumentovanou zkoušku tvrdosti (DSI).

### 5.1 Příprava vzorků

#### 5.1.1 Řezání vzorků

Řezání všech vzorků bylo provedeno na přesné automatické pile BUEHLER IsoMet 4000. Příprava vzorků proběhla podle následujících parametrů řezání :

- typ řezného kotouče - Diamantový řezný kotouč IsoMet 30 HC,
- rozměry řezného kotouče - 178 mm x 0,76 mm,
- otáčky řezného kotouče - 1800 ot/min,
- posuv - 16 mm/min.

Vzorky byly připraveny na rozměry 25 x 10 mm a tloušťku 6 mm.



Obr. 19: Přesná automatická pila BUEHLER IsoMet 4000

### 5.1.2 zalisování vzorků

Před samotným měřením je potřeba všechny nařezané vzorky zalisovat a poté i zaleštit. Zalisování se provádí kvůli možnosti upnutí vzorků do metalografické leštičky. Zkušební vzorky byly zalisovány do materiálu EpoMet G Molding Compound 20-3380-064, od firmy Buehler.



Obr. 20: Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000

### 5.1.3 leštění vzorků

Posledním krokem před měřením je leštění vzorků, které provádíme k získání co nejpřesnějších výsledků. Pokud máme vzorky správně zalisované dají se upnout do metalografické leštičky a proces leštění může být bez problému realizován. Leštění proběhlo na leštícím stroji Eco-Met 250 PRO Grinder – Polisher od firmy Buehler. Vzorky byly leštěny v několika krocích, nejprve pomocí brousících kotoučů s různými zrnitostmi (250, 600, 1200) a následné doleštění vzorku bylo pomocí textilního plátna a diamantové suspenze (9 $\mu$ m a 3 $\mu$ m). Proces leštění probíhal za přítlačné síly 25 N, otáček vzorků 30 ot/min a otáček plátna 300 ot/min.



Obr. 21: Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO

## 5.2 Fáze a strukturní složky

Měření mikrotvrdomosti lze velmi efektivně využít při zjišťování strukturních složek. Lze při tomto využít poznatku, že každá strukturní složka odpovídá nějaké hodnotě tvrdosti dle Vickerse, která byla zjištěna předchozími měřeními. Podrobný přehled strukturních složek a jejich tvrdostí vycházející z diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C je uveden v tabulce níže. Vzhledem k testovaným ocelím nás bude zajímat především oblast Austenitu, Perlitu a Bainitu.

Tabulka 3.: Tvrdomost strukturních složek

Strukturní složky	Tvrdomost 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

## 5.3 Zvolené materiály

Na experimentální část bylo vybráno 7 materiálů z oblasti legovaných i nelegovaných ocelí. Bylo pozorováno rozdílné chování mechanických vlastností vlivem teplotního ovlivnění v místě řezu.

### 5.3.1 Ocel 1.057 (11 483)

Ocel 1.057 je nelegovaná, patří mezi oceli obvyklé jakosti se zaručenou svařitelností. Tato ocel má zvýšenou mez kluzu. Nejčastěji se využívá na svařované konstrukce a tlakové nádoby. [14]

Tabulka 4.: Chemické složení oceli 1.057 [14]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Ti [%]	P [%]	S [%]
max 0,20	max 1,40	max 0,55	max 0,30	max 0,30	max 0,30	max 0,20	max 0,045	max 0,045



### 5.3.2 Ocel 1.0070 (11 700)

Ocel 1.0070 patří mezi oceli konstrukční nelegované oceli obvyklé jakosti. Má obsah C nad 0.4%. využití má na strojní součásti, u nichž se nevyžaduje svařitelnost, s větší odolností proti namáhání a odolností proti opotřebení. Vyrábějí se z ní náročnější strojní součásti. [15]

Tabulka 5.: Chemické složení oceli 1.057 [15]

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

### 5.3.3 Ocel 1.5122 (13 240)

Ocel 1.5122 se řadí mezi legované konstrukční oceli k zušlechťování. Ocel je dobře tvárná a dobře obrobitelná. Je náchylná na popouštěcí křehkost. Používá se na středně namáhané strojní součásti. [16]

Tabulka 6.: Chemické složení oceli 1.5122 [16]

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,33-0,41	1,1-1,4	1,1-1,4	max. 0,035	max. 0,035

### 5.3.4 Ocel 1.7102 (14 240)

Ocel 1.7102 patří do skupiny ocelí k zušlechťování. Ocel je dobře tvárná a dobře obrobitelná. Používá se na středně namáhané strojní součásti, např. zalomené hřídele řetězových kol, ojnice, čepy, nápravy kolejových a jiných vozidel, šrouby apod.[17]

Tabulka 7.: Chemické složení oceli 1.7102 [17]

C [%]	Cr [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,32-0,4	0,2-0,4	1,5-1,9	0,17-0,37	max. 0,035	max. 0,035

### 5.3.5 Ocel 1.8161 (15 261)

Konstrukční ocel k zušlechťování 1.8161 je dobře tvárná za studena a ve stavu žíhaném na měkko dobře obrobitelná. V zušlechťovaném stavu se používá na velmi namáhané strojní součásti části strojů a letadel, např. klikové hřídele leteckých motorů, náročná ozub. kola aj. [18]

Tabulka 8.: Chemické složení oceli 1.8161 [18]

C [%]	Cr [%]	Mn [%]	V [%]	Si [%]	P [%]	S [%]
0,6	0,9-1,2	0,8-1,1	0,1-0,2	0,17-0,37	max. 0,035	max. 0,035

### 5.3.6 Ocel 1.2379 (19 573)

Ocel 1.2379 je ušlechtilá, vysoce legovaná i chróm-molybdenová nástrojová ocel. Disponuje těmito vlastnostmi: vysoká odolnost proti otěru, dobrá prokalitelnost, vyšší korozní odolnost. Má zhoršenou obrobiteľnosť díky vyšším hodnotám chromu a uhlíku. Využívá se na střížné a lisovací nástroje, razníky, průmyslové nože na zpracování dřeva. [19]

Tabulka 9.: Chemické složení oceli 1.2379 [19]

C [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
1,4-1,6	11-12,5	0,6-0,95	0,8-1,2	0,2-0,45	0,2-0,45	max. 0,03	max. 0,035

### 5.3.7 Korozivzdorná ocel 17 460

Ocel 17 460 patří do skupiny ušlechtilých konstrukčních ocelí se speciálními vlastnostmi. Ocel je korozivzdorná, nemagnetická se zaručitelnou svařitelností. Má dobrou tvárnost, ale obrobiteľnosť ztíženou. Využívá se na nádoby, přístroje, přístroje, zařízení pro potravinářský průmysl, pro fyzikální přístroje. [20]

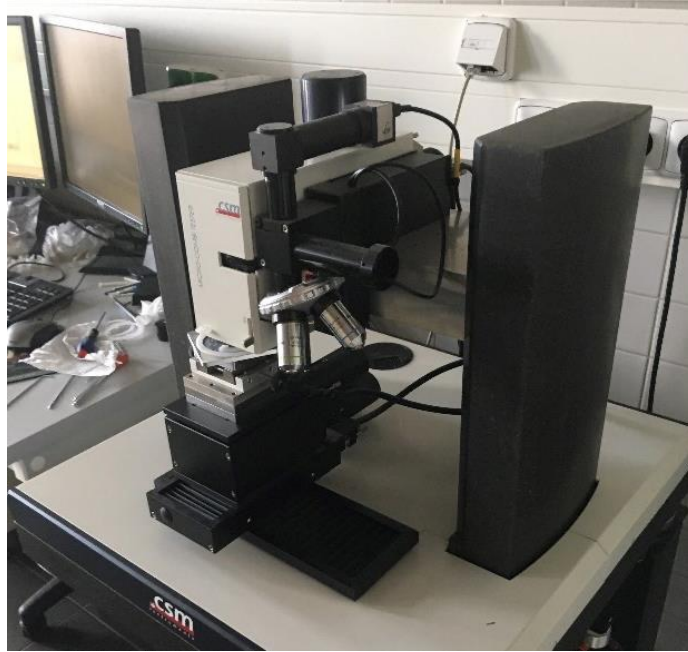
Tabulka 10.: Chemické složení oceli 1.2379 [20]

C [%]	Cr [%]	Mn [%]	Ni [%]	Si [%]	N [%]	P [%]	S [%]
max. 0,12	17-20	7-10	4-6	max. 0,9	0,1-0,25	max. 0,06	max. 0,035

## 5.4 Měření tvrdosti metodou DSI

Měření Instrumentované zkoušky tvrdosti bylo provedeno na přístroji MicroCombi Tester (MHT<sub>3</sub>) od firmy Anton-Paar dle normy ČSN EN ISO 14577 a byly pro ni zvoleny následné parametry:

- aplikované zatížení - 0,5 N a 5 N,
- výdrž na maximálním zatížení - 12 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost - 1 N/min (pro 0,5N) a 10 N/min (pro 5N),
- Poissonovo číslo - 0,3.



*Obr. 22: Měřicí přístroj MicroCombi Tester (MHT<sub>3</sub>)  
od firmy Anton-Paar*

Jako vnikací tělísko (indentor) byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  (Vickersův indentor). Měření byla provedena metodou DSI a vyhodnocení mikromechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.

Každý vzorek byl upevněn na X-Y stolek mikrotvrdoměru tak, aby byl hrot indentoru přímo na okraji zkušební vzorku, to znamená do jeho do místa řezu. Zatěžovací doba byla 12 sekund a byla konstantní pro všechna měření. Dráha měření tvrdosti byla nastavena na 25 vpichů ve vzdálenostech  $100\ \mu\text{m}$  od sebe, až do vzdálenosti 2,5 mm od okraje. Tímto způsobem byly zjištěny vlastnosti povrchové vrstvy tělesa až do vzdálenosti 2,5 mm od místa řezu, které je ovlivněné tepelným působením laseru a plazmy. Z výsledků se dá pozorovat jak se mění chování a struktura vlivem teplotního ovlivnění při dělení materiálu.

## 6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

### 6.1 Hodnoty získané z měření zkušebních vzorků metodou DSI

Hodnoty potřebné k vyhodnocení teplotního vlivu byly získány z instrumentované zkoušky tvrdosti (DSI). Zkouška byla provede při zatížení 0,5 N a 5 N. Z obou variant byly získány tyto parametry:

- číslo vpichu ( $N$ ),
- 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 Vzorek č.1: ocel 1.057 (11 483), řezáno laserem

Na vzorku č.1 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty , se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.057 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	2741,94	258,801	225,317	2781,662	55825,023	479770,125
2	0,2	2613,433	246,671	217,819	2857,66	57349,754	487437,25
3	0,3	2528,589	238,663	206,791	2902,577	48226,484	508756
4	0,4	2478,489	233,934	204,077	2935,198	48674,727	512331,031
5	0,5	2405,37	227,033	205,89	2988,586	46737,367	514308
6	0,6	2318,648	218,848	201,123	3048,901	47516,469	519852
7	0,7	2244,652	211,864	217,451	3069,681	48136,168	509267,594
8	0,8	2224,796	209,989	188,143	3136,168	48784,254	514299,813
9	0,9	2260,046	213,317	201,73	3085,137	49780,273	512757,313
10	1,0	2277,549	214,969	202,781	3071,98	49593,031	511446,156
11	1,1	2012,815	189,981	171,549	3310,459	53266,668	548641,375
12	1,2	2058,426	194,286	253,907	3192,844	49528,102	575917,313
13	1,3	1954,822	184,508	189,907	3304,59	46544,207	548911,688
14	1,4	1960,838	185,075	196,746	3295,001	45956,566	565701,5
15	1,5	1981,108	186,989	247,157	3256,1	46116,512	564336,375
16	1,6	1886,722	178,08	205,105	3350,175	46469,98	575550,563
17	1,7	1818,32	171,624	174,788	3432,94	44794,984	629638,375
18	1,8	1821,165	171,892	244,142	3391,534	42881,047	547708,375
19	1,9	1799,594	169,856	184,653	3442,318	44272,176	634346,5
20	2,0	1812,205	171,047	193,637	3419,593	49857,824	645630,063
21	2,1	1794,488	169,374	204,265	3429,948	46690,387	601750,25
22	2,2	1758,798	166,006	202,944	3464,073	47772,883	565460
23	2,3	1774,905	167,526	255,423	3430,372	44534,93	578798,313
24	2,4	1777,372	167,759	210,187	3441,569	46716,098	599702,25
25	2,5	1759,262	166,05	174,244	3487,807	44090,441	615484,688

Dále byla na vzorku č.1 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty , se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.057 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	2370,181	223,712	187,704	9593,389	1958490,875	16440317
2	0,2	2209,188	208,516	176,752	9968,666	2026123	16714192
3	0,3	2256,37	212,97	193,465	9819,36	1890255	16724182

4	0,4	2172,542	205,057	188,052	10021,006	1925071,25	16864594
5	0,5	2069,718	195,352	164,916	10293,25	2048573,875	17201742
6	0,6	1946,541	183,726	158,864	10620,072	2080438,25	17340878
7	0,7	1969,698	185,912	157,474	10582,096	2059271,125	17176390
8	0,8	1896,354	178,989	154,065	10786,799	2079440	17257922
9	0,9	1839,23	173,597	154,997	10924,329	2229615	17950002
10	1,0	1821,568	171,93	154,112	10976,61	2238063	17953390
11	1,1	1821,612	171,935	161,407	10947,064	1988816,125	17919650
12	1,2	1809,42	170,784	160,78	10983,812	1991068,125	17929106
13	1,3	1753,083	165,466	161,233	11156,964	2063979,375	17679748
14	1,4	1766,554	166,738	160,201	11132,395	1999946,125	17714650
15	1,5	1769,85	167,049	157,098	11131,118	2043676,875	17910016
16	1,6	1721,925	162,525	167,01	11214,676	1999315,625	17798372
17	1,7	1637,96	154,6	156,631	11518,766	2048541,5	18603556
18	1,8	1649,303	155,671	152,619	11503,456	1972758,625	18704072
19	1,9	1665,568	157,206	148,913	11464,08	1963614,5	18659430
20	2,0	1629,805	153,831	163,192	11533,801	2073212,5	17934168
21	2,1	1687,263	159,254	155,178	11383,154	2032262,5	18176358
22	2,2	1659,616	156,644	158,93	11456,144	1963959,5	18657010
23	2,3	1590,004	150,074	151,847	11708,192	1960318,75	18697266
24	2,4	1575,077	148,665	154,915	11750,473	1949823,625	19196416
25	2,5	1566,573	147,862	149,124	11800,776	1930228,75	18651554

### 6.1.2 Vzorek č.2: ocel 1.0070 (11 700), řezáno laserem

Na vzorku č.2 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.0070 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	4732,433	446,675	197,116	2214,58	68483,977	344090,688
2	0,2	4598,876	434,069	193,605	2246,619	68866,102	345584,563
3	0,3	3244,564	306,241	227,539	2576,686	51351,477	454632,313
4	0,4	2957,644	279,16	215,724	2706,407	52917,992	464916,188
5	0,5	2734,966	258,142	229,742	2800,36	51544,98	481584,438
6	0,6	2748,587	259,428	235,958	2792,017	49845,066	473718,813
7	0,7	2734,503	258,099	235,092	2800,328	49991,316	474786,156
8	0,8	2648,737	250,003	224,73	2848,528	45195,07	500499,938
9	0,9	2699,468	254,792	227,74	2820,337	51787,586	483279
10	1,0	2623,24	247,597	223,396	2862,238	45217,879	500696,5
11	1,1	2410,138	227,483	207,571	2988,894	47718,086	500101,344
12	1,2	2334,179	220,314	221,307	3021,852	44439,113	513848,188
13	1,3	2357,874	222,55	231,044	3000,48	55059,441	488289,625
14	1,4	2219,039	209,446	227,281	3092,984	47138,848	511489,313
15	1,5	2179,659	205,729	224,734	3116,921	44896,563	526492,875

16	1,6	2133,028	201,328	237,201	3145,052	52743,387	578457,5
17	1,7	2043,846	192,91	191,557	3241,145	44899,266	558313,313
18	1,8	2007,101	189,442	212,25	3250,584	44052,941	559439,563
19	1,9	2156,533	203,546	186,625	3180,379	46893,305	530905,813
20	2,0	2252,117	212,568	207,626	3080,074	49236,516	509631,5
21	2,1	2199,761	207,627	200,623	3124,984	48058,672	515160,031
22	2,2	1960,588	185,052	221,044	3288,034	47786,926	544614,5
23	2,3	2118,975	200,001	196,455	3179,09	47475,969	569259,5
24	2,4	2042,988	192,829	193,066	3234,283	53455,773	543171,813
25	2,5	2071,802	195,549	193,898	3207,816	53305,242	571067,875

Dále byla na vzorku č.2 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.0070 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	3788,143	357,547	181,705	7819,604	2564199,25	12151722
2	0,2	3603,938	340,161	176,623	8011,933	2585872,25	12208695
3	0,3	3134,387	295,842	191,509	8456,985	2154868,25	14173927
4	0,4	2880,562	271,885	181,019	8836,5	2216956,25	14398701
5	0,5	2889,496	272,728	177,07	8841,823	2179222,5	13982168
6	0,6	2765,584	261,032	171,95	9039,497	2200610,5	14047705
7	0,7	2438,254	230,137	155,626	9638,665	2126054,75	15750660
8	0,8	2350,455	221,85	152,315	9817,095	2145184	15824779
9	0,9	2250,281	212,395	168,443	9914,361	2110927,5	15795007
10	1,0	2167,771	204,607	166,515	10097,407	2129627	15873888
11	1,1	2092,166	197,471	164,875	10270,456	2065841,25	16430158
12	1,2	2299,92	217,08	165,964	9849,33	2132708,5	15756292
13	1,3	1932,954	182,444	152,634	10690,545	2056228,125	17011192
14	1,4	1922,271	181,435	152,276	10732,985	1992958	16833444
15	1,5	1865,366	176,064	155,627	10857,499	1979422	17510560
16	1,6	1962,9	185,27	158,195	10606,784	1949046,75	16663189
17	1,7	2051,361	193,62	168,363	10352,143	2049400,625	16470673
18	1,8	2013,075	190,006	185,978	10402,182	2005714,875	17031608
19	1,9	2000,309	188,801	166,313	10482,441	2037317	16631955
20	2,0	1929,471	182,115	160,735	10679,643	2027782,125	17290014
21	2,1	1878,717	177,324	161,568	10815,749	1995319,5	17647100
22	2,2	1882,61	177,692	157,705	10824,324	1995037,125	17558390
23	2,3	1891,943	178,573	153,967	10808,811	1959222,625	17254208
24	2,4	1835,115	173,209	158,081	10935,468	1995697,625	17366670
25	2,5	1892,753	178,649	154,604	10798,738	1958494,75	17231508

### 6.1.3 Vzorek č.3: ocel 1.5122 (13 240), řezáno laserem

Na vzorku č.3 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.5122 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	4319,179	407,67	244,396	2260,407	55844,156	353373,25
2	0,2	4110,653	387,988	236,114	2321,887	56868,324	358698,531
3	0,3	3404,994	321,384	234,732	2521,24	48215,156	416617,313
4	0,4	3207,158	302,711	227,137	2601,792	49227,266	422668,875
5	0,5	2724,304	257,136	227,104	2808,731	46783,777	484551,094
6	0,6	2680,333	252,986	224,645	2833,018	46998,906	486093,188
7	0,7	2441,613	230,454	222,16	2954,608	48331,035	491875,531
8	0,8	2407,831	227,265	220,197	2976,339	48489,941	493163,438
9	0,9	2239,155	211,345	194,223	3096,488	54396,965	526545,813
10	1,0	2190,418	206,745	191,53	3132,586	54691,309	528794,125
11	1,1	2227,889	210,281	211,128	3094,264	51149,656	509977,031
12	1,2	2218,318	209,378	247,864	3082,632	48391,52	527235,625
13	1,3	2191,208	206,819	232,803	3107,486	46503,754	502517,875
14	1,4	2122,16	200,302	200,525	3179,543	45219,781	522374,25
15	1,5	2376,124	224,273	207,877	3002,478	47354,195	512568,938
16	1,6	2330,455	219,962	204,788	3033,43	50167,57	504499,656
17	1,7	2291,739	216,308	204,74	3055,721	47994,945	509770,656
18	1,8	2450,214	231,266	215,45	2956,396	47956,023	502540,094
19	1,9	2227,079	210,205	209,343	3093,066	52550,398	521860,688
20	2,0	2162,131	204,075	219,703	3131,56	47539,496	525072,75
21	2,1	2142,143	202,188	220,755	3146,542	45025,461	511414,5
22	2,2	2428,801	229,245	225,989	2963,59	47741,125	502256,5
23	2,3	2412,946	227,748	221,802	2973,286	43990,957	501298,688
24	2,4	2271,748	214,421	217,114	3062,496	48175,336	504413,5
25	2,5	2184,772	206,212	203,392	3125,611	51182,656	536615,688

Dále byla na vzorku č.3 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 16.

Tabulka 16.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.5122 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	3425,714	323,339	198,225	8136,032	2122546,5	12891493
2	0,2	3243,93	306,181	191,796	8362,069	2154926,5	12990855
3	0,3	2691,253	254,016	182,496	9100,685	2037687,875	14723453



4	0,4	2540,891	239,824	176,137	9369,947	2067701,625	14842759
5	0,5	2606,161	245,985	166,323	9313,564	1970411	15156400
6	0,6	2441,432	230,437	159,856	9623,477	1999792,125	15283227
7	0,7	2729,413	257,618	188,526	9024,636	1993171,25	14786435
8	0,8	2571,967	242,757	181,723	9300,533	2022396,5	14905420
9	0,9	2572,35	242,794	177,801	9315,367	1984613,875	15160271
10	1,0	2432,833	229,625	171,787	9583,184	2014870	15285023
11	1,1	2276,942	214,911	166,082	9901,938	2038909,5	15549618
12	1,2	2294,912	216,607	177,045	9818,564	2027842,875	15194089
13	1,3	2282,281	215,415	180,073	9837,132	2000435,375	15227126
14	1,4	2194,351	207,116	176,236	10023,887	1999047,125	15417525
15	1,5	2091,037	197,364	170,42	10261,611	2018928,625	16044020
16	1,6	2174,282	205,222	178,177	10062,435	1966920,75	15501079
17	1,7	2090,203	197,286	170,806	10263,109	1972674,25	16047254
18	1,8	2050,736	193,561	164,934	10365,942	1970354,125	16557333
19	1,9	2128,215	200,874	171,62	10176,402	1991241,375	15838734
20	2,0	2121	200,193	173,281	10192,308	1962148,25	16135220
21	2,1	2112,678	199,407	169,677	10223,223	1948746,625	15825766
22	2,2	2121,171	200,209	167,382	10207,633	2008228	15753158
23	2,3	2223,849	209,9	175,326	9960,98	1961939,75	15618074
24	2,4	2119,16	200,019	167,312	10205,024	1993829,125	15901082
25	2,5	2101,971	198,397	149,051	10334,737	2025065	16616526

#### 6.1.4 Vzorek č.4: ocel 1.7102 (14 240), řezáno laserem

Na vzorku č.4 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty  $H_{IT}$ , se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	$H_{IT}$ [MPa]	$HV_{IT}$ [-]	$E_{IT}$ [GPa]	$H_{max}$ [nm]	$W_{el}$ [pJ]	$W_{pl}$ [pJ]
1	0,1	4897,172	462,224	220,175	2153,327	63359,059	342988,781
2	0,2	4634,769	437,457	212,124	2217,356	64580,051	348015,406
3	0,3	4574,745	431,792	210,396	2231,825	64710,164	348550,219
4	0,4	4463,066	421,251	207,105	2260,006	65055,078	349883,656
5	0,5	4362,733	411,781	204,311	2285,25	65225,508	350497,531
6	0,6	4136,401	390,418	197,881	2343,969	65246,41	350572,875
7	0,7	2881,4	271,964	265,551	2671,584	43935,633	479886,875
8	0,8	2606,916	246,056	244,01	2832,557	46262,539	500476,625
9	0,9	2411,651	227,626	211,256	2975,575	47162,461	517932
10	1,0	2322,528	219,214	205,351	3038,46	47868,898	523680,469
11	1,1	2178,877	205,655	223,909	3120,288	47582,711	526834,313
12	1,2	2256,597	212,991	198,98	3088,606	50370,98	515604,781
13	1,3	2195,166	207,193	184,065	3131,342	49152,035	540564,25

14	1,4	2207,232	208,332	223,102	3102,556	49872,402	540536,75
15	1,5	2174,752	205,266	204,165	3138,129	43922,508	524291,875
16	1,6	2240,098	211,434	190,65	3099,057	47323,344	528524
17	1,7	2108,294	198,993	217,954	3171,916	45099,203	544573,563
18	1,8	2147,952	202,736	203,666	3151,083	47356,898	540842,75
19	1,9	2141,109	202,091	193,423	3172,797	46321,004	534248,375
20	2,0	2135	201,514	204,203	3158,588	50684,273	548156,438
21	2,1	2109,514	199,108	216,655	3171,054	46436,047	536531,5
22	2,2	2131,271	201,162	257,074	3140,395	45011,852	535031
23	2,3	2235,397	210,99	259,735	3067,838	46875,02	512371,344
24	2,4	2190,096	206,714	211,814	3126,396	46197,879	530477,375
25	2,5	2232,504	210,717	197,333	3097,693	47253,77	527690,25

Dále byla na vzorku č.4 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	4741,056	447,489	172,581	7175,345	2576448,5	10803792
2	0,2	4483,623	423,191	166,768	7373,29	2610857	10883592
3	0,3	4312,829	407,07	162,753	7514,865	2633407,5	10933790
4	0,4	4187,067	395,2	159,974	7618,69	2642341,5	10935754
5	0,5	3909,767	369,027	153,786	7862,312	2641790,75	10935675
6	0,6	3548,863	334,963	145,507	8221,249	2642451,25	10935772
7	0,7	2629,496	248,187	183,14	9210,31	2106603,25	15037866
8	0,8	2477,495	233,841	176,577	9492,15	2139124,25	15159470
9	0,9	2192,113	206,905	176,193	10019,188	2066427	16145461
10	1,0	2117,38	199,851	166,011	10222,08	2084358,875	16220542
11	1,1	2180,76	205,833	172,31	10061,058	2147481,25	15526755
12	1,2	2074,534	195,807	148,92	10395,379	2127218,5	16323007
13	1,3	1990,399	187,866	159,417	10536,454	2040386,625	16518470
14	1,4	1988,733	187,708	162,1	10524,119	2044798,5	16949026
15	1,5	1967,39	185,694	166,659	10569,121	2069231,25	16682892
16	1,6	2050,382	193,527	160,389	10389,441	2048444,25	16471760
17	1,7	2012,323	189,935	163,539	10460,37	2073890,5	16583694
18	1,8	2013,332	190,03	166,66	10450,535	2084583	16503527
19	1,9	2032,175	191,809	158,482	10437,719	2071480,875	16896098
20	2,0	2091,759	197,433	171,232	10258,152	2087249,25	16058391
21	2,1	2120,971	200,19	171,961	10192,309	2141665,25	15958669
22	2,2	2178,206	205,592	159,681	10116,938	2100536,25	16083701
23	2,3	2144,033	202,367	174,538	10135,169	2115266	16217809
24	2,4	2226,042	210,107	159,931	10031,604	2187011,25	15860846
25	2,5	2286,834	215,845	160,431	9902,015	2133703	15874384

### 6.1.5 Vzorek č.5: ocel 1.8161 (15 261), řezáno laserem

Na vzorku č.5 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.8161 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	3686,614	347,964	224,341	2444,009	49848,324	409344,438
2	0,2	3496,8	330,049	216,111	2515,522	50784,383	415816,156
3	0,3	3335,005	314,777	200,634	2566,533	58085,445	427523,688
4	0,4	3211,953	303,163	195,224	2620,336	58861,391	432466
5	0,5	3267,524	308,408	196,419	2603,096	54446,641	437233,188
6	0,6	3220,865	304,004	194,643	2622,458	54604,688	438276,469
7	0,7	3170,26	299,228	177,521	2689,509	58878,398	445693,844
8	0,8	3141,886	296,55	176,538	2701,507	58943,469	446045,281
9	0,9	3058,909	288,718	213,866	2658,776	51816,297	449178,688
10	1,0	2904,275	274,123	206,78	2734,651	52738,055	455896,813
11	1,1	2983,751	281,624	210,135	2706,197	48653,176	459633,5
12	1,2	2991,172	282,325	269,261	2669,883	50736,461	450448,5
13	1,3	2944,524	277,922	203,146	2725,199	55580,102	453467,438
14	1,4	3062,302	289,038	223,48	2660,606	51945,582	444629,25
15	1,5	3038,74	286,814	194,406	2710,066	51085,195	453114,125
16	1,6	2834,416	267,529	186,467	2790,981	55514,547	471190,406
17	1,7	2952,467	278,671	220,116	2709,458	51364,531	456255,563
18	1,8	2837,509	267,821	203,467	2771,716	48808,441	453276,969
19	1,9	2854,547	269,429	228,221	2746,806	53317,77	459287,656
20	2,0	3021,898	285,225	198,422	2700,185	53228,766	456425,75
21	2,1	2913,157	274,961	201,645	2738,401	54191,699	449030,188
22	2,2	2981,682	281,429	204,529	2704,764	56575,082	446020,031
23	2,3	3016,722	284,736	198,296	2696,446	53966,27	449478,625
24	2,4	3029,059	285,901	190,878	2694,15	51581,523	444351,188
25	2,5	3005,456	283,673	190,599	2710,228	59322,316	453424,844

Dále byla na vzorku č.5 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 20.

Tabulka 20.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.8161 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	3090,254	291,676	173,61	8597,48	2126084,25	14122488
2	0,2	2977,142	281	169,592	8759,86	2141797,75	14189336
3	0,3	2809,437	265,171	164,869	8980,972	2136153,75	14213481

4	0,4	2700,992	254,936	160,647	9161,434	2154387,75	14286328
5	0,5	2678,55	252,817	159,405	9190,736	2196657,25	14676090
6	0,6	2578,329	243,358	155,295	9370,965	2214249,75	14750608
7	0,7	2631,699	248,395	153,888	9301,696	2159547,75	14537383
8	0,8	2581,681	243,674	152,227	9386,499	2159231,5	14537203
9	0,9	2620,223	247,312	173,121	9243,534	2164434,5	14436763
10	1,0	2519,271	237,784	169,198	9418,983	2165420,5	14437298
11	1,1	2621,849	247,466	157,746	9297,148	2141935,75	14541470
12	1,2	2500,401	236,003	147,538	9517,193	2266153,5	15038726
13	1,3	2540,25	239,764	154,728	9432,519	2190458,75	14730732
14	1,4	2513,615	237,25	151,168	9501,751	2132012,5	14994488
15	1,5	2589,689	244,43	151,774	9372,979	2114952,5	14606357
16	1,6	2570,172	242,588	153,552	9403,498	2161067,5	14543351
17	1,7	2615,616	246,877	166,086	9271,87	2158713,25	14493819
18	1,8	2565,719	242,168	149,47	9430,782	2179898	14759388
19	1,9	2525,969	238,416	161,798	9428,886	2209473,25	14569956
20	2,0	2542,106	239,939	154,759	9438,359	2203405,5	14700217
21	2,1	2536,782	239,437	165,229	9403,202	2108375	14676884
22	2,2	2650,922	250,21	157,503	9261,687	2156933,25	14505166
23	2,3	2636,415	248,84	164,918	9249,116	2134090	14413990
24	2,4	2643,428	249,502	162,201	9248,083	2170105,5	14372032
25	2,5	2576,864	243,22	161,974	9352,866	2167431,25	14414907

### 6.1.6 Vzorek č.6: ocel 1.2379 (19 573), řezáno laserem

Na vzorku č.6 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 21.

Tabulka 21.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.2379 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	9400,574	887,282	255,686	1614,283	83303,813	222145,906
2	0,2	8753,193	826,178	244,008	1673,301	84757,875	225689,844
3	0,3	7092,138	669,398	214,838	1845,104	85378,125	227060,75
4	0,4	6394,698	603,569	201,898	1935,761	85429,352	227162,875
5	0,5	6099,093	575,669	196,282	1978,453	85352,992	227010,656
6	0,6	4675,977	441,346	167,924	2239,32	85369,461	227043,594
7	0,7	2823,252	266,475	234,57	2752,515	49079,445	447360,313
8	0,8	2779,607	262,356	232,185	2775,523	49316,352	448991,75
9	0,9	2653,78	250,48	189,747	2871,475	52434,77	477663,438
10	1,0	2623,707	247,641	188,298	2889,77	52711,047	479669,938
11	1,1	2745,692	259,155	222,542	2797,933	50083,984	465666,531
12	1,2	2631,382	248,365	238,168	2847,809	51325,105	475099,906
13	1,3	2395,137	226,067	200,054	3000,043	50887,434	509773,375
14	1,4	2516,285	237,502	208,679	2920,777	48900,27	488338,125

15	1,5	2389,378	225,524	219,58	2988,409	50534,77	503873,156
16	1,6	2399,19	226,45	212,57	2984,917	50117,895	513775,844
17	1,7	2359,763	222,728	224,669	3001,524	49079,977	493391,375
18	1,8	2399,177	226,449	196,146	2995,431	53820,004	495900,969
19	1,9	2461,893	232,368	218,23	2945,929	55195,121	490633,563
20	2,0	2439,608	230,265	217,302	2958,015	50772,02	485554,375
21	2,1	2380,649	224,7	230,724	2985,724	51759,18	493940,438
22	2,2	2443,982	230,677	216,909	2957,018	52280,055	491736,688
23	2,3	2562,083	241,825	175,807	2963,527	54580,367	487199,875
24	2,4	2506,545	236,583	202,274	2934,362	52402,168	492684,188
25	2,5	2291,796	216,313	227,32	3043,511	50085,711	515069,188

Dále byla na vzorku č.6 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 22.

Tabulka 22.: Naměřené hodnoty pro ocel I.2379 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [GPa]	H <sub>max</sub> [nm]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	7950,794	750,443	176,288	5845,14	3005324,75	8379613
2	0,2	7484,156	706,399	169,874	6011,072	3037682	8440287
3	0,3	7154,144	675,251	165,202	6138,461	3061121,5	8482896
4	0,4	6744,604	636,596	159,666	6298,934	3068355	8480674
5	0,5	6019,688	568,174	149,579	6621,014	3066758	8480703
6	0,6	5171,593	488,126	137,202	7080,986	3067140,5	8480685
7	0,7	4365,057	412	124,737	7637,256	3067337	8480683
8	0,8	3877,128	365,946	116,733	8055,545	3067319,25	8480684
9	0,9	2629,355	248,174	166,099	9242,837	2164152	14524629
10	1,0	2532,681	239,049	162,281	9419,04	2181387,25	14594790
11	1,1	2428,426	229,209	165,827	9585,704	2158256,25	14765483
12	1,2	2348,907	221,704	156,748	9767,031	2141263,75	15249176
13	1,3	2261,839	213,486	161,087	9920,432	2080635,75	15734611
14	1,4	2261,701	213,473	155,132	9943,567	2055362,5	15505946
15	1,5	2253,249	212,675	161,416	9933,453	2051020,875	15571453
16	1,6	2247,373	212,12	159,656	9951,51	2072033,125	15709367
17	1,7	2294,587	216,577	154,695	9879,734	2063191,5	15439997
18	1,8	2323,387	219,295	156,714	9822,537	2098295,5	15355836
19	1,9	2357,379	222,503	161,934	9732,79	2128662,25	15116623
20	2,0	2313,488	218,361	157,096	9831,891	2104804,25	15505942
21	2,1	2250,883	212,452	157,864	9956,734	2067173,25	15702506
22	2,2	2245,949	211,986	152,785	9991,067	2069920,125	15525973
23	2,3	2246,72	212,059	161,228	9949,826	2105531,75	15408275
24	2,4	2258,14	213,137	155,718	9944,119	2118685,5	15591120
25	2,5	2374,135	224,085	169,455	9680,446	2062758,75	14954751

### 6.1.7 Vzorek č.7: nerezová ocel 17 460, řezáno laserem

Na vzorku č.7 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23.: Naměřené hodnoty pro ocel 17 460 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [Gpa]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	2504,694	236,408	171,06	56460,434	478836,969
2	0,2	2598,716	245,282	175,589	56235,781	477419,75
3	0,3	2642,075	249,375	177,392	56058,191	476143,156
4	0,4	2924,455	276,027	167,878	58358,086	458233,188
5	0,5	3037,975	286,742	172,454	58094,883	456730,094
6	0,6	3106,259	293,187	174,836	57842,48	455157,906
7	0,7	2997,367	282,909	202,873	56197,703	434957,906
8	0,8	3097,984	292,406	206,876	56173,039	434859
9	0,9	3289,958	310,526	214,772	55812,512	432369,875
10	1,0	3155,018	297,789	194,738	55626,484	432708,844
11	1,1	3220,811	303,999	198,282	55410,668	431293,594
12	1,2	3201,753	302,2	201,072	52555,977	427915,469
13	1,3	3260,583	307,753	202,9	52241,395	425895,875
14	1,4	3134,941	295,894	190,379	54134,797	441760,188
15	1,5	3231,117	304,972	193,963	53889,516	440220,875
16	1,6	3138,718	296,251	192,702	58217,23	440894,688
17	1,7	3209,25	302,908	195,359	57993,063	439500,469
18	1,8	3249,597	306,716	203,557	53272,43	423254,219
19	1,9	3357	316,854	207,476	53082,113	422050
20	2,0	3385,971	319,588	192,794	62319,387	434032,25
21	2,1	3506,545	330,968	196,858	62287,426	433841,094
22	2,2	2977,561	281,04	229,007	58329,586	433944,75
23	2,3	3041,991	287,121	232,274	58061,953	432306,906
24	2,4	2856,644	269,627	195,899	56838,574	456722,438
25	2,5	2886,397	272,435	197,197	56709,504	455795,438

Dále byla na vzorku č.7 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 24.

Tabulka 24.: Naměřené hodnoty pro ocel 17 460 při zkušebním zatížení 5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [Gpa]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	1999,288	188,705	156,719	56540,512	479309,5
2	0,2	2080,005	196,323	160,074	56546,059	479341,563
3	0,3	2219,951	209,532	159,508	56471,504	478902,125

4	0,4	2307,795	217,823	146,468	58326,984	458056,156
5	0,5	2548,902	240,58	155,052	58292,199	457858,625
6	0,6	2806,544	264,898	163,892	58312,93	457976,125
7	0,7	2331,839	220,093	174,928	56205,48	435005,125
8	0,8	2646,726	249,814	179,288	56263,719	435357,094
9	0,9	2959,485	279,334	201,324	56171,34	434847,063
10	1,0	2786,537	263,01	180,565	55647,531	432849,719
11	1,1	2948,25	278,273	187,004	55755,168	433493,156
12	1,2	2785,96	262,955	185,144	52543,793	427836,438
13	1,3	3093,099	291,945	196,958	52577,297	428054,344
14	1,4	2859,596	269,906	180,574	54214,004	442240,781
15	1,5	3098,254	292,432	189,317	54196,117	442132,25
16	1,6	2787,479	263,099	178,838	58432,398	442177,531
17	1,7	3009,286	284,034	187,101	58395,359	441959,813
18	1,8	2810,178	265,241	186,769	53202,898	422886,5
19	1,9	3119,074	294,397	198,632	53267,586	423223,75
20	2,0	3063,321	289,134	181,678	62285,188	433828,313
21	2,1	3349,107	316,109	191,591	62291,598	433866,75
22	2,2	2681,146	253,062	214,179	58472,973	434827,281
23	2,3	2918,265	275,443	226,195	58417,113	434483,625
24	2,4	2576,991	243,232	173,346	57010,516	457994,438
25	2,5	2672,606	252,256	188,221	57003,039	457939,781

### 6.1.8 Vzorek č.8: ocel 1.7102 (14 240), řezáno plazmou

Na vzorku č.8 byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 25.

Tabulka 25.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 0,5N

N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	HV <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [Gpa]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	6167,017	582,08	299,689	64120,188	297572,625
2	0,2	5998,412	566,166	294,124	64414,914	298774,75
3	0,3	5617,42	530,205	280,633	65794,539	304313,813
4	0,4	5115,97	482,876	263,386	66947,383	308530,375
5	0,5	3093,463	291,979	249,67	48427,496	460776,656
6	0,6	2816,888	265,875	233,915	50844,309	479849,063
7	0,7	2435,887	229,913	240,329	46606,473	518154,531
8	0,8	2261,228	213,428	227,784	48043,266	529881,5
9	0,9	2311,782	218,2	212,38	46271,27	542283,313
10	1,0	2201,633	207,803	206,018	47120,77	549449,313
11	1,1	2305,438	217,601	192,158	45776,234	541162,438
12	1,2	2203,412	207,971	187,533	46576,746	548221,125
13	1,3	2085,57	196,848	201,396	46722,617	549677,438
14	1,4	2211,79	208,762	208,624	47624,086	543319,125
15	1,5	2051,253	193,609	181,958	46646,664	564289,063

16	1,6	2074,573	195,81	186,64	47905,691	568173
17	1,7	2018,006	190,471	210,106	47434,402	575613,438
18	1,8	2168,475	204,674	239,484	44777,574	556751,125
19	1,9	2087,515	197,032	216,338	47214,285	564849,313
20	2,0	2070,062	195,385	198,785	45319,473	560486,875
21	2,1	2020,767	190,732	202,031	42763,277	571456,125
22	2,2	2156,058	203,501	215,802	43622,594	557412,375
23	2,3	2032,097	191,801	213,423	47418,828	570790,438
24	2,4	2003,421	189,095	226,202	45556,063	582559,75
25	2,5	2210,663	208,655	194,284	45650,125	565917,5

Dále byla na vzorku č.8 provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti při zkušebním zatížení 5 N, a zároveň byla v každém měřeném vpichu vytvořena indentační křivka. Program přístroje dokáže z této křivky vyhodnotit hodnoty, se kterými dále můžeme pracovat při určování mechanických vlastností materiálu. Hodnoty, které jsme získali z programu jsou uvedeny v tabulce 26.

Tabulka 26.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 5N

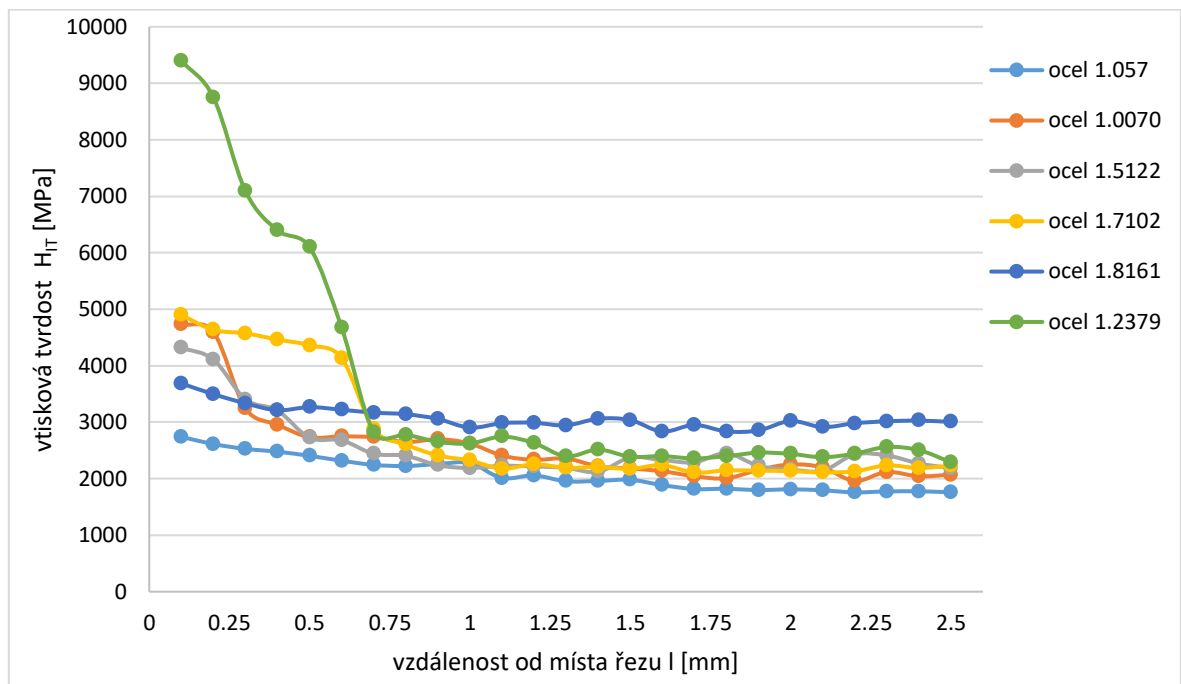
N	l [mm]	H <sub>IT</sub> [MPa]	H <sub>IT</sub> [-]	E <sub>IT</sub> [Gpa]	W <sub>el</sub> [pJ]	W <sub>pl</sub> [pJ]
1	0,1	6537,764	617,073	208,169	72483,125	310044,438
2	0,2	6201,344	585,32	200,014	73720,102	314374,688
3	0,3	5438,31	513,3	218,822	68476,195	354941,813
4	0,4	4978,376	469,889	206,614	70389,273	362841,844
5	0,5	2920,168	275,623	237,798	46143,281	471126,344
6	0,6	2722,996	257,013	226,386	47569,27	482659,813
7	0,7	2544,325	240,148	245,828	46387,676	513046,125
8	0,8	2419,548	228,371	236,589	47155,93	519357,625
9	0,9	2724,741	257,177	233,261	49515,379	511944,688
10	1,0	2538,319	239,582	221,36	50619,363	520527,875
11	1,1	2380,237	224,661	233,497	47016,277	522361,531
12	1,2	2454,495	231,67	227,684	49688,402	514341,313
13	1,3	2510,542	236,96	230,378	47946,859	530956,313
14	1,4	2354,928	222,272	239,123	48422,566	536224,563
15	1,5	2198,072	207,467	247,171	48845,559	539334,25
16	1,6	2171,87	204,994	223,201	46718,809	557541,313
17	1,7	2269,789	214,236	213,734	46095,336	562848,563
18	1,8	2140,579	202,041	200,016	48360,098	551997,625
19	1,9	2105,503	198,73	214,737	44598,379	567128,188
20	2,0	2232,55	210,721	219,356	43598,879	552444,125
21	2,1	2273,695	214,605	237,909	44367,973	570155,438
22	2,2	2345,28	221,361	202,869	48777,488	541809,75
23	2,3	2231,417	210,614	190,716	47524,422	556042,813
24	2,4	2070,254	205,508	186,836	43974,863	561932,875
25	2,5	2194,045	207,087	186,781	46749,668	550017,438



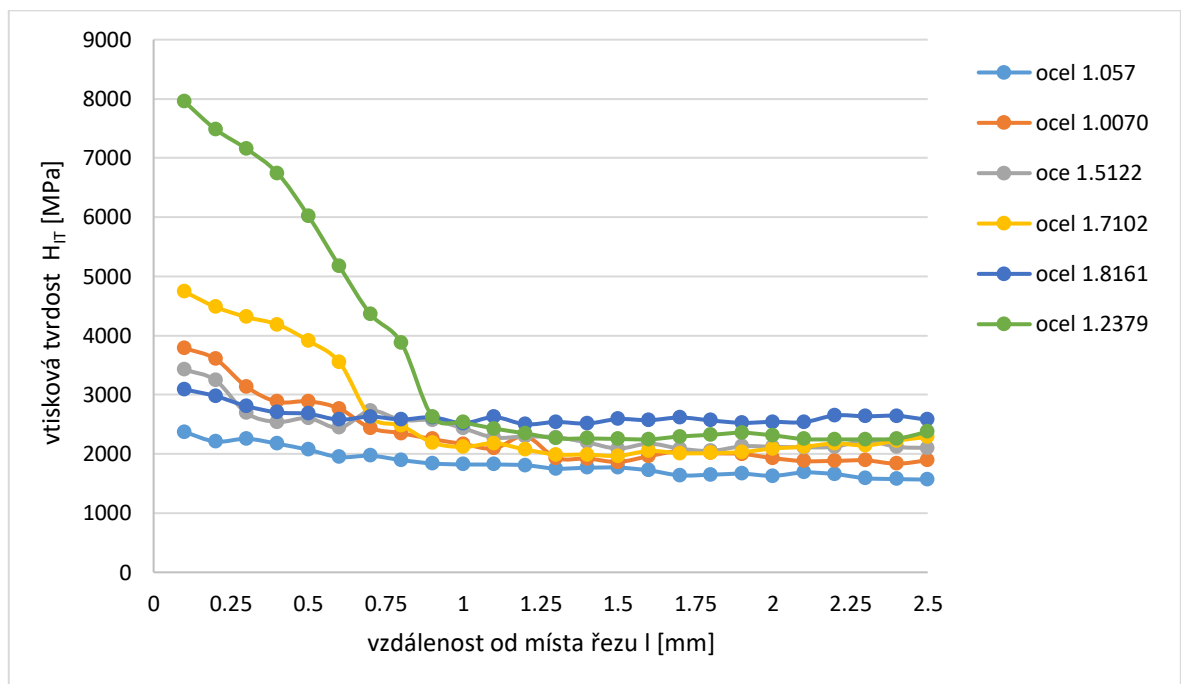
## 6.2 Grafické vyhodnocení a porovnání ocelí

### 6.2.1 Vtisková tvrdost ( $H_{IT}$ )

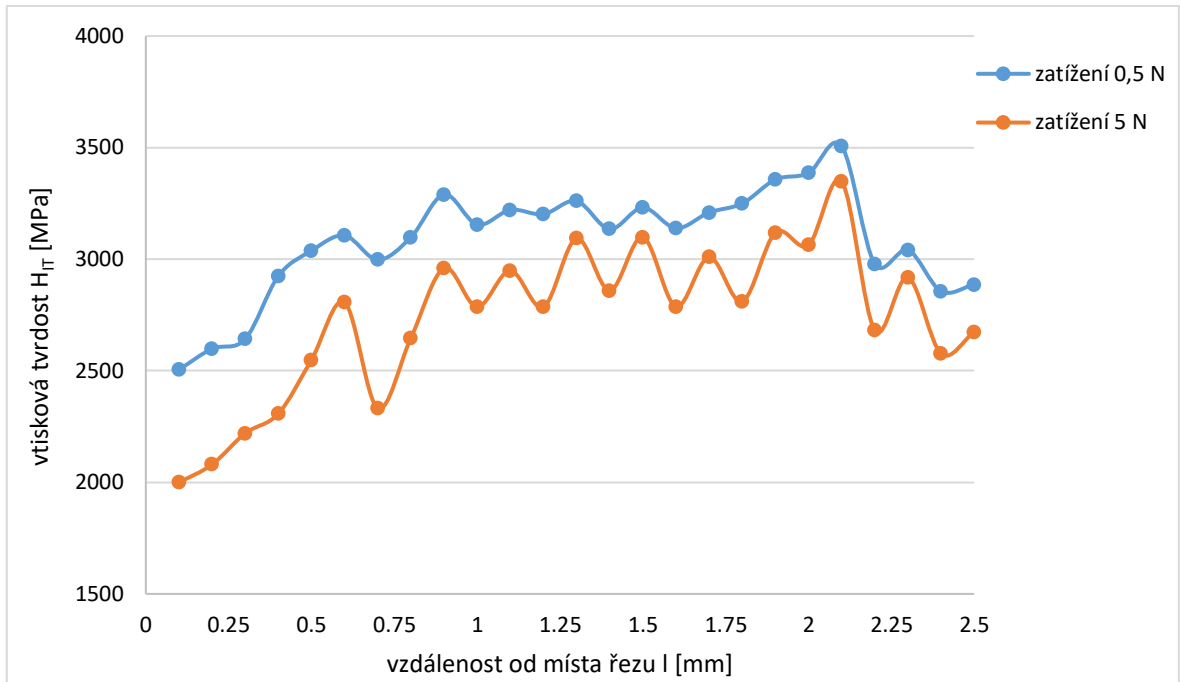
Mechanická vlastnost materiálů vtisková tvrdost neboli tvrdost nám vyjadřuje odpor materiálů vůči vnikání cizího tělesa. Vtisková tvrdost se uvádí v MPa.



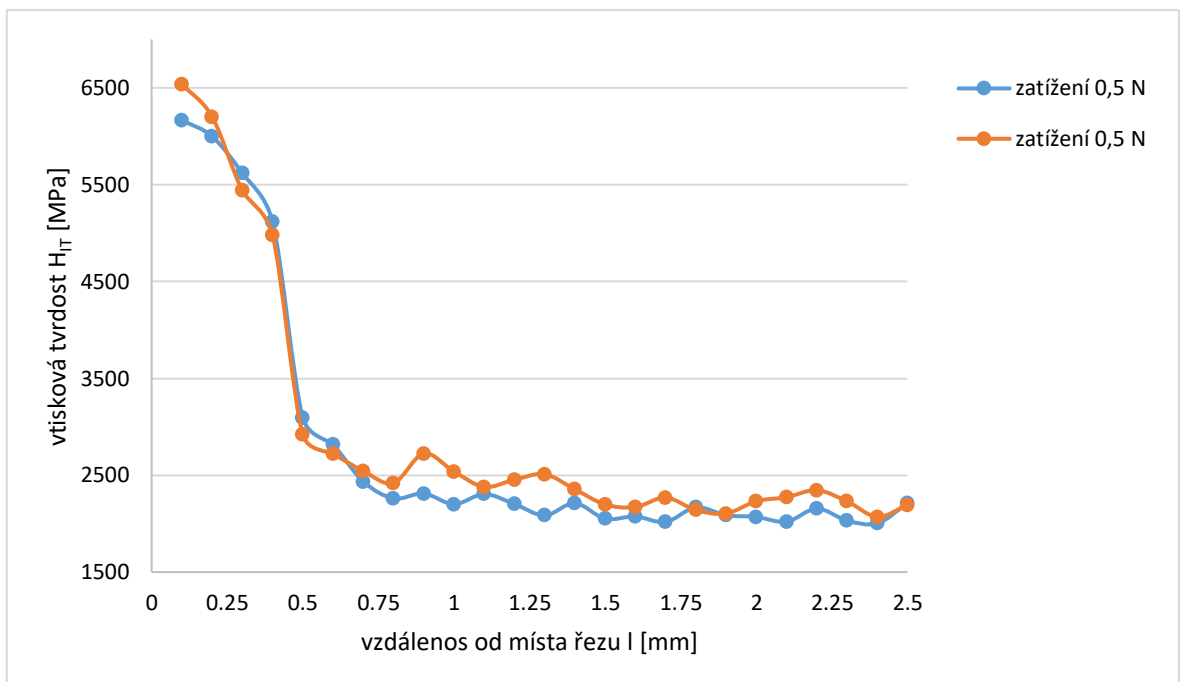
Obr. 23: Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N



Obr. 24: Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N



Obr. 25: Graf závislosti vtiskové tvrdosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různých zkušebních zatížení



Obr. 26: Graf závislosti vtiskové tvrdosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různých zkušebních zatížení

Instrumentovaná zkouška tvrdosti byla prováděna při dvou zkušebních zatíženích 0,5 a 5 N. Čím je zatěžovací síla větší, tím se indentor dostane do větší hloubky zkoušeného materiálu, kde je materiál méně teplotně ovlivněn. Při dělení materiálu laserem se teplota řezu pohybuje kolem 35 000 °C a u plazmy je to okolo 15 000 °C, což je v obou případech velmi vysoká teplota oproti okolním podmínkám, kde uvažujeme teplotu 20 °C. Povrchová vrstva materiálu se zakaluje důsledkem ochlazování materiálu kritickou rychlostí. Tato rychlost je

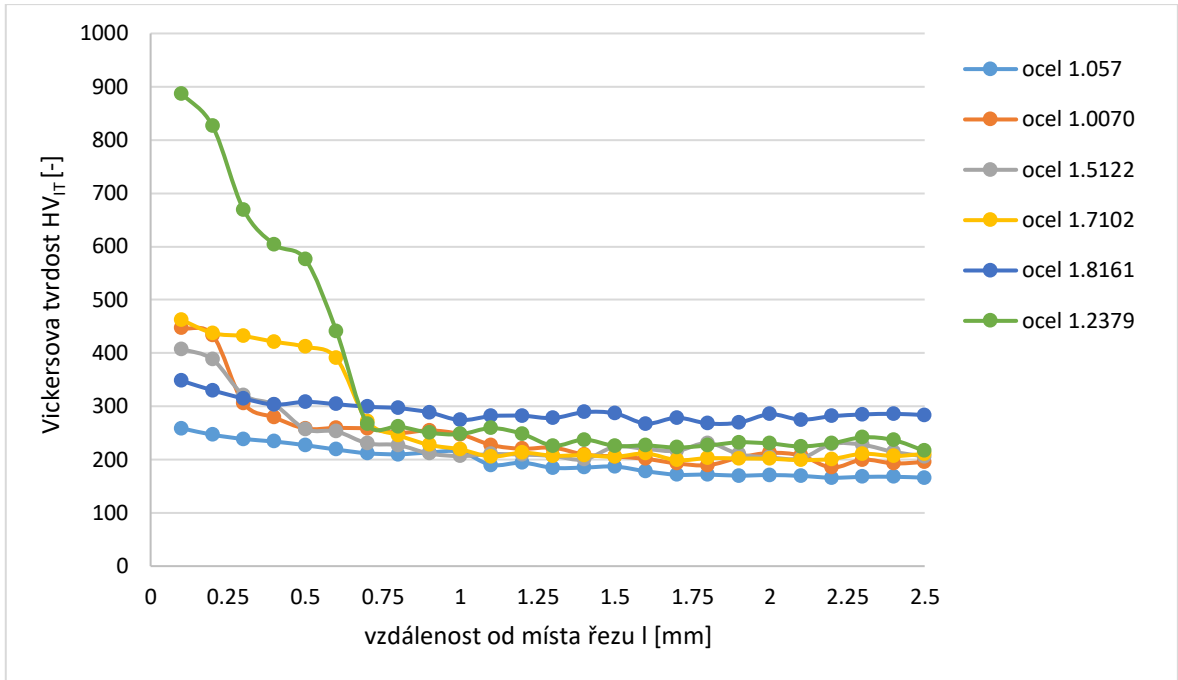
způsobená výrazným teplotním spádem (rozdíl teplot min. 14 000 °C). Zakalením povrchové vrstvy se zvětšuje tvrdost materiálu, což znamená, že odpor materiálu vůči vnikání cizích těles se také zvětšuje. Míra ovlivnění těchto mechanických vlastností záleží na chemickém složení oceli. Z výsledků měření a jejich grafického znázornění bylo lehce zjištěno, že u většiny ocelí se do vzdálenosti 0,5 mm od místa řezu tvrdost značně zvětšila. Nejméně ovlivněné oceli byly 1.057 a 1.8161. Největší hodnota vtiskové tvrdosti 9400,574 MPa byla naměřena u oceli 1.2379 při zatížení 0,5 N. Nejvíce hodnot leží v rozmezí od 1500 MPa do 3000 MPa ve vzdálenostech za 0,5 mm od místa řezu, což je neovlivněná oblast.

Naprostou výjimku tvoří nerezová ocel 17 460 u které je průběh tepelného ovlivnění odlišný, do vzdálenosti 0,5 mm od řezu spíše opačný. Při větším zatížení 5 N se skokově mění hodnoty tvrdosti v rozmezí až 500 MPa. Při menším zatížení 0,5 N nejsou rozdíly už tolik viditelné.

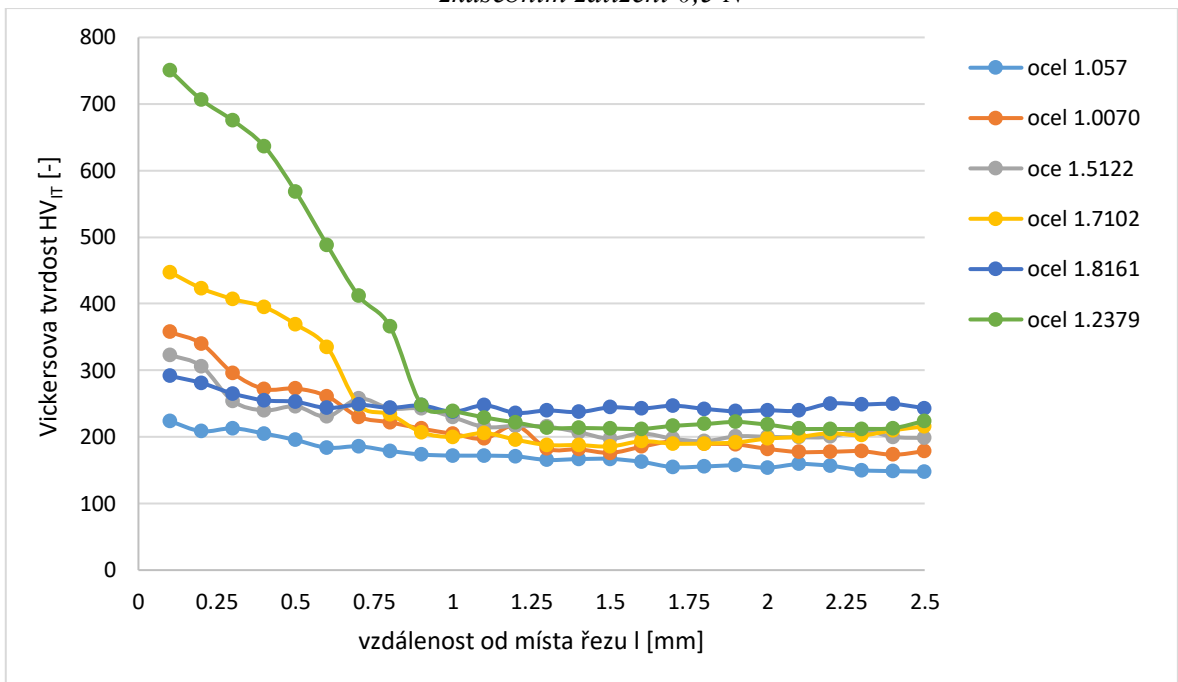
Ocel 1.7102 dělená plazmou má při obou zatíženích podobné výsledky. Při zatížení 5 N do vzdálenosti 0,5 mm od místa řezu pozorujeme razantní nárůst tvrdosti z hodnoty 2950,168 MPa až na maximální naměřenou hodnotu 6537,764 MPa. Hodnoty v neovlivněné oblasti se opět pohybují kolem 2100 MPa.

### 6.2.2 Tvrdość podle Vickerse (H<sub>V</sub>)

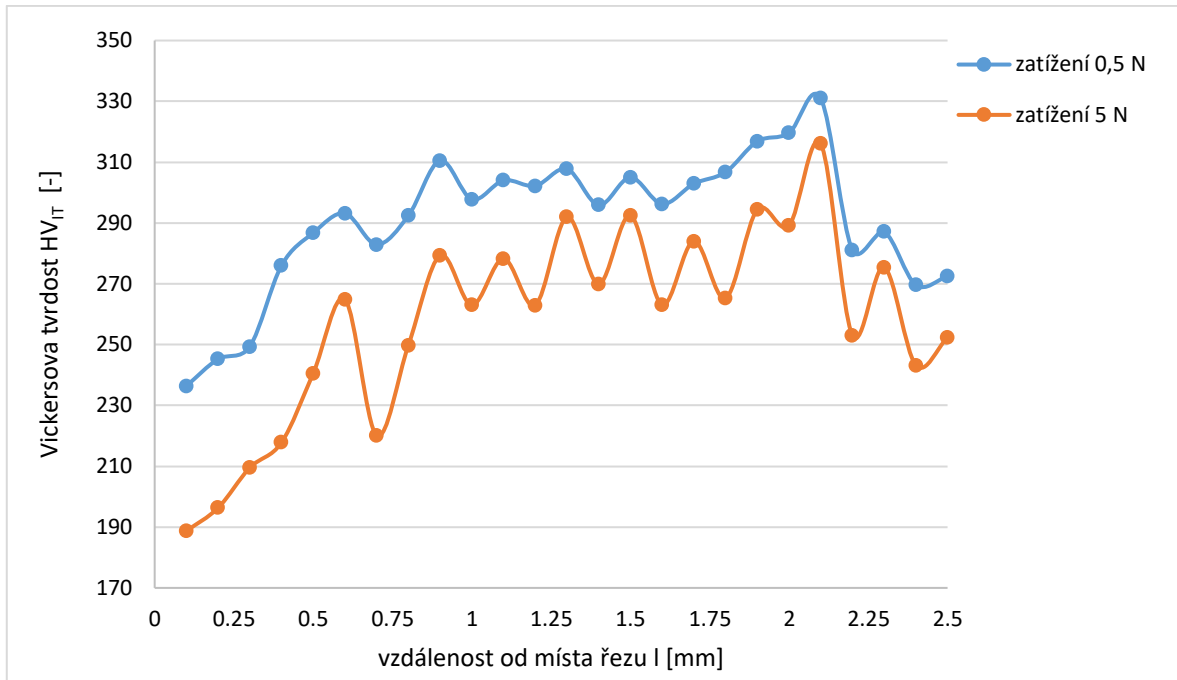
Tvrdość podle Vickerse se vyjadřuje bezrozměrně a udává nám tvrdość materiálu, která je určena poměrem vtačovací síly F a povrchu vtisku.



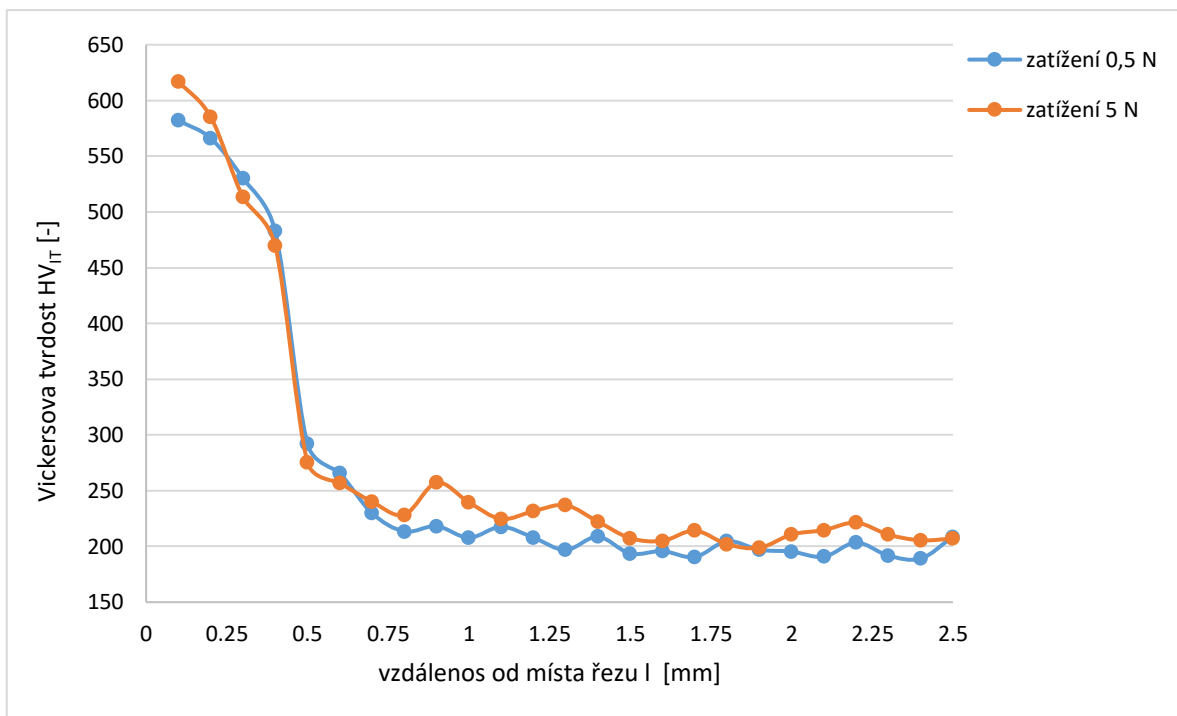
Obr. 27: Graf závislosti Vickersovy tvrdości materiálu na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N



Obr. 28: Graf závislosti Vickersovy tvrdości materiálu na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N



Obr. 29: Graf závislosti Vickersovy tvrdosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení



Obr. 30: Graf závislosti Vickersovy tvrdosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení

Instrumentovanou zkouškou tvrdosti při zkušebním zatížení 0,5 a 5 N byla zjištěna tvrdost podle Vickerse. Z grafů závislosti (obr. 27, 28) lze zjistit, že u čtyřech různých ocelí (1.057, 1.0070, 1.5122, 1.8161) se výrazně mění tvrdost v oblasti 0,3 mm od místa řezu pro obě hodnoty zatížení. Pro ocel 1.7102 a 1.2379 se teplotně ovlivněná oblast a růst tvrdosti objevuje až do vzdálenosti 0,75 mm od místa řezu. Nejvyšší naměřené hodnoty u oceli 1.2379 se pohybují kolem hodnoty 700 HV což odpovídá struktuře martenzitu. Struktury

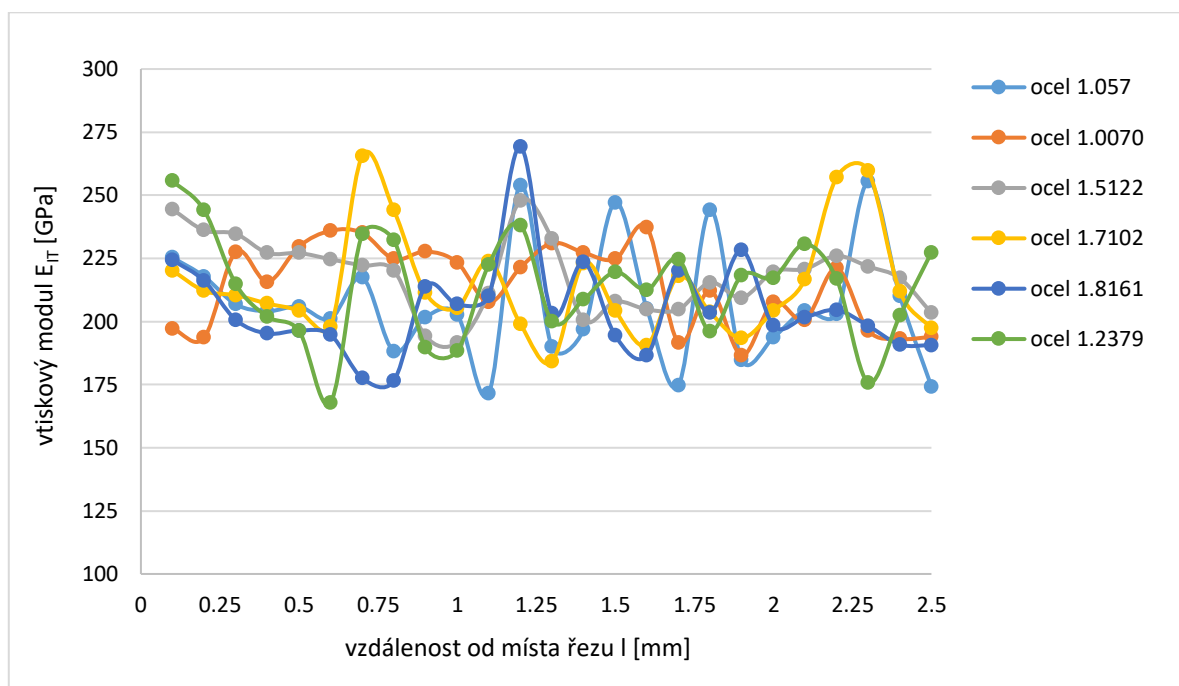
martenzitu je dosaženo důsledkem chemického složení oceli, ve které je vysoký obsah uhlíku. V oblasti, kde materiál nebyl zakalen vlivem vysokého teplotního spádu, se tvrdost podle Vickerse pohybuje v rozmezí 180-280 HV v závislosti na konkrétní oceli. Tato hodnota odpovídá struktuře perlitu. Nejméně ovlivněná struktura materiálu je u oceli 1.057 a 1.8161.

Stejnou změnu vlastností pozorujeme i u oceli 1.7102, která byla řezána plazmou. Díky vysokým teplotám, které při tomto způsobu dělení vzniká je zakalení výrazné a nejvyšší hodnoty dosahují hodnot 617,073 HV při zatížení 5 N, což reprezentuje strukturu martenzitu.

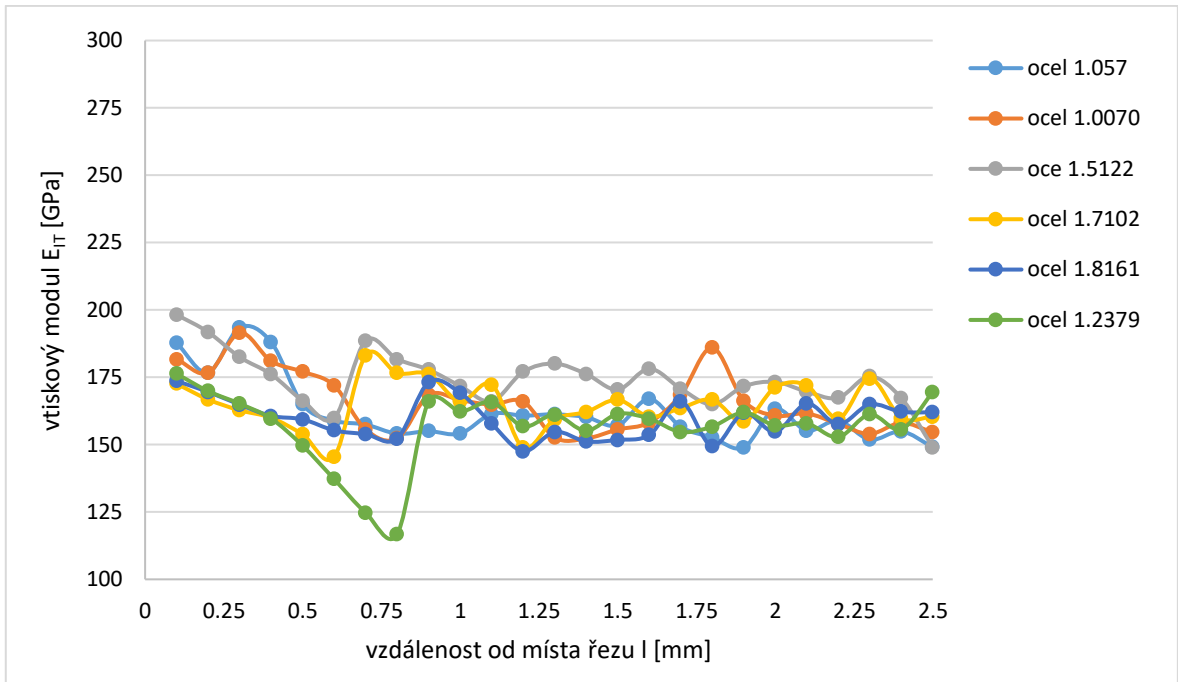
U korozivzdorné oceli 17 460 je změna vlastností inverzní k ostatním. Vickersova tvrdost je do 0,5 mm od místa řezu nižší a dále se pak skokově mění. Při větším zatížení 5 N jsou rozdíly větší.

### 6.2.3 Vtiskový modul ( $E_{IT}$ )

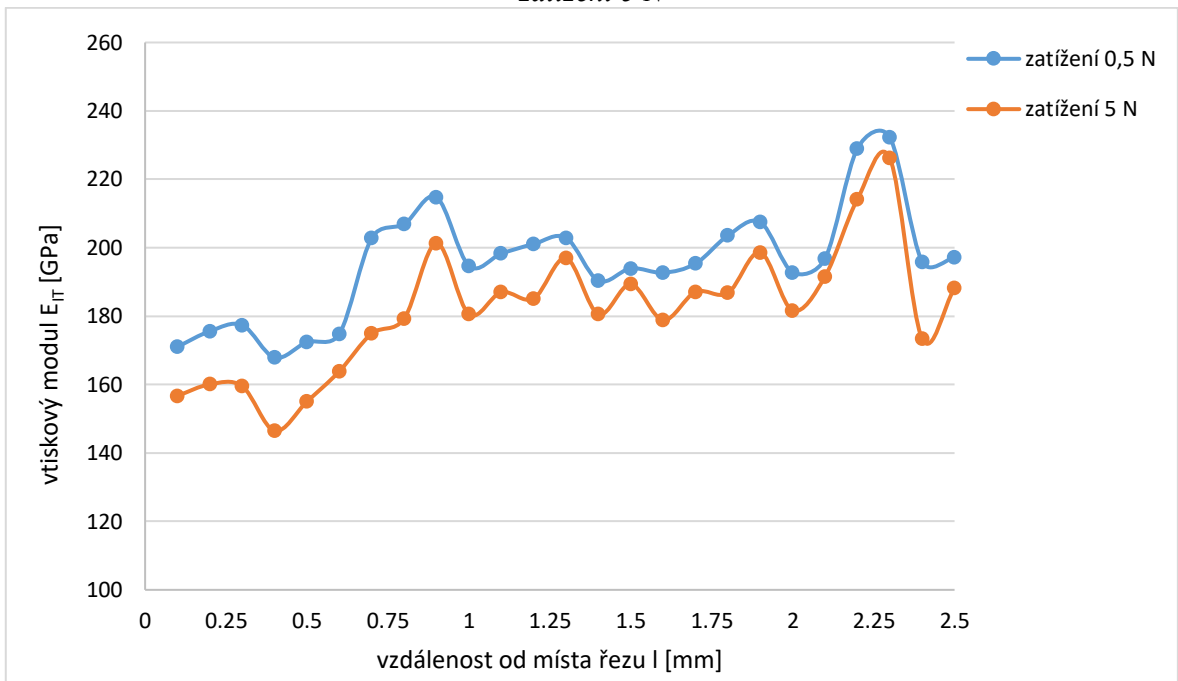
Vtiskový modul je určený ze směrnice tečny odtěžující křivky a odpovídá elastickému (Youngověmu) modulu. Modul  $E_{IT}$  se udává v Pa.



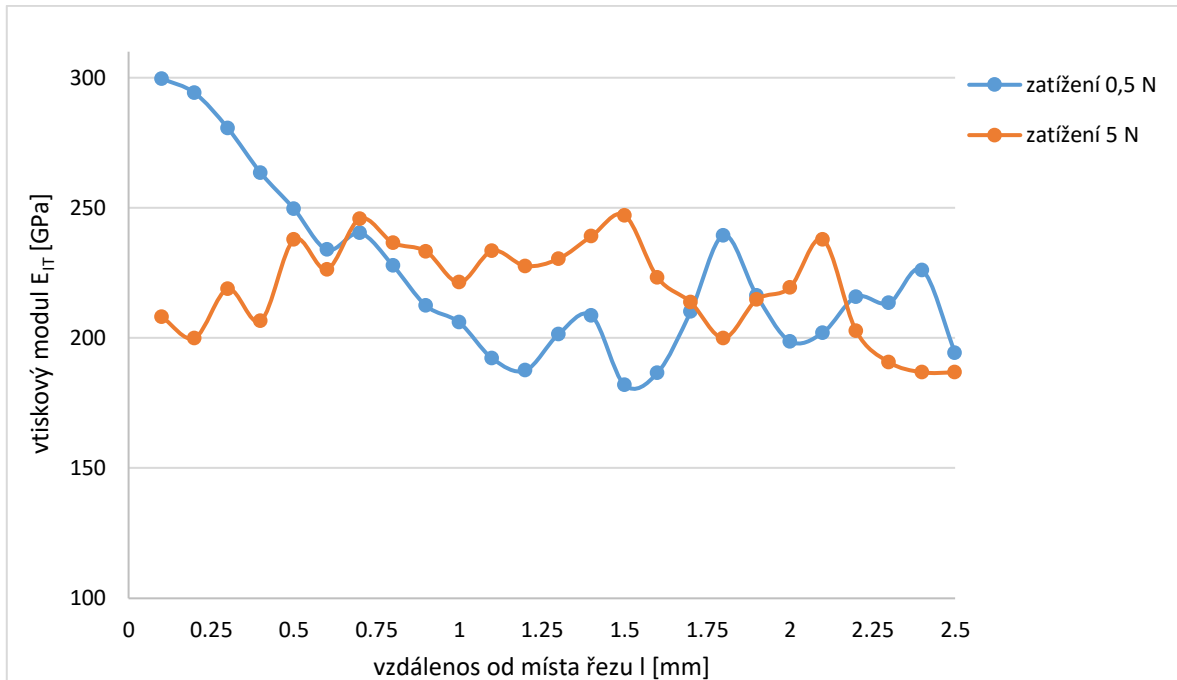
Obr. 31: Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušební zatížení 0,5 N



Obr. 32: Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N



Obr. 33: Graf závislosti modulu pružnosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení



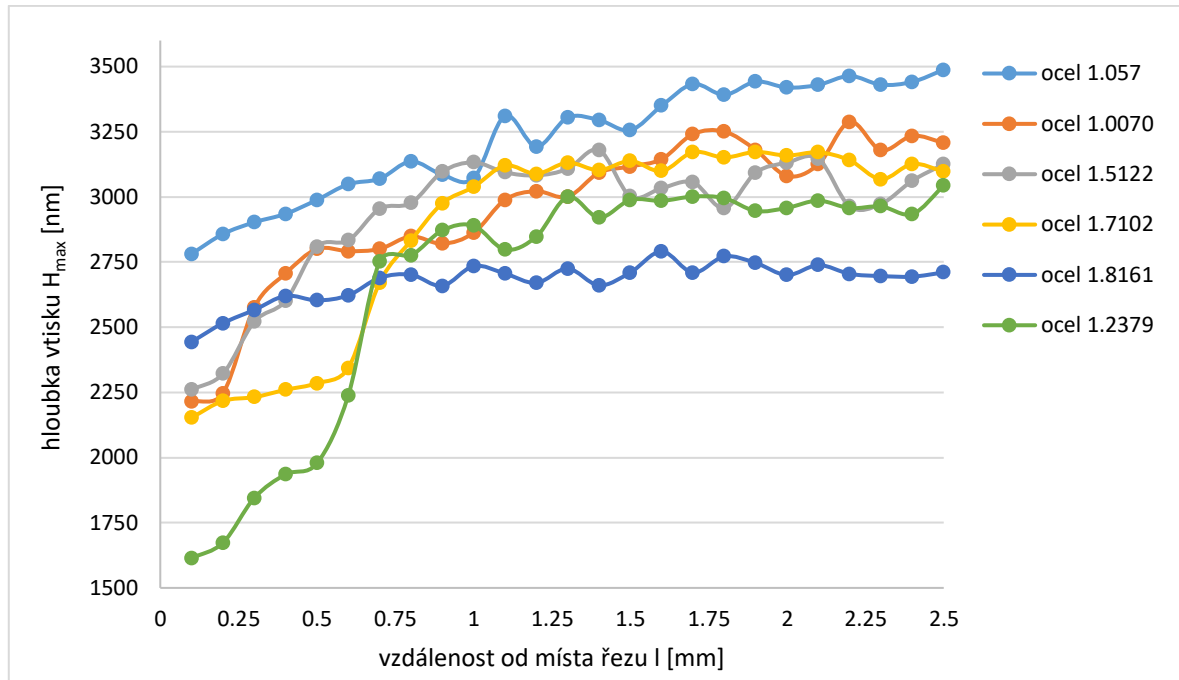
Obr. 34: Graf závislosti modulu pružnosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení

Instrumentovaná zkouška tvrdosti při dvou zkušebních zatíženích byla využita k zjištění vtiskového modulu u testovaných druhů ocelí. Při menším zatížení 0,5 N se modul pohybuje v průměru kolem hodnoty 220 GPa. U zatížení 5 N se podobný průběh posouvá k nižším hodnotám, přibližně 165 GPa. Vliv teplotního ovlivnění při dělení materiálu je téměř neznamatelný v rozsahu celé měřené délky. Z grafů (obr. 31, 32, 34) lze vypořadovat, že výkyvy hodnot jsou nezávislé na vzdálenosti od místa řezu. U zatížení 0,5 N jsou výkyvy větší.

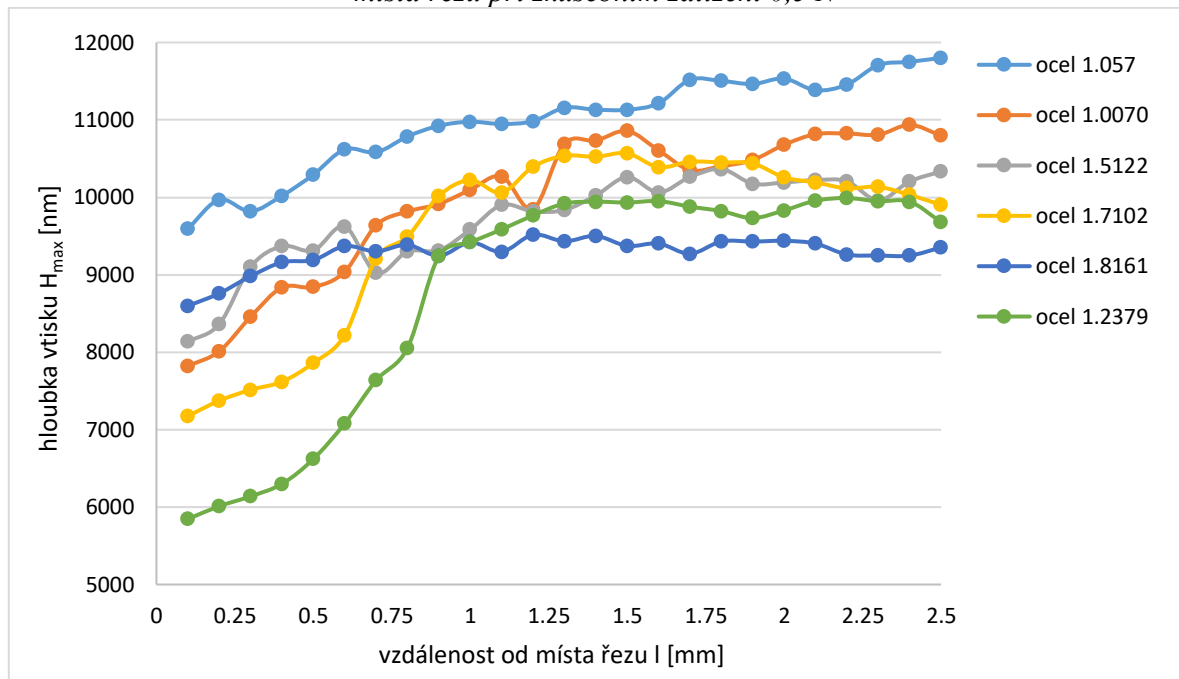
#### 6.2.4 Maximální hloubka vtisku ( $H_{max}$ )

Při instrumentované zkoušce tvrdosti indentor proniká do povrchu materiálu. Do jaké hloubky v různých vzdálenostech od místa řezu se indentor vtlačí nám udává údaj maximální hloubka v tisku a udává se v milimetrech.





Obr. 35: Graf závislosti maximální hloubky vtisku indentoru do materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebnímu zatížení 0,5 N



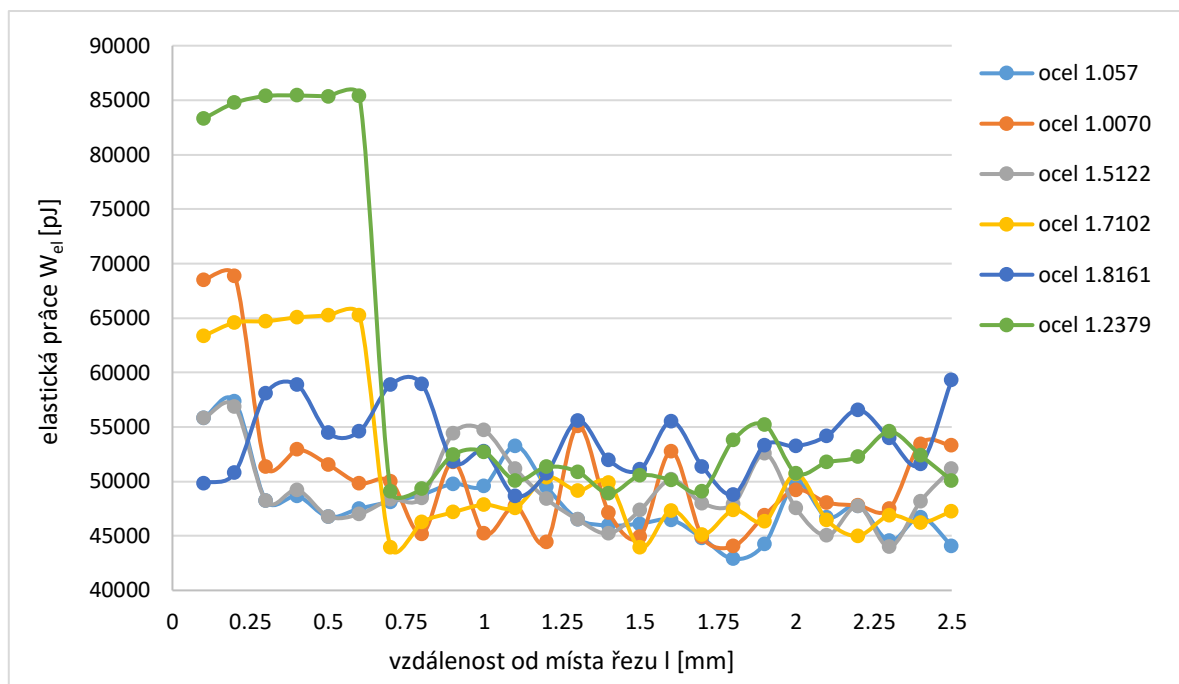
Obr. 36: Graf závislosti maximální hloubky vtisku indentoru do materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebnímu zatížení 5 N

Jedním ze zjišťovaných parametrů z provedené instrumentované zkoušky tvrdosti byla maximální hloubka vtisku indentoru. Maximální hloubka vtisku závisí na tvrdosti materiálu tedy jeho schopnosti klást odpor vnikajícímu tělesu. Grafy (obr.35, 36) vypadají tedy podobně jako grafy tvrdosti, ale s opačnou tendencí růstu. Teplotně ovlivněná oblast lze pozorovat do 0,5 mm od místa řezu při zatížení 0,5 N a při vyšším zatížení 5 N u některých ocelí až do 0,75 mm. Maximální hloubka se výrazně liší při různých zkušebních zatížení, čím větší je zatěžující síla tím roste hodnota hloubky. Nemenší hloubky při nižším zatížení

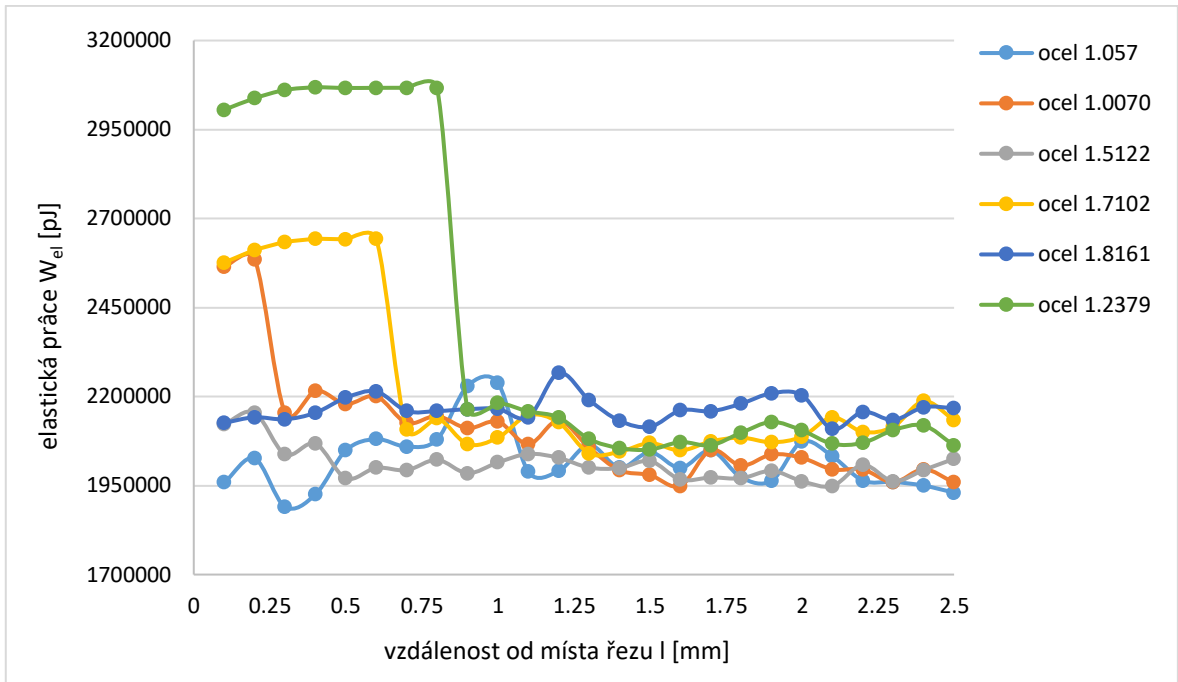
dosáhl indentor na zkušební tělese z oceli 1.2379 a to hodnoty 1614 nm. V místě nejdále od místa řezu byla naměřena hodnota 9680 nm. Rozdíl těchto dvou bodů je zhruba 8000 nm, z čehož vyplývá, že tato ocel byla v největší míře zakalena vysokým teplotním spádem při dělení materiálu a vytvoří se martenzická struktura, která se vyznačuje velkou tvrdostí. Naopak nejméně ovlivněné oceli byly opět 1.057 a 1.8161. Jejich naměřené hodnoty se od sebe po celé délce liší minimálně.

### 6.2.5 Elastická práce ( $W_{el}$ )

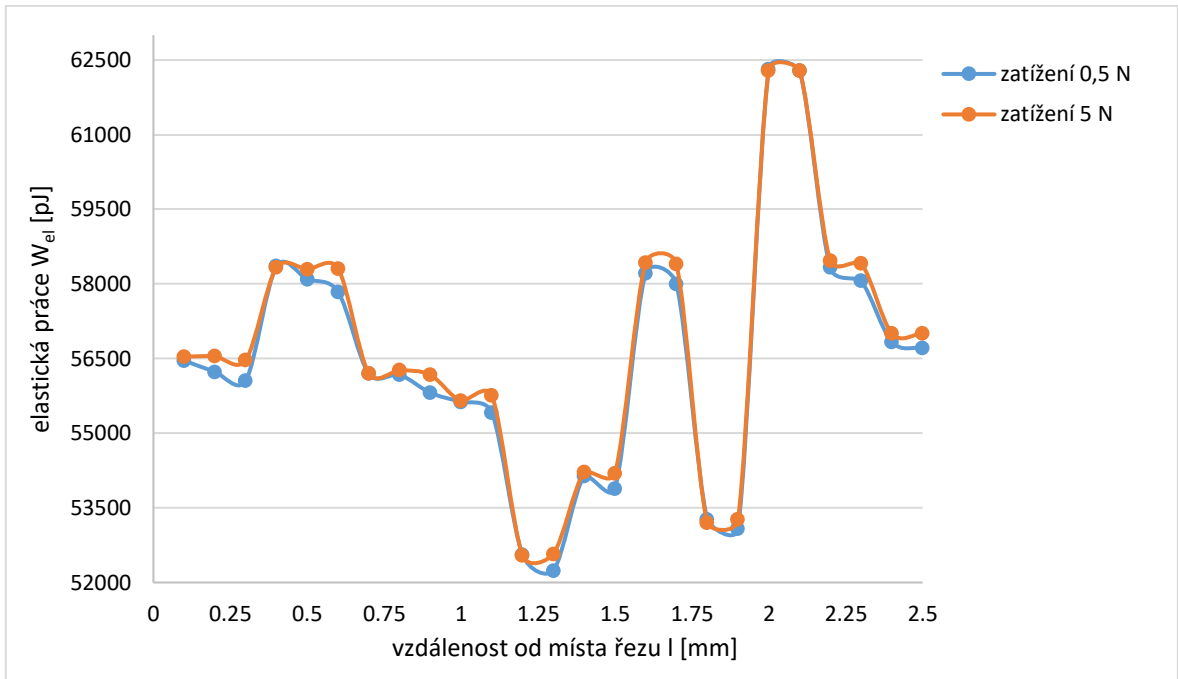
Elastická práce je zkoumaný parametr, který nám udává míru elasticity materiálu. Základní jednotka elastické práce je Joule [J].



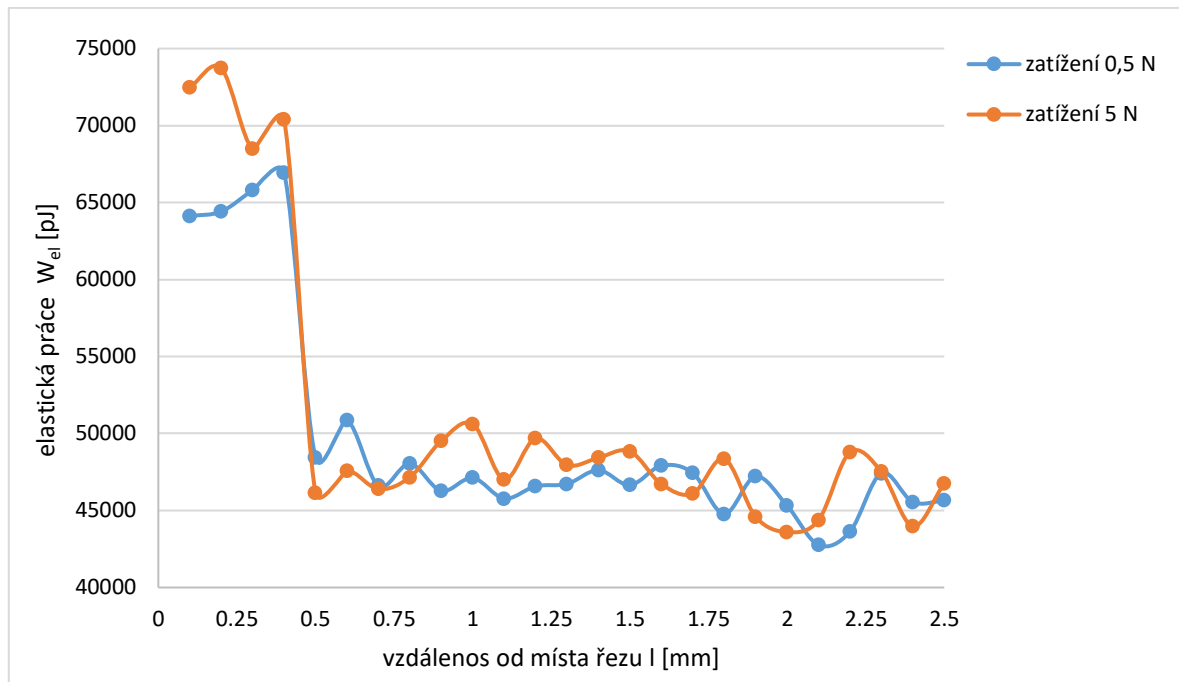
Obr. 37: Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N



Obr. 38: Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N



Obr. 39: Graf závislosti elastické práce nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení



Obr. 40: Graf závislosti elastické práce oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení

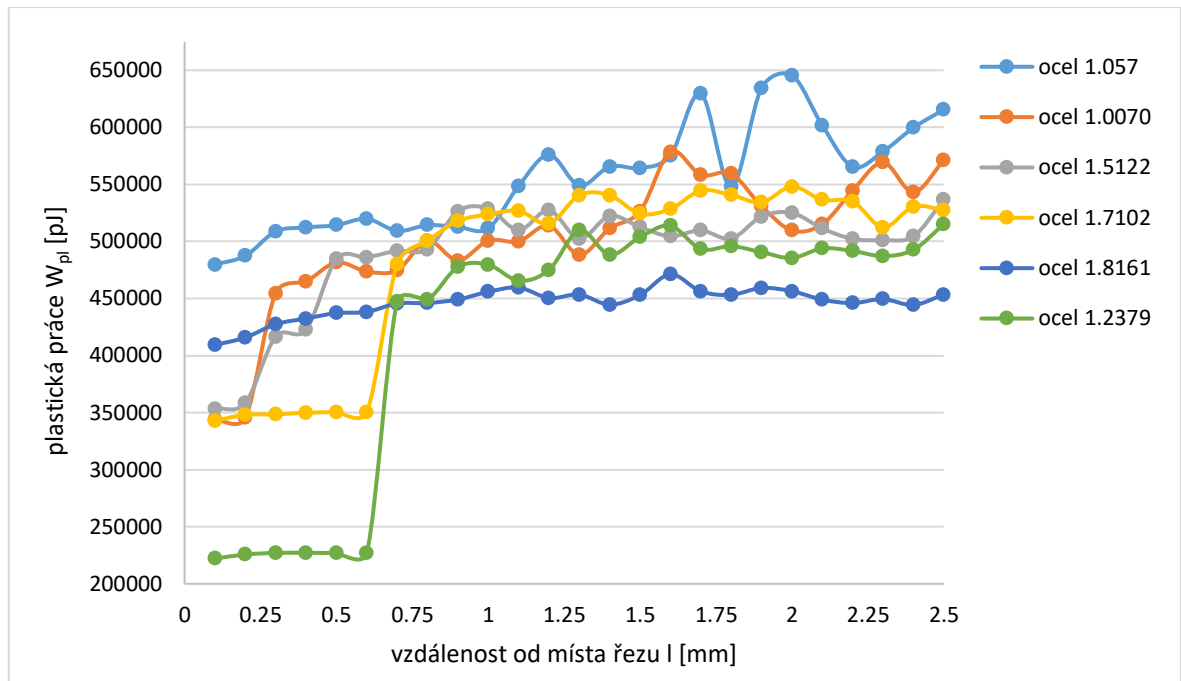
Instrumentovanou zkouškou tvrdosti při dvou zkušebních zatížení 0,5 a 5 N byla změřena elastická práce vybraných ocelí. Průběhy elastické práce jsou v obou případech velmi podobné jak lze vidět na grafech (obr.37,38). Největší rozdíl jsou řády ve kterých se naměřené data pohybují a to v závislosti na velikosti zatěžovací síly. U menšího zatížení 0,5 N se naměřená data vyskytují v řádu desetitisíců, zatímco u větší síly 5 N stoupnou řády na miliony. Tohle neplatí pro případ nerezové oceli 17 460 a pro ocel 1.7102, která byla řezána plazmou. Teplotní ovlivnění lze pozorovat nejvíce ve vzdálenostech do 0,3 mm u většiny materiálů. U oceli 1.2379 a 1.7102 je ovlivněná vzdálenost až do 0,75 mm podobně jako u předchozích měřených parametrů. Při zatížení 0,5 N se elastická práce pohybuje v rozmezí 45 000-55 000 pJ. U zatížená 5 N pak v průměru okolo 2 100 000 pJ. U nejvíce tepelně ovlivněné oceli 1.2379 byla maximální naměřená hodnota elastické práce při nižším zatížení 85 429,352 pJ ve vzdálenosti 0,4 mm od místa řezu a při vyšším zatížení 3 068 355 pJ ve stejné vzdálenosti.

U nerezové oceli pozorujeme naprosto odlišné chování. V teplotně ovlivněné oblasti jsou hodnoty v menším rozptylu, mezitím co v místech dál od místa řezu jsou hodnoty dál od sebe.

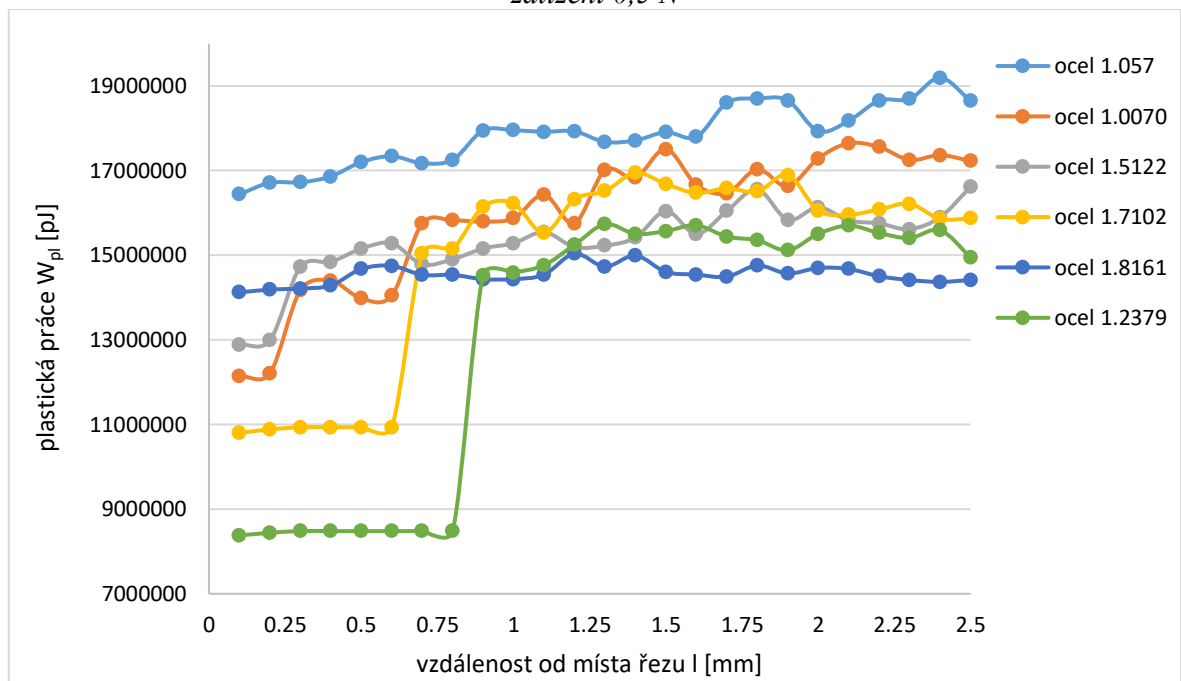
Hodnoty elastické práce se výrazně mění díky teplotním rozdílům při dělení materiálu a následným kritickým ochlazením a zakalením povrchu. To vede ke zvýšení tvrdosti a tím snížení elasticity materiálu.

### 6.2.6 Plastická práce ( $W_{pl}$ )

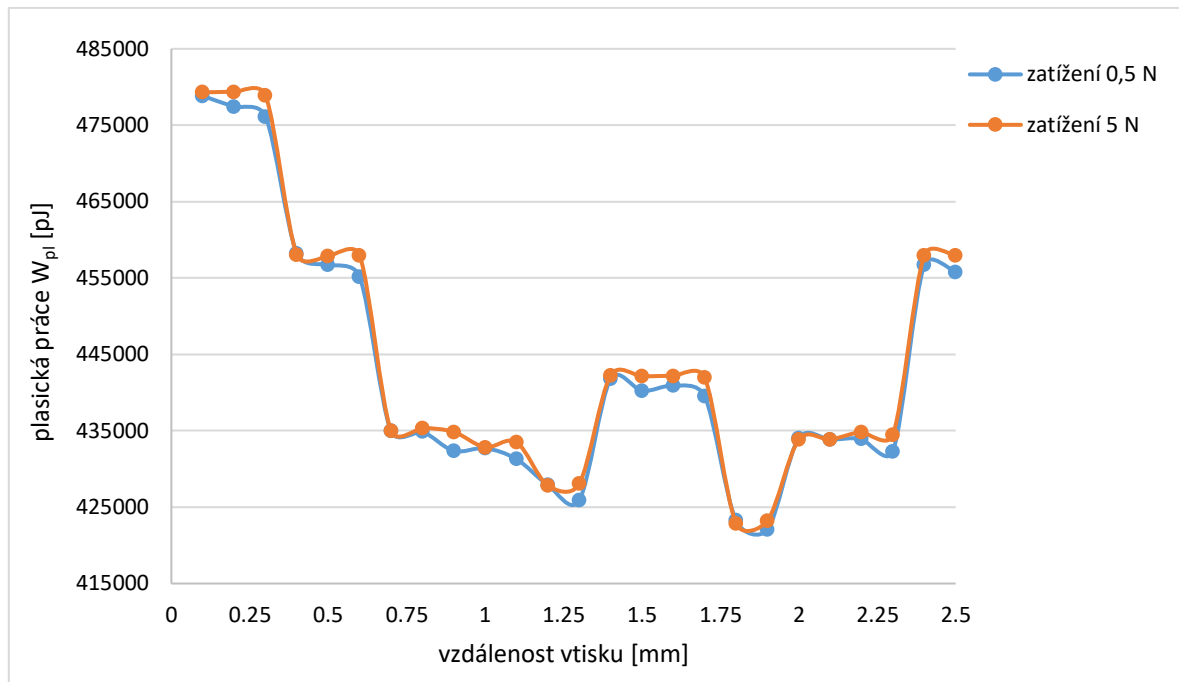
Plastická práce je zkoumaný parametr, který nám udává míru plasticity materiálu. Základní jednotka plastické práce je Joule [J].



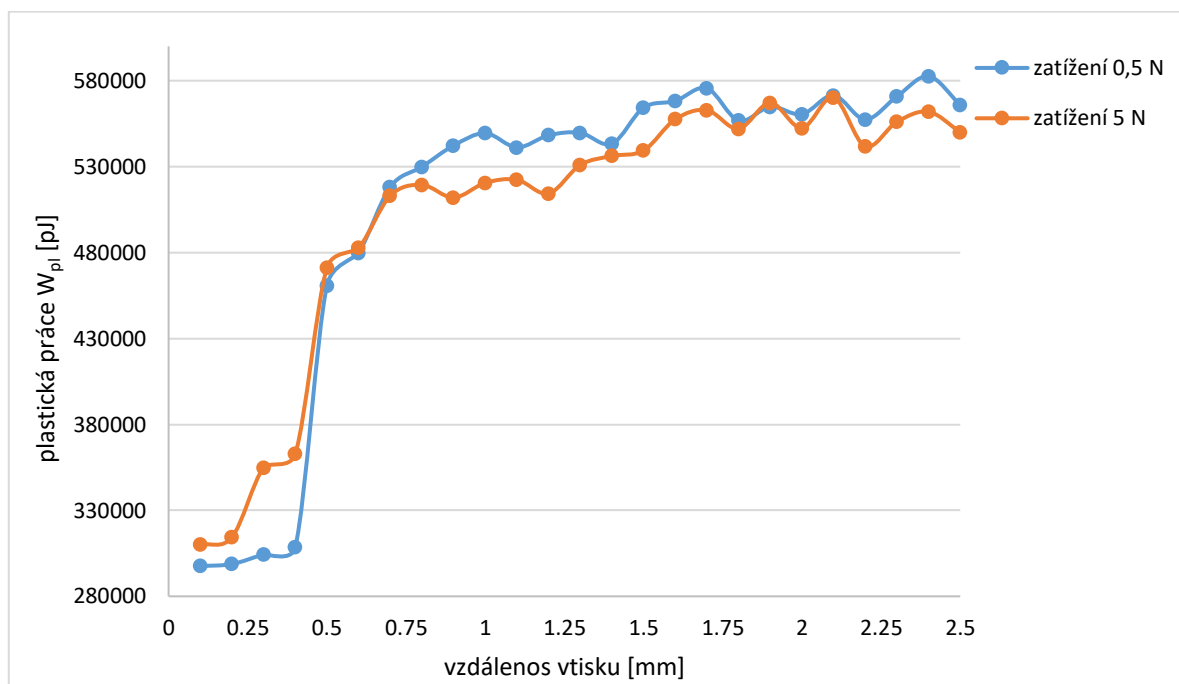
Obr. 41: Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N



Obr. 42: Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N



Obr. 43: Graf závislosti modulu pružnosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různých zkušebních zatíženích



Obr. 44: Graf závislosti modulu pružnosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různých zkušebních zatíženích

Pro zjištění poslední zkoumané vlastnosti a to plastické práce, byla také využita Instrumentovaná zkouška tvrdosti. Stejně jako v předchozích případech byla provedena při dvou zatíženích. Výsledky plastické práce při zatížení 0,5 N se pohybují v řádech statisíců a při 5 N v desítkách milionů. Pokud porovnáme grafy plastické a elastické práce je vidět, že jsou k sobě inverzní. U zatížení 0,5 N jsou data v neovlivněné oblasti v průměru kolem 500 000 pJ u zatížení 5 N pak 16 000 000 pJ. Nejvíce ovlivněné oceli jako v předchozím případě

byli 1.2379 a 1.7102. Nejvíce plastickým materiálem je ocel 1.057, která ve svém maximu při zatížení 0,5 dosahuje 645 630 pJ a při zatížení 5 N hodnoty 19 196 416 pJ. Teplotně ovlivněná oblast lze pozorovat do vzdálenosti 0,5 mm od místa řezu při zatížení 0,5 N a 0,75 mm při zatížení 5 N.

U oceli řezané plazmou se řády neliší se změnou zatížení a průběhy jsou obdobné jako u ostatních. Korozivzdorná ocel se vyznačuje specifickým chováním odlišným od všech ostatních materiálů. V teplotně ovlivněné oblasti do 0,6 mm od místa řezu plasticita klesá a dále se chová nepravidelně.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala vlivem teplotního ovlivnění při technologickém procesu dělení kovových materiálů nekonvenčními metodami, konkrétně laserem a plazmou, na výsledné mechanické vlastnosti těchto vybraných materiálů.

Šest různých mechanických vlastností bylo zkoumáno na vzorku druhů ocelí. Pomocí laseru byly řezány oceli 1.057, 1.0070, 1.5122, 1.7102, 1.8161, 1.2379, korozivzdorná 17 460 a pomocí plazmy dělená 1.7102.

Všechny zkoušené materiály byly nařezány na zkušební vzorky pomocí zařízení TRUMPF na předem dané rozměry. Po kompletním přichystání vzorků dle norem byla provedena instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI) při dvou zkušebních zatíženích. Z indentačních křivek jsme z programu dostali výsledky měření. Všech šest parametrů bylo zpracováno číselně a do grafů v programu Microsoft Excel. Z takto vypracovaných grafů se následně určili vzdálenosti, do jakých byly materiály teplotně ovlivněné.

Z naměřených dat bylo patrné, že nejvíce teplotně ovlivněná oblast byla v rozsahu do 0,5 mm od místa řezu. Výjimku tvořila pouze nerezová ocel 17 460. Změnu vlastností v ovlivněné oblasti způsobil vysoký rozdíl teplot mezi místem řezu a teplotou okolního prostředí. Teplotní spád a kritická rychlost ochlazování způsobila zakalení povrchu oceli. Kalením dochází ke změně struktury materiálu, zvyšuje se jeho tvrdost. Jednotlivé oceli a rozsah jejich změn po teplotním ovlivnění závisí na jejich chemickém složení. Nejvyšší roli hraje obsah uhlíku a až dále pak další legující prvky.

Ocel 1.057 je z vybraných vzorků jednou z nejméně ovlivněnou ocelí. Obsah uhlíku této oceli je maximálně 0,2 %, proto zakalení a změny mechanických vlastností jsou u ní minimální. Nejvyšší naměřenou hodnotou tvrdosti podle Vickerse v místě řezu byla 258,801 HV, což odpovídá struktuře perlitu.

Ocel 1.0070 v teplotně neovlivněné má strukturu perlitu do vzdálenosti 0,5 mm od místa řezu mění z důvodu zakalení strukturu na bainitickou. Nejvyšší naměřená hodnota při zatížení 0,5 N byla 446,675 HV a průměrná hodnota se pohybuje kolem 210 HV.

Ocel 1.5122 s obsahem uhlíku kolem 0,35 % nebyla podle výsledků měření nijak extrémně ovlivněna. Naměřené maximum tvrdosti podle Vickerse bylo 407 HV. V neovlivněné oblasti pak průměrně 200 HV. Do vzdálenosti 0,3 mm proběhla tedy změna struktury z perlitické na bainitickou.

Vzorky oceli 1.7102, které byli děleny laserem vykazovali druhou největší změnu vlastností. V oblasti blízké řezu se zakalením vyskytovala dolní bainitická struktura. Maximální



hodnoty Vickersovy tvrdosti vzorků stejného materiálu dělené plazmou se vyšplhali až k 600 HV a tím se struktura změnila až na martenzickou. Tato změna je dána větší teplotou při řezání plazmou.

U oceli 1.8161 nebylo pozorováno výrazné ovlivnění. V místě řezu při zatížení 0,5 N byly naměřeny hodnoty 347,964 HV. Nastala tedy přeměna struktury. Za vyššího zatížení ale struktura zůstala stále perlitická, protože naměřené maximum nepřesáhlo tvrdost 300 HV.

Ocel 1.2379 byla z testovaných vzorků nejvíce ovlivněná. Absolutní maximum tvrdosti bylo 887,282 HV. Průměrná tvrdost ve vzdálenějších místech byla 230 HV. Takto velké změny tvrdosti jsou způsobeny vysokým obsahem uhlíku, až 1,6 %, v oceli.

Korozivzdorná ocel 17 460 u tohoto materiálu byly pozorovány skokové změny mezi sousedními hodnotami hlavně v místech dále od řezu. V tepelně ovlivněné oblasti by se dalo říct, že tendence byly spíše opačné než u všech ostatních materiálu, to znamená, že tvrdost se s přibližováním k místu řezu zmenšovala.

Pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti byli zjištěné i další parametry a to vtisková tvrdost, vtiskový modul, maximální hloubka vtisku, plastická a elastická práce. Obdobou Vickersovy tvrdosti je tvrdost vtisková, která se liší jednotkami ve kterých se udává (Pa). S tvrdostí je úzce spjatá maximální hloubka vtisku. Tyto dvě vlastnosti jsou k sobě inverzní, což znamená, že čím větší má materiál tvrdost tím menší pak bude dosažená hloubka vtisku. Z naměřených dat bylo zjištěno, že plasticita materiálu se se zvyšující tvrdostí snižuje a naopak elasticita materiálu roste.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [4] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
- [6] 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.
- [7] DILLINGER, Josef. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [8] OVSÍK, M. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2013. 33 s. Dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
- [9] DUŠEK, J. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008. 17 s. Dizertační práce. Masarykova univerzita v Brně.
- [10] ČSN EN ISO 14577-1 *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda*, Říjen 2002. 31 s.
- [11] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. 2016: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
- [12] LUKOVICS, I. *Konstrukční materiály a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, 1992. 273 s.
- [13] SCHATZ, Miroslav, VONDRÁČEK, Petr. *Zkoušení polymeru. 1. vyd.* Praha: SNTL-nakladatelství technické literatury, 1979. 264 s.
- [14] ČSN 41 1483 *Ocel 11 483*. Český normalizační institut, Praha, 1994.
- [15] ČSN 41 1700 *Ocel 11 700*. Český normalizační institut, Praha, 1994.

- [16] ČSN 41 3240 Ocel 13 240. Český normalizační institut, Praha, 1994.
- [17] ČSN 41 4240 Ocel 14 240. Český normalizační institut, Praha, 1994.
- [18] ČSN 41 5261 Ocel 15 261. Český normalizační institut, Praha, 1994.
- [19] ČSN 41 9573 Ocel 19 573. Český normalizační institut, Praha, 1994.
- [20] ČSN 41 7460 Ocel 17 460. Český normalizační institut, Praha, 1994.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

A	[mm <sup>2</sup> ]	plocha povrchu vtisku
Al		hliník
Au		zlato
C		uhlík
C <sub>IT</sub>		vtiskové tečení
CO <sub>2</sub>		oxid uhličitý
Cu		měď
ČSN	[mm <sup>2</sup> ]	česká státní norma
D	[mm]	průměr kuličky
D		průměr vtisku kuličky
DSI	[N]	instrumentovaná zkouška tvrdosti
E		modul pružnosti
E <sub>r</sub>		redukovaný modul
E*		komplexní modul
F	[N]	vtlačovací síla
Fe		železo
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		oxid železitý
Fe <sub>3</sub> C		karbid železa
H	[mm]	hloubka vtisku
HB		tvrdost podle Brinella
He		helium
H <sub>IT</sub>	[Pa]	vtisková tvrdost
HM		tvrdost podle Martense
H <sub>max</sub>	[mm]	maximální hloubka vtisku

---

HR		tvrdost podle Rockwella
HV		tvrdost podle Vickerse
K	[mm]	materiálový koeficient
l		vzdálenost od místa řezu
Mn		mangan
N		číslo měření
N <sub>2</sub>		dusík
Ni		nikl
P		fosfor
Pb		olovo
PVC		polyvinilchlorid
R <sub>rr</sub>		vtisková relaxace
S		síra
Si		křemík
t	[s]	čas indentace
u	[mm]	aritmetický průměr délek úhlopříček vtisku
W		wolfram
W <sub>el</sub>	[J]	elastická práce
W <sub>pl</sub>	[J]	plastická práce
Zn		zinek

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: diagram konstrukčních materiálů [1] .....</i>	8
<i>Obr. 2: rozdělení kovových materiálů [7] .....</i>	9
<i>Obr. 3: Rovnovážený binární diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C [2] .....</i>	11
<i>Obr. 4: základní rozdělení ocelí [2] .....</i>	11
<i>Obr. 5: Schéma značení ocelí dle ČSN EN 10027-2 [5] .....</i>	13
<i>Obr. 6: technologické a technické parametry laseru [4].....</i>	15
<i>Obr. 7: výstupní výkony režimů [4] .....</i>	16
<i>Obr. 8: schéma řezání laserem [6].....</i>	16
<i>Obr. 9: schéma řezání vodním paprskem, .....</i>	18
<i>Obr. 10: schéma řezání plasmou [6].....</i>	20
<i>Obr. 11: Porovnání pracovního diagramu při statické a dynamické zkoušce [4] .....</i>	22
<i>Obr. 12: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Vickerse [5] .....</i>	24
<i>Obr. 13: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Brinella [5] .....</i>	25
<i>Obr. 14: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Rockwela [5] .....</i>	26
<i>Obr. 15: zkoušky tvrdosti [5] .....</i>	27
<i>Obr. 16: Obecné schéma pro značení zkoušky tvrdosti podle Martense [10] .....</i>	29
<i>Obr. 17: znázornění vtiskového tečení [8].....</i>	32
<i>Obr. 18: vtisková relaxace [8].....</i>	32
<i>Obr. 19: Přesná automatická pila BUEHLER IsoMet 4000 .....</i>	35
<i>Obr. 20: Stroj na zalisování vzorků Simpli-Met 1000 .....</i>	36
<i>Obr. 21: Leštička BUEHLER EcoMet 250 PRO .....</i>	36
<i>Obr. 22: Měřicí přístroj MicroCombi Tester (MHT<sub>3</sub>) .....</i>	40
<i>Obr. 23: Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N .....</i>	54
<i>Obr. 24: Graf závislosti vtiskové tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N .....</i>	54
<i>Obr. 25: Graf závislosti vtiskové tvrdosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení.....</i>	55
<i>Obr. 26: Graf závislosti vtiskové tvrdosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	55
<i>Obr. 27: Graf závislosti Vickersovy tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N .....</i>	57

<i>Obr. 28: Graf závislosti Vickersovy tvrdosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 29: Graf závislosti Vickersovy tvrdosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 30: Graf závislosti Vickersovy tvrdosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 31: Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 32: Graf závislosti modulu pružnosti materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 33: Graf závislosti modulu pružnosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 34: Graf závislosti modulu pružnosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 35: Graf závislosti maximální hloubky vtisku indentoru do materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 36: Graf závislosti maximální hloubky vtisku indentoru do materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N .....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 37: Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N .....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 38: Graf závislosti elastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 39: Graf závislosti elastické práce nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 40: Graf závislosti elastické práce oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 41: Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 0,5 N .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42: Graf závislosti plastické práce materiálů na vzdálenosti od místa řezu při zkušebním zatížení 5 N .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 43: Graf závislosti modulu pružnosti nerezové oceli 17 460 na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 44: Graf závislosti modulu pružnosti oceli 1.7102 řezané plazmou na vzdálenosti od místa řezu při různém zkušebním zatížení .....</i>	<i>67</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1.: Typy zkoušek a rozsahy použití podle Vickerse [5] .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2.: Stupnice tvrdosti podle Rockwella [5] .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 3.: Tvrdost strukturních složek .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 4.: Chemické složení oceli 1.057 [14] .....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 5.: Chemické složení oceli 1.057 [15] .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 6.: Chemické složení oceli 1.5122 [16] .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 7.: Chemické složení oceli 1.7102 [17] .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 8.: Chemické složení oceli 1.8161 [18] .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 9.: Chemické složení oceli 1.2379 [19] .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 10.: Chemické složení oceli 1.2379 [20] .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 11.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.057 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 12.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.057 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 13.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.0070 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 14.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.0070 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 15.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.5122 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 16.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.5122 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 17.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 18.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 19.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.8161 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 20.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.8161 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 21.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.2379 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 22.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.2379 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 23.: Naměřené hodnoty pro ocel 17 460 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 24.: Naměřené hodnoty pro ocel 17 460 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 25.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 0,5N .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 26.: Naměřené hodnoty pro ocel 1.7102 při zkušebním zatížení 5N .....</i>	<i>53</i>



## SEZNAM PŘÍLOH

PI – CD disk