

Výzkum ovlivnění povrchové vrstvy při řezání laserem měřením  
mikrotvrdosti

Adam Dočkal

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adam Dočkal**

Osobní číslo: **T130057**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Výzkum ovlivnění povrchové vrstvy při řezání laserem měřením mikrotvrdosti**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních těles pro experiment
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených hodnot



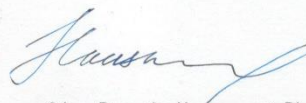
Rozsah bakalářské práce:  
Rozsah příloh:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:  
**Dle doporučení vedoucího BP**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Mañas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání bakalářské práce: **8. ledna 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 3. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



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

Příjmení a jméno: DOČKAL ADAM Obor: TZ

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 19.5.2016

  
.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce řeší problém ovlivnění povrchové vrstvy ocelí při řezání laserem. Pro experimentální část bylo vybráno 5 různých ocelí s rozdílným obsahem uhlíku. Vybrané oceli byly rozřezány laserem a ovlivnění povrchové vrstvy bylo zjištěno pomocí instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti. Bylo zjištěno, že při řezání laserem dochází k ovlivnění povrchové vrstvy.

Klíčová slova: Laser, řezání laserem, mikrotvrdomost

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on the effect that laser has on steel surface during cutting. I picked 5 types of steel with different fractions of carbon for my experiment. The chosen steels were cut by laser and the effect it had was measured by a machine that measures microhardness. It was found out that cutting steel with laser causes the surface layer to change.

Keywords: Laser, Laser cutting, microhardness

Děkuji vedoucímu své práce doc. Ing. Davidu Maňasovi Ph. D. za jeho vedení, rady a zkušenosti při vypracování mé práce.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 ODDĚLOVANÍ MATERIÁLU</b> .....	<b>13</b>
1.1 ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM .....	13
1.1.1 HISTORIE .....	13
1.1.2 PRINCIP .....	13
1.1.3 VÝHODY A NEVÝHODY .....	13
1.1.4 VYUŽITÍ.....	14
1.2 ŘEZÁNÍ PLAMENEM .....	15
1.2.1 HISTORIE .....	15
1.2.2 PRINCIP .....	15
1.2.3 VÝHODY .....	15
1.2.4 VYUŽITÍ.....	15
1.3 ŘEZÁNÍ PLAZMOU.....	16
1.3.1 HISTORIE .....	16
1.3.2 PRINCIP .....	16
1.3.3 VÝHODY .....	16
1.3.4 VYUŽITÍ.....	16
<b>2 KALENÍ</b> .....	<b>17</b>
2.1 BAINITCKÉ KALENÍ .....	17
2.1.1 VÝHODY .....	17
2.1.2 APLIKACE A MATERIÁLY .....	17
2.1.3 TECHNOLOGIE .....	17
2.2 INDUKČNÍ KALENÍ.....	18
2.2.1 VÝHODY .....	18
2.2.2 APLIKACE A MATERIÁLY .....	18
2.2.3 TECHNOLOGIE .....	18
2.3 IZOTERMICKÉ KALENÍ.....	19
2.3.1 VÝHODY .....	19
2.3.2 APLIKACE A MATERIÁLY .....	19
2.3.3 TECHNOLOGIE .....	19
2.4 KALENÍ POD LISEM.....	19
2.4.1 VÝHODY .....	19
2.4.2 APLIKACE A MATERIÁLY .....	19
2.4.3 TECHNOLOGIE .....	20
2.5 NEUTRÁLNÉ KALENÍ.....	20



2.5.1	VÝHODY.....	20
2.5.2	APLIKACE A MATERIÁLY .....	20
2.5.3	TECHNOLOGIE .....	20
2.6	DVOJNÍ KALENÍ .....	21
2.6.1	VÝHODY.....	21
2.6.2	APLIKACE A MATERIÁLY .....	21
2.6.3	TECHNOLOGIE .....	21
2.7	TERMÁLNÍ KALENÍ.....	22
2.7.1	VÝHODY.....	22
2.7.2	APLIKACE A MATERIÁLY .....	22
2.7.3	TECHNOLOGIE .....	22
<b>3</b>	<b>MĚŘENÍ TVRDOSTI.....</b>	<b>23</b>
3.1	ZKOUŠKY MAKROTVRDOSTI.....	23
3.1.1	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE BRINELLA.....	23
3.1.2	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE ROCKWELLA.....	23
3.1.3	ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE .....	24
3.2	ZKOUŠKY MIKROTVRDOSTI .....	24
3.2.1	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI PODLE KNOOPA.....	24
3.2.2	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI PODLE VICKERSE .....	25
<b>4</b>	<b>PŘEHLED OCELÍ.....</b>	<b>26</b>
4.1	OCELI INGOTOVÉ .....	26
4.1.1	KONSTRUKČNÍ.....	26
4.1.2	NÁSTROJOVÉ .....	27
<b>5</b>	<b>ŘEZÁNÍ LASEREM.....</b>	<b>29</b>
5.1	HISTORIE .....	29
5.2	PRINCIP LASERU.....	30
5.3	PRINCIP ŘEZÁNÍ LASEREM.....	31
5.3.1	SUBLIMAČNÍ ŘEZÁNÍ .....	31
5.3.2	TAVNÉ ŘEZÁNÍ .....	31
5.4	TYPY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ.....	32
5.4.1	3D LASEROVÉ ŘEZÁNÍ .....	32
5.4.2	REMOTE CUTTING.....	32
5.5	VÝHODY .....	32
5.6	VYUŽITÍ .....	32
5.6.1	PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ .....	33
5.6.2	VYUŽITÍ V MEDICÍNĚ .....	34
<b>II.</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>37</b>
7.1	LABORATORNÍ PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	38
7.2	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI .....	39

<b>8</b>	<b>ČSN 411373 (S235JR, 1.0038)</b> .....	<b>40</b>
8.1	ZATÍŽENÍ 0,5N .....	40
8.2	ZATÍŽENÍ 1N .....	41
8.3	ZATÍŽENÍ 5N .....	43
<b>9</b>	<b>ČSN 411500 (E295, 1.0050)</b> .....	<b>45</b>
9.1	ZATÍŽENÍ 0,5N .....	45
9.2	ZATÍŽENÍ 1N .....	46
9.3	ZATÍŽENÍ 5N .....	48
<b>10</b>	<b>ČSN 412060 (C55, 1.1203)</b> .....	<b>50</b>
10.1	ZATÍŽENÍ 0,5N .....	50
10.2	ZATÍŽENÍ 1N .....	51
10.3	ZATÍŽENÍ 5N .....	53
<b>11</b>	<b>ČSN 414220 (16MNCR5, 1.7131)</b> .....	<b>55</b>
11.1	ZATÍŽENÍ 0,5N .....	55
11.2	ZATÍŽENÍ 1N .....	56
11.3	ZATÍŽENÍ 5N .....	58
<b>12</b>	<b>ČSN 414160 (55MNCR)</b> .....	<b>60</b>
12.1	ZATÍŽENÍ 0,5N .....	60
12.2	ZATÍŽENÍ 1N .....	61
12.3	ZATÍŽENÍ 5N .....	63
<b>13</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>65</b>
13.1	ZATÍŽENÍ 0,5N .....	65
13.2	ZATÍŽENÍ 1N .....	67
13.3	ZATÍŽENÍ 5N .....	69
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>72</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>744</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>755</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>766</b>

## ÚVOD

Zkoušky tvrdosti, nebo v mém případě mikrotvrdosti jsou v dnešní době velmi důležité. V dnešním světě je kladen velký důraz na znalost materiálů, vývoj se posouvá dopředu a člověk vyrábí stále větší (či menší) konstrukce, které jsou stále náročnější na materiál, proto musíme vědět, co který materiál vydrží a k čemu se hodí. Lidé sice svými základními smysly rozliší to, jestli se jedná o materiál tvrdý nebo měkký, ovšem současné obory potřebují měření mnohem sofistikovanější a přesnější. V mé práci budu v teoretické části probírat témata které souvisí s částí praktickou. Například oddělování materiálu, které je pro nás důležité právě proto abych věděl na jakém principu funguje laser, jehož efekty na oceli zkoumám, kalení, přehled ocelí, abychom věděli, do jakých tříd se použité oceli řadí a hlavně způsoby měření mikrotvrdosti, kterých je velmi mnoho a každou z nich používáme k různým nebo podobným cílům.

V části praktické se poté budu zabírat vyhodnocením dat, které jsem získal ze svých materiálů, přesněji ocelí. Tyto oceli byly řezány laserem a já budu zkoumat jak je jejich tvrdost tímto ovlivněna měřením mikrotvrdosti.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 ODDĚLOVANÍ MATERIÁLU

## 1.1 Řezání vodním paprskem

Řezání vodním paprskem je moderní, kvalitní a ekologická metoda obrábění široké palety materiálů.

### 1.1.1 Historie

Historie využití vodního paprsku pro řezání sahá do 50. let 20. století. Tehdy se začalo experimentovat s využitím síly vodního paprsku při řezání dřeva. Technologie byla vylepšena v 70. letech, kdy se při řezání začalo používat přidávání abraziva.

### 1.1.2 Princip

Podstatou dělení materiálů je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Tento proces je v podstatě stejný jako vodní eroze ale značně zrychlený a soustředěný do jednoho místa.

Vysokotlaké zařízení umožňuje stlačit vodu až na 4150 bar, ve směšovací komoře do vodního proudu přimístit abrazivní materiál a tuto směs prohnat tryskou světlosti jeden milimetr. Takto vytvořený vodní paprsek má pak dostatek energie, aby dokázal provádět řezy i v materiálech s velmi vysokou pevností, dále ve velmi měkkých, křehkých i houževnatých materiálech. Pohyb paprsku na souřadnicovém stole je řízen počítačem, čímž je umožněna velmi vysoká přesnost a opakovatelnost tvarových řezů.

Pohyb řezací hlavy a tedy i dráha řezu je řízena počítačem na základě předem sestaveného programu. Je možné tedy provést i ten tvarově nejnáročnější řez během jedné operace. V současné době se stále více uplatňuje 3D řezání s eliminací úkosů.

### 1.1.3 Výhody a nevýhody

a) Výhodou při řezání vysokotlakým vodním paprskem je řezání bez tepelného ovlivnění řezaného materiálu. Obráběný díl nevykazuje fyzikální, chemické ani mechanické změny a je následně snadno obrobitelný. Nástroj a materiál se nedotýkají.

- b) Minimální silové působení paprsku na řezaný materiál, nedochází ke vzniku mikrotrhlin. Řezy lze provádět v těsné blízkosti hrany materiálu a minimalizovat tak odpad
- c) Univerzálnost – paprsek dělí většinu materiálů při velkém rozsahu řezaných tloušťek, může dělit jak materiály měkké, lepivé, drolicí nebo i křehké.
- d) Řezání vodním paprskem je technologií vlídnou k životnímu prostředí. Při řezání nevznikají žádné neekologické zplodiny. Spotřeba vody na řezání je malá (závisí na tlaku a velikosti použité trysky). Z odpadní vody se při sedimentaci vyloučí nečistoty. Jako abraziva se používají netoxické látky, které mohou být recyklovány pro další použití. Použité abraziva může být bez problémů uloženo na skládku. Cena řezání je velmi příznivá.
- e) Nevýhodou je nevyhnutelný kontakt s vodou, což znamená, že kovové materiály se musí vhodně ošetřit. Dále také delší vysoušení nasákavých materiálů a možnost změny barvy či znečištění některých materiálů.

#### 1.1.4 Využití

Využití technologie řezání vodním paprskem je široké a používá se v řadě výrobních oborů. Mezi materiály běžně obráběné vodním paprskem patří například:

- a) plasty, gumy
- b) podlahové krytiny
- c) sklolaminát, kompozity
- d) elektroizolační, tepelněizolační hmoty
- e) mramor, žula, pískovec, sklo
- f) slitiny hliníku, titanu, mědi, niklu
- g) ocel konstrukční, legovaná, nástrojová, tepelně zpracovaná

## 1.2 Řezání plamenem

Řezání plamenem je vhodné pro silnější materiály a tvarování, převážně pro obrobky z ocele. Spočívá v ohřátí kovu na teplotu jeho spalování v proudu čistého kyslíku při teplotách pod bodem tavení, aniž by došlo k roztavení kovu

### 1.2.1 Historie

K plamenovému svařování vedl vynález hořáku pro kyslíko-vodíkový plamen. Poprvé bylo kyslíko-acetylenové svařování představeno v Paříži v roce 1903. Přesně 10 let poté byly představeny i první tlakové láhve pro acetylen, jež činily svařování plamenem více mobilní.

### 1.2.2 Princip

K řezání slouží hořák, obrobek, který je třeba řezat se nejdříve předeheje plamenem na zápalnou teplotu řezného materiálu. Potom se přidá proud kyslíku, který způsobí spalování materiálu. Při tomto spalování vzniká teplo, pomocí kterého se zahřívá místo řezu do hloubky. Struska se vyfoukne proudem kyslíku na spodní straně obrobku. Pohybem hořáku v daném směru vzniká řez.

### 1.2.3 Výhody

- a) Řezání plamenem je levné a jednoduché
- b) Lze jím řezat relativně tlusté stěny
- c) Může se řezat více řezáky a tak zvýšit produktivitu

### 1.2.4 Využití

- a) Při konstrukci nádrží – pro V a dvojitý V svar
- b) U ocelových konstrukcí – řezání nosníků pomocí plamene
- c) Ve strojírenství – převážně strojní řezání
- d) Při stavbě lodí – převážně programování strojní řezání

## 1.3 Řezání plazmou

Řezání plazmou veškerých vodivých materiálů je možné díky vysokým teplotám, kterých je plazma schopna dosáhnout (omezeně lze dělit i materiály nevodivé). V závislosti na fyzikálních vlastnostech materiálu lze dělit plechy o maximální tloušťce 250 mm, v praxi se však spíše jedná o tloušťky do 25 mm.

### 1.3.1 Historie

Tato technologie patří mezi ty novější, rozšiřuje se hlavně v posledních 15 letech. Základy o řezání plazmou však mají své základy necelých 100 let zpátky.

### 1.3.2 Princip

Mezi řezaným materiálem a tryskou se po přivedení elektrického napětí vytvoří elektrický oblouk. Z trysky pak vylétává velkou rychlostí (poháněnou tlakem) velmi horký ionizovaný plyn. Teploty mohou dosahovat až 30000°C a rychlost může být i nadzvuková. Složení plynu, jež proudí do trysky a které je následně obloukem zahříváno se liší dle užití, ale nejčastěji je používán argon, dusík, kyslík a jejich směsi.

### 1.3.3 Výhody

- a) Vyšší rychlost řezání než u řezání kyslíkem pro tenké a střední tloušťky
- b) Možnost řezání všech kovových materiálů
- c) Snadná automatizace a mechanizace
- d) Minimální ztrátový čas
- e) Vysoká kvalita řezání

### 1.3.4 Využití

- a) Plazma se využívá pro řezání středně silných ocelí



## 2 KALENÍ

Kalení je způsob tepelného zpracování feritických ocelí. Ocel se při něm ohřívá na kalící teplotu a následně se prudce ochlazuje. Cílem kalení je dosažení vylepšených schopností těchto ocelí, například abychom dosáhli mnohem vyšší tvrdosti (výrobku, nebo třeba jen jisté plochy u které tuto vlastnost chceme). Naopak se kalením stává výrobek více křehkým, ztrácí na houževnatosti.

### 2.1 Bainitcké kalení

Bainitické termální kalení je způsob tepelného zpracování pro středně až vysokouhlíkaté železné kovy jež vytvářejí strukturu zvanou bainit. Zvyšuje pevnost, houževnatost a dokáže snížit deformace. Obrobky se zahřejí a pak jsou hned rychle zchlazeny na teplotu nad začátek martenzitické proměny a ponechány při této teplotě dostatečnou dobu.

#### 2.1.1 Výhody

Tento proces kalení dává materiálu vlastnosti jako například:

- Vyšší tažnost, pevnost a houževnatost
- Rázová odolnost
- Snížení deformací (zejména u tenkých obrobků)

#### 2.1.2 Aplikace a materiály

Toto kalení se používá hlavně k tvrzení ocelí rozsahu 35-55 HRC, u nichž je žádaná lepší houževnatost a zmenšení deformací. Proces se hojně používá v automobilovém průmyslu pro různé díly kde je potřeba maximální pružnost a houževnatost.

Materiály, jež se na toto kalení hojně používají jsou například SAE 1045 až 1095, 4130, 4140, 5160, 6150 a tak dále.

#### 2.1.3 Technologie

Ocel se zahřeje na teplotu kalení, obvykle mezi 790°C a 915°C, kalí se v lázni (roztavená sůl,..) při zachování konstantní teploty, většinou v rozsahu 260°C až 370°C. Tyto podmínky se musejí po nějakou dobu zachovat než proběhne přeměna na bainitickou mikrostrukturu, nakonec se ocel zchladí na pokojovou teplotu

## 2.2 Indukční kalení

Proces vytvrzení povrchu používaný ke zvýšení odolnosti vůči opotřebením, povrchové tvrdosti a prodloužení únavové životnosti díky vytvrzení povrchové vrstvy při zachování nedotčené mikrostruktury jádra.

### 2.2.1 Výhody

- Vhodné pro vysoké zatížení (indukce poskytuje vysokou povrchovou tvrdost a hloubku prokalení)
- Mez únavy je vyšší
- Indukční zpracování se provádí vždy na jednom výrobku, takže je snazší předvídat rozměrové změny

### 2.2.2 Aplikace a materiály

Toto kalení se užívá pro vylepšení mechanických vlastností v určitých oblastech, například lepší odolnost proti opotřebením a únavě nebo také lepší pevnostní charakteristiky. Mezi častá použití patří hnací kola, závěsy kol, komponenty motoru, hřídele, osy, ražené díly a další, zejména tedy symetrické díly.

Používané materiály jsou různorodé a mohou to být například oceli uhlíkové, legované a nerezové nebo také šedé litiny, práškové kovy a jiné.

### 2.2.3 Technologie

Tepelně zpracované díly se umístí do měděné cívky a jsou zahřáty na teplotu vyšší, než je jejich teplota transformace pomocí střídavého proudu procházejícího cívkou. Střídavý proud v cívce indukuje střídavé magnetické pole v dílu, což způsobuje zahřívání vnějšího povrchu dílu na teplotu nad teplotní rozsah transformace.

## 2.3 Izotermické kalení

Tento způsob kalení snižuje zbytková vnitřní pnutí a deformace plynoucí z nehomogenní transformace a tepelného rázu typického pro běžná kalení v oleji.

### 2.3.1 Výhody

- Snižuje se zbytkové pnutí a deformace v porovnání s normálním kalením
- Může umožnit tepelné zpracování dílů bez nutnosti dalšího opracování
- Minimalizuje požadavky na další zpracování

### 2.3.2 Aplikace a materiály

- Aplikuje se pro vysoce pevné slitinové oceli
- Používá se často na díly u letadla

### 2.3.3 Technologie

Minimalizace zbytkových pnutí a deformací a zároveň dosažení mechanických vlastností (tvrdosti, pevnosti v tahu, houževnatosti při lomu apod.) odpovídajících těm, kterých lze dosáhnout běžným kalením, a výrazně snižuje riziko tvoření trhlin během tepelného zpracování.

## 2.4 Kalení pod lisem

Řízené tvrzení ve formách s úzkou tolerancí součástí, jako jsou převodová kola, drážky ložisek apod. Zajišťuje dobré řízení rozměrů a homogenní kalení.

### 2.4.1 Výhody

- Preferovaný postup pro velké oblé nebo ploché díly
- Eliminace deformací a tím i redukce následného obrábění po tepelném zpracování
- Důležitá je rovněž úspora peněz

### 2.4.2 Aplikace a materiály

Mezi typické příklady použití patří velké oblé nebo ploché díly, tj. převodová kola, drážky ložisek (zejména velké díly, např. pro větrné elektrárny či těžké stavební stroje), spojky, listy pil, řezné kotouče apod.

### 2.4.3 Technologie

Cílem kalení pod lisem je zachování tvaru kruhových nebo plochých zahřátých obrobků při kalení. Během procesu kalení je zachován tvar součásti pomocí řízené síly lisu a formy na kalení. Svorky držící součást mají otvory, kterými může protékat kalicí olej a tím součást chladit. Sada forem na kalení redukuje či zcela eliminuje deformaci velikosti, oblosti, kuželovitosti a plochosti.

## 2.5 Neutrální kalení

Neutrální kalení, které se rovněž označuje jako martenzitické kalení nebo jen zakalení, je tepelné zpracování používané k dosažení vysoké tvrdosti/pevnosti oceli. Skládá se z austenitizace, rychlého ochlazení a popuštění, za účelem získání popuštěného martenzitu či bainitické struktury.

### 2.5.1 Výhody

- Díly s vysokým namáháním mohou získat dobrou kombinaci pevnosti, houževnatosti a případné odolnosti vůči teplotě
- Díly mohou být lehčí a tužší díky vyšší pevnosti
- Nástroje získají požadovanou odolnost vůči opotřebení, odolnost proti žáru, avšak udrží si svou houževnatost

### 2.5.2 Aplikace a materiály

Používá se u dílů pod velkou zátěží, například hřídele, nosné tyče, rámy apod. Dále také u pružin.

- Díly z nerezových ocelí vyžadují vysokou odolnost vůči korozi (potravinářství a medicína)

### 2.5.3 Technologie

- Prvním krokem je zahřátí na kalicí teplotu, která se podle typu oceli pohybuje mezi 800 °C a 1220 °C.
- Druhým krokem je výdrž kalicí austenitizační teplotě.
- Třetím krokem je rychlé ochlazení z teploty austenitizace do studeného prostředí.

## 2.6 Dvojní kalení

Zpracování, při kterém je díl vystaven dvěma kompletním operacím kalení nebo nejprve žihání a následně tvrzení. Obvykle se provádí při téže teplotě, avšak ne vždy, za účelem zjemnění zrnitosti oceli po prvním dlouhém zpracování austenitizací, nebo po dlouhém procesu nauhličování u velkých cementačních hloubek.

Někdy je chybně za dvojní tvrzení označována dlouhá austenitizace či dlouhá cementace následovaná pomalým kalením nebo pomalým chlazením vně ohřívací komory (jakou u žihání) a opětovná austenitizace následovaná kalením (rychlým ochlazením).

Dvojní kalení rovněž zahrnuje dvojní kalení při cementaci součásti, čímž je provedeno první kalení z teploty kalení jádra součásti a druhé kalení z teploty kalení vhodné pro vrstvu

### 2.6.1 Výhody

- Zjemnění zrnitosti a mikrostruktury jádra součástí, nabývání při dlouhém čase při vysoké teplotě
- Omezené vzniku zbytkového austenitu v cementované vrstvě
- Snížení či omezené úrovně deformace dílů složitých tvarů
- Přesnější dosažení tvrdosti jádra a povrchu

### 2.6.2 Aplikace a materiály

Dvojní kalení se obecně používá v případě dlouhotrvající cementace nezbytné k získání velké hloubky cementované vrstvy nebo po dlouhotrvající austenitizaci. Mezi typické příklady použití lze zařadit kritická převodová kola pro letecký průmysl, velká převodová kola používaná ve větrných turbínách či stavební stroje nebo velké kované obrobky

### 2.6.3 Technologie

Jak u jednoduchého tak u dvojitého kalení lze před závěrečným kalením provést mezižihání cementovaných komponent. Díky tomuto mezižihání je možné odstranit uhlík uvolněný jako nadbytek uhlíku austenitu, jako je cementit, a vyvarovat se tak riziku tvorby zbytkového austenitu během následného procesu zpracování povrchu. Rovněž může použití mezižihání vést ke zmenšení deformace.

## 2.7 Termální kalení

Termální kalení je forma tepelného zpracování používaná jako přerušované kalení ocelí obvykle v lázni roztavené soli při teplotě těsně nad začátek martenzitické proměny. Cílem je pozdržet chlazení po dobu vyrovnání teploty celého obrobku. Tím je minimalizována deformace, tvorba trhlin a zbytkové pnutí.

### 2.7.1 Výhody

- Nižší tvorba trhlin v důsledku tepelného pnutí
- Nižší zbytkové pnutí kaleného obrobku, který má různou geometrii, hmotnost či velikost

### 2.7.2 Aplikace a materiály

Termální kalení se primárně používá k minimalizaci deformace a eliminaci tvorby trhlin. Legované oceli jsou obecně pro termální kalení vhodnější. Obecně platí, že stejných fyzikálních vlastností, jako má jakýkoliv ocelový obrobek či třída oceli kalená v oleji, lze dosáhnout pomocí termálního kalení.

Běžně se termálně kalí například tyto druhy ocelí: AISI 1090, AISI 4140, 300M atd.

### 2.7.3 Technologie

Termálně kalené díly se popouští stejným způsobem jako běžné kalené díly.

Ocel se termálně kalí prostřednictvím:

- Kalení z teploty austenizace v horkém kapalném médiu o teplotě nad martenzitickým rozsahem
- Ponecháním v kalícím médiu až do dosažení homogenní teploty v celém ocelovém obrobku
- Zchlazení mírnou rychlostí pro prevenci velkých rozdílů mezi vnitřní a vnější částí
- Popouštění běžným způsobem

### 3 MĚŘENÍ TVRDOSTI

Tvrдость a pevnost jsou jedny z nejdůležitějších mechanických vlastností konstrukčních materiálů užívaných ve strojírenství. Tvrдость má velký vliv na odolnost materiálů proti otěru i opotřebení, je také důležitá u řezných nástrojů, který by v případě že by byl měkčí než obráběný materiál nefungoval. Tvrдость lze ovlivnit například chemicko –tepelným nebo také jen tepelným zpracováním. Nevýhodou velmi tvrdého materiálu je křehkost.

Definice tvrdosti: tvrdost je definována jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa

#### 3.1 Zkoušky makrotvrlosti

Statické zkoušky tvrdosti jsou nejrozšířenější a nejpřesnější pro stanovení tvrdosti materiálu. Indentor buď po vzorku pojíždí a je zatížen silou (vzniká vryp), nebo je do vzorku zatlačován (vzniká vtisk). Pro vyhodnocení zkoušek se používá mikroskop, nebo i hloubkoměr.

##### 3.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Tato metoda byla poprvé představena na druhém mezinárodním kongresu pro zkoušení materiálů v Paříži v roce 1900. Tato zkouška se poměrně rychle ujala a je používána dodnes.

Jedná se o vnikací zkoušku, kde indentorem je kulička (která může být například ze zakalené oceli, záleží na materiálu, který zkoušíme). Před měřením musíme povrch náležitě připravit, poté je kulička zatlačena kolmo do materiálu jistou silou, poté se pomocí získané hloubky dopočítá tvrdost materiálu.

##### 3.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

U této zkoušky používáme kromě kuličky jako indentor také diamantový kužel. Správný indentor se volí podle druhu stupnice, tyto stupnice jsou navrženy pro nějaký druh materiálu.

Na rozdíl od brinellovi zkoušky se zde hodnota tvrdosti odečítá přímo na tvrdoměru a vychází se z hloubky vtisku. Výhoda je v tom, že měření není ovlivněno geometrií vtisku, metoda je pohodlná a rychlá.

### 3.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Tuto metodu popsali pánové Smith a Sandland, vznikla v Anglii a to ve stejné době jako vznikla zkouška Rockwella v Americe. Tady je indentorem čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136°, což znamená, že vznikají pravidelné čtyřhranné vtisky. Tento specifický úhel je volen pro to, že nejméně ovlivňuje výsledek a také proto, aby se hodnoty příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené Brinellem. Po provedení vtisku se změří uhlopříčka a dosadí se spolu se silou vtisku do rovnice, z té poté vypočítáme tvrdost.

$$HV = 0,189 \frac{F}{u^2}$$

F - síla [N], u – hodnota uhlopříčky [mm]

## 3.2 Zkoušky mikrotvrdosti

Zkoušky jsou principálně stejné jako statické zkoušky makrotvrdosti, ovšem na rozdíl od nich mají zkoušky mikrotvrdosti markantně nižší sílu vtisku (často se uvádí hodnota 19,8N jako hranice mezi makro a mikrotvrdostí). První experiment s takovou menší silou byl proveden ve Velké Británii v roce 1932. Snižování sil má samozřejmě jako následek také menší velikost vtisku, k proměřování slouží kvalitní optika.

Zkoušky mikrotvrdosti se hodí pro následující:

- Malé nebo tenké součásti
- Hodnocení svarů
- Zjištění rozdílů tvrdosti mezi hranicemi a vnitřky zrn
- Měření tvrdosti tenkých povlaků
- Studium difúzních pochodů
- Měření křehkých materiálů
- Měření tvrdosti strukturních složek a fází

### 3.2.1 Zkouška mikrotvrdosti podle Knoop

Tato metoda byla vytvořena v roce 1939 v USA a vychází z vickersovi metody. Indentorem je tedy jehlan a jeho základnou je protáhlý kosočtverec. Výsledný vtisk má poměr uhlopříček zhruba 1:7. Knoopova zkouška je popsána mezinárodní normou ČSN ISO 4545.



Výhodou Knoopova indentoru je, že deformace jsou relativně největší u krátké úhlopříčky a v tomto směru je tedy největší odpružení při odlehčení, kde naopak ve směru dlouhé úhlopříčky je toto odpružení zanedbatelné.

Další výhodou je, že vtisk lze vytvořit takovým způsobem, že lze s velkou přesností měřit tvrdost u úzkých součástí.

Například u cementovaných nebo nitridovaných povrchů lze tvrdost zachytit mnohem citlivěji než u zkoušky vickersovi.

Jelikož indentor neproniká příliš hluboko, lze tuto metodu použít také u materiálů se slabou povrchovou vrstvou

#### **Nároky na správný průběh zkoušky:**

- Povrch zkoušeného materiálu musí být připraven jako metalografický výbrus
- Vzorek musí být uložen na tuhé podložce
- Indentor je vtačován kolmo k povrchu vzorku
- Doba zatěžování od nuly do maximálního nesmí překročit 10s

#### **Příklad způsobu označení naměřené tvrdosti:**

620,5 HK 0,1 – 62,5 mikrotvrdost dle knoopu, měřeno při základních podmínkách zkoušky, zatížení 0,0098 N, doba působení síly 10 až 15 s

### **3.2.2 Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse**

Indentor se téměř neliší od klasického pro měření makrotvrdosti podle Vickerse, rozdíl je hlavně v délce příčného ostří.

Při měření mikrotvrdosti se používají zejména nízké zatěžující síly, zkoušený povrch tak musí být velmi dobře upraven, aby bylo měření přesné. Nevýhodou také je, že vtisky již nenechávají geometrickou podobnost, což znamená, že výsledná tvrdost je závislá na velikosti zatěžující síly.

#### **Nároky na správný průběh zkoušky:**

- Tloušťka měřené součásti musí být minimálně 1,5 násobek délky úhlopříčky vtisku
- Zkoušený materiál musí být uložen na tuhé podložce
- Indentor musí směřovat kolmo k povrchu zkoušeného materiálu
- Doba, po kterou působí zatěžovací síla musí být v intervalu od 2 do 8 sekund a rychlost zatěžování nesmí překročit 0,2 mm/s

## 4 PŘEHLED OCELÍ

### 4.1 Oceli Ingotové

Ocelové ingoty jsou finální produkt oceláren. Lze je vyrábět třemi způsoby:

- Litím do kokil z vrchu, to probíhá tak že do kokily se vlije roztavená ocel přímo z pánve. Jelikož při lití ocel stříká (okysličuje se), tak je jakost výsledného produktu nižší
- Při kontinuálním lití se roztavená ocel odlévá do chlazeného zařízení beze dna. Z druhého konce vychází už ztuhnutá, ale ještě tvárná ocelová tyč, ta se potom rozřeže na ingoty chtěné délky
- Lití do kokil zespodu je nejkomplicovanější a nejdražší způsob. Takto vyrobená ocel je čistější, právě proto je tato metoda používána pro lití ingotů vyšší jakosti

#### 4.1.1 Konstrukční

##### 4.1.1.1 Třídy 11

Jsou to uhlíkové konstrukční oceli se zaručenou čistotou, zaručeným obsahem fosforu a síry, zaručenou minimální pevností v tahu, mezí kluzu a tažnosti.

Pro méně namáhané strojní součásti, jako např. čepy, hřídele, menší ozubená kola aj., jsou vhodné oceli s pevností řady 37 (370 MPa), např. 11 373 nebo řady 42 (420 MPa), např. 11 423; dají se svařovat a jsou vhodné pro svařované konstrukce

Oceli 11 378, 11 483, 11 523 a 11 583 jsou označeny jako oceli jemnozrnné. Mají zvýšenou mez kluzu.

Nejběžnější ocelí pro strojní součásti, jež lze zušlechťovat je 11 500 (0,3%C) min. pevnost v normalizačně žíhaném stavu 500 MPa Zušlechťuje se nejvýše na pevnost okolo 700 MPa. Použití: svorníky, ozubená kola, hřídele.

Pro náročnější a více namáhané strojní součásti jsou vhodné oceli vyšších pevností, např. 11 600, 11 700 a 11 800. Zvláštní oceli jsou tzv. automatové (11 109, 11 110, 11 120, 11 121, 11 140), které obsahují až 0,2 % S. Síra je vázána zvýšeným obsahem manganu (kolem 1%) na MnS. Tyto oceli dosahují dobré obrobitelnosti s kvalitním povrchem při velké řezné rychlosti a snadné lámavosti třísky dodávají se v tyčích tažených za studena.

Do ocelí třídy 11 patří: 11373, 11500, 11523, 11600, 11700, 11800

#### 4.1.1.2 Třídy 12

Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli, u kterých je zaručeno kompletní chemické složení, oceli jsou uklidněné. Oceli, které neobsahují žádné legury. Mají široké použití podle obsahu C (0,07 – 0,9), tepelným zpracováním lze získat velké množství užitečných vlastností. Oceli třídy 12 určené k cementování mají 0,06 až 0,2 %C a dodávají se ve stavu přírodním (pouze válcované popř. kované).

Oceli třídy 12 k zušlechťování mají 0,25 až 0,7 %C. Jsou prokalitelné až do průměru 40 mm.

Oceli třídy 12 jsou: 12013, 12020, 12023, 12040, 12041, 12042, 12050, 12051, 12052, 12060, 12061, 12071, 12072, 12081, 12090

#### 4.1.1.3 Třídy 14

Tyto oceli jsou legovány chromem, popř. chromem a manganem či křemíkem a hliníkem. Jsou to nejvíce používané slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se cementují, zušlechťují, kalí, některé jsou určeny k nitridování např. 14 340. Chromové oceli jsou vhodným materiálem na součásti kuličkových a válečkových ložisek. Na tyto oceli (např. 14 109 určená k výrobě valivých ložisek) je kladen velký požadavek, co se týká mikročistoty materiálu. Sleduje se hlavně velikost a tvar nekovových vměstků, zejména siřníků a oxidů, hlavně Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Oceli třídy 14 jsou vhodné na trvalé magnety v případech, kde nejsou vysoké požadavky.

Oceli třídy 14: 14100, 14109, 14120, 14140, 14150, 14160, 14208, 14209, 14220, 14221, 14223, 14224, 14230, 14240, 14260, 14331, 14340, 14341, 14500

### 4.1.2 Nástrojové

#### 4.1.2.1 Uhlíkové

Na nástroje jsou většinou vhodné méně prokalitelné oceli, aby nástroj byl houževnatější. Na řezné nástroje se volí oceli s větším obsahem uhlíku, asi 0,7 až 1,4 %, na nástroje ke stříhání oceli s 0,5 až 1,2 % C. Na pilníky se používají hlavně uhlíkové oceli a jen výjimečně nízkolegované oceli. U nástrojů na obrábění dřeva bývá obsah uhlíku obvykle nižší než u nástrojů na obrábění kovů. Nástroje pracující rázem (kladiva, pneumatické nářadí) musí být sice tvrdé, ale také dostatečně houževnaté a mívají nejvýše 1 % C

Nástrojové oceli vyhovují při menších nárocích na nástroj. Jejich nevýhodou je poměrně rychlý pokles tvrdosti vlivem popouštění při ohřevu. Výhodnější je ocel s větším obsahem uhlíku, např. ocel 19252 asi s 1,3 % C.

#### 4.1.2.2 *Slitinové*

se volí pro více namáhané nástroje. Jsou legované zejména V, Cr, W, Mo, Si, Mn, Ni, hlavně jejich vhodnou kombinací.

Trvanlivost ostří řezných nástrojů na obrábění kovů zvyšuje přísada karbidotvorných prvků, zejména Cr, V a W. Legující prvky také usnadňují kalení a zabraňují vzniku trhlin. Výhodnější jsou oceli rychlořezné, které jsou dobře odolné proti popouštění teplem, vznikajícím při řezu.

Nože na stříhání tlustých plechů jsou namáhány hlavně na ohyb a tlak. Musí být proto houževnaté, s nižším obsahem uhlíku (max. asi 0,7 %), současně však velmi odolné proti opotřebení a proto jsou nejčastěji legovány Cr, Ni, V, Mn. Méně prokalitelné oceli se volí na nástroje namáhané střídavě rázem (pneumatické nářadí). Mají nižší obsah uhlíku a legujícími prvky jsou hlavně Si a Cr, pro velká namáhání ještě W.

U měřicích nástrojů se vyžaduje, aby při kalení a během provozu neměnily své rozměry. Volí se také oceli dobře obrobitelné a leštitelné, odolávající stárnutí. Stabilizace rozměrů se dosahuje urychlením objemových změn, které mohou nastat během dlouhé doby v zakalené struktuře nástroje. Nelegované a nízkolegované oceli se stabilizují popouštěním, vysoce legované oceli ochlazením v tekutém vzduchu. U měřicích nástrojů se někdy používá i tvrdého chromování.

Nástroje k tažení, ražení apod. jsou méně namáhány na ohyb a na opotřebení a většinou se volí méně prokalitelné oceli s vysokým obsahem uhlíku, legované hlavně chromem a vanadem. Kromě tvrdosti se požaduje i značná houževnatost, a proto se uplatňují vlastnosti slitinových ocelí, zejména jejich velká houževnatost, odolnost proti opotřebení a proti popouštění.

## 5 ŘEZÁNÍ LASEREM

Vznik stimulované emise, která se stala základem všech kvantových zesilovačů a oscilátorů vysvětlil Albert Einstein ve své práci o kvantové mechanice záření v roce 1917.

Slovo laser je odvozeno z anglického akronymu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), jehož volný překlad znamená zesílení světla vynucenou emisí záření. Laser je moderní způsob zpracování.

### 5.1 Historie

Řezání je momentálně nejrozšířenější laserovou technologií, její průmyslové využití se datuje od roku 1965, kdy firma Western Electric company postavila první funkční systém pro vrtání raznic. Poté v roce 1967, byl ve Velké Británii uveden do provozu laserový systém na řezání ocelových plechů s použitím kyslíku jako asistenčního plynu, hned potom se začali vyrábět i systémy pro řezání nekovových materiálů.

V sedmdesátých letech minulého století pak docházelo k masivnějšímu průmyslovému nasazení laserového řezání pomocí CO<sub>2</sub> laserů. Tyto systémy pak byly v dalších zdokonalovány nejen s ohledem na vývoj samotných laserových zdrojů. Ale významné zdokonalování se týkalo též pohonů, řídicích systémů, postprocesorů apod. Nicméně i laserové zdroje doznali výrazného pokroku. Jednou z přelomových událostí ve vývoji CO<sub>2</sub> laserů pak bylo uvedení tzv. neprůtočného difusně chlazeného laseru. Tento typ laseru nepotřebuje externí zdroje laserových plynů a v systému též nejsou žádné pohybující části. Z tohoto důvodu mají tyto lasery oproti neprůtočným výrazně nižší provozní náklady a též vyšší kvalitu výstupního paprsku. V současné době se vyrábí až do výkonu 8 kW.

Ke konci minulého století dosahovali výkony CO<sub>2</sub> laserů takových hodnot, že se začaly v konstrukci řezacích laserových strojů více prosazovat lineární motory, to hlavně s možností podstatně vyšších řezných rychlostí. Též docházelo k použití pevnolátkových laserů a to hlavně v případě řezání tenkých plechů. Posledních deset let je pak ve znamení výraznějšího použití vláknových laserů. I renomované laserové firmy dnes do svého programu zařazují vláknové lasery ve stále větší míře.

## 5.2 Princip laseru

Laser využívá aktivní prostředí, ve kterém se tvoří paprsek. Aktivní prostředí musí obsahovat prvky, které obsahují tzv. metastabilní hladinu. Narazí-li foton do elektronu takového atomu, elektron se excituje na vyšší energetickou hladinu a spadne na metastabilní hladinu, přičemž vypustí další foton.

Princip laseru by nemohl fungovat bez inverze populace. K inverzi populace dochází tehdy, je-li více elektronů atomu na metastabilní hladině než na základní hladině. Každý foton excituje jeden elektron na vyšší a následně na metastabilní hladinu. Takhle se naskládá většina elektronů na metastabilní hladinu a počká, až přiletí stimulující foton. Nejprve přiletí stimulující foton, poté se budou fotony stimulovat navzájem. Jakmile přiletí stimulující foton, donutí všechny elektrony sestoupit na základní hladinu a všechny tak vypustí jeden foton.

Všechny tyto fotony, včetně toho stimulujícího se spojí v jednu vlnu s mnohem větší amplitudou. Tím dojde k zesílení světla stimulovanou emisí záření. Prozatím tohle všechno proběhlo na jednom atomu. Nyní zmnohonásobíme počet atomů. V každém atomu proběhne ta samá interakce, všechny elektrony jsou nyní přesunuté na metastabilní hladině a čekají. Stimulující foton přiletí k nějakému číslu těchto atomů. Všechny tyto atomy vypustí zesílené fotony, avšak každý jiným směrem. Letící fotony působí pro ostatní jako stimulující fotony, tudíž donutí ostatní elektrony přesunout se zpět a vypustit fotony, které se přidají ke stimulujícím fotonům. Tyto fotony se opět mnohonásobně zesílí a tímto dochází k zesilování světla.

Na řadu přichází rezonátor. Rezonátor je soustava dvou zrcadel, z nichž je jedno odrazivé až z 99,9%, druhé zrcadlo je polopropustné. Obě tato zrcadla jsou rovnoběžné vůči sobě. Fotony začnou létat neustále mezi zrcadly a „nabalovat“ na sebe ostatní fotony. Těchto fotonů bude v laseru exponenciálně narůstat, protože jakmile jich tam bude víc, budou rovnoběžné fotony stimulovat další atomy a špatně letící fotony už to nebudou stíhat. Teď už nám laser funguje. Špatně letící fotony buď vymizí skoro úplně, nebo úplně.

Jakmile se foton zesílí na určitou úroveň, polopropustné zrcadlo ho vypustí ven a tím nám vznikne požadovaný paprsek.

Vše co je tady popsáno, proběhne v řádu milisekund.

### 5.3 Princip řezání laserem

Při dopadu fokusovaného laserového paprsku na obrobek se jeho materiál tak silně zahřeje, že se roztaví nebo odpaří. Jakmile pronikne kompletně obrobkem, může začít proces řezání: Laserový paprsek se pohybuje podél obrysů součásti a plynule roztavuje materiál. Proud plynu většinou vyfukuje taveninu směrem dolů ze štěrbinu řezu. Štěrbina řezu je stěží širší než samotný fokusovaný laserový paprsek.

Při vrtání laserem roztavuje a odpařuje materiál krátký impuls laseru s vysokým výkonem. Vysoký tlak, který při tom vzniká, vypuzuje taveninu z otvoru.

#### 5.3.1 Sublimační řezání

U této metody odpařuje laser materiál pokud možno bez tavení. Pára z materiálu vytváří ve štěrbině řezu vysoký tlak, který taveninu vymrští směrem nahoru a dolů. Procesní plyn, dusík, argon nebo helium pouze izoluje plochy řezu od okolního prostředí. To zajistí, že hrany řezu neoxidují. Z tohoto důvodu stačí tlak plynu 1 až 3 bary.

Odpařování materiálů vyžaduje více energie než tavení. Sublimační řezání proto potřebuje vysoké výkony laseru a je pomalejší než jiné řezací metody. Zato vytváří kvalitní hrany řezu. Při obrábění plechů se tato metoda nepoužívá. Atraktivní je teprve tam, kde jsou požadavky na obzvláště jemné řezání. Sem patří například řezání stentů v lékařské technice.

K typickým materiálům patří:

- Fólie z plastické hmoty a textilie, které se odpařují již při malé energii
- Materiály, které se nemohou tavit, například dřevo, lepenka, pěna

#### 5.3.2 Tavné řezání

Jako řezací plyn slouží při tavném řezání laserem dusík nebo argon. Je vháněn do štěrbinu řezu pod tlakem 2 až 20 barů. Argon a dusík jsou inertní plyny. To znamená, že nereagují s roztaveným kovem ve štěrbině řezu, ale pouze jej vyfukují ven směrem dolů. Zároveň izolují hranu řezu od vzduchu.

Výhoda: Hrany neoxidují a nemusí se již dodatečně obrábět. K řezání je však k dispozici pouze energie laserového paprsku

U tenkých plechů je rychlost řezání stejně vysoká jako při řezání plamenem. U silnějších plechů a při zapichování je procesní rychlost oproti řezání plamenem snížena. Některá řezací zařízení umožňují zapichovat s kyslíkem a poté dále řezat s dusíkem

## **5.4 Typy laserového řezání**

### **5.4.1 3D laserové řezání**

Právě díky použití vláknových laserů se prostorové řezání stává daleko jednodušším. Laserová řezací hlava je umístěna na přírubě poslední osy robota. Laserový paprsek je přiveden do místa řezání optickým vláknem, což integraci laseru na robota velmi zjednodušuje. V případě vyřezávání přesných otvorů ve 3D je možné umístit řezací hlavu do autonomního souřadnicového X-Y polohovadla, které pak při zastavení robota v příslušné poloze zajišťuje vyřezání přesných otvorů (obrázek vpravo).

### **5.4.2 Remote cutting**

V poslední době se díky zvyšujícím výkonům laserů a zdokonalování optických systémů (dynamický expandér) začíná v průmyslu stále více uplatňovat i tzv. remote cutting . A to převážně u nekovových materiálů jako jsou textilie, papír, plasty. U této technologie je umístěna dvouosá skenovací hlava vysoko na obrobkem ve vzdálenosti 1 až 2m. Před touto skenovací hlavou je umístěn dynamický expandér, který zajišťuje optimální nastavení velikosti rezného bodu. K rozmítání paprsku po rezné ploše dochází vychylováním paprsku dvěma galvoskanery ve skenovací hlavě, která samotná při procesu řezání zůstává na jednom místě. U laserového svařování je tato metoda podstatně více využívána. Více detailů o samotném principu pak v následujícím díle seriálu, který se zabývá laserovým svařováním.

## **5.5 Výhody**

Laserové řezání má obrovskou výhodu v přesnosti řezání, potom také to, že je možné dosáhnout vysokých rezných rychlostí.

## **5.6 Využití**

Laser je obdivuhodné a neobyčejně univerzální zařízení - je schopen měnit prakticky jakýkoli druh energie na energii koherentního elektromagnetického záření.



Volbou vhodného aktivního prostředí je možno získat záření nejrůznějších vlnových délek v oboru infračerveného, viditelného i ultrafialového světla. I když se u některých typů laserů přeměňuje energie s poměrně malou účinností, je tento nedostatek bohatě nahrazen vysokou kvalitou laserového světla. Žádný jiný zdroj záření tuto výjimečnou kvalitu nenabízí, a proto se stává laser jedním z nejužitečnějších nástrojů dneška.

### **5.6.1 Průmyslové využití**

V průmyslu se začalo využívat laserové záření téměř ihned po sestrojení prvního laseru. Soustředěný laserový paprsek je schopen zpracovávat kovové i nekovové materiály s bezkonkurenční kvalitou a zcela novými technologickými postupy.

#### **5.6.1.1 Obrábění materiálů**

Laserové obrábění se dnes používá prakticky ve všech výrobních odvětvích. Zvláště výhodné je použití laseru při přesném vyřezávání složitých tvarů. V místě dopadu laserového paprsku se materiál taví a je z řezu „odfukován“ proudem inertního plynu. Přitom nevzniká téměř žádný odpad a materiál při řezání ani není třeba upínat. Proto se tímto způsobem dají s vysokou přesností řezat i křehké nebo snadno deformovatelné materiály, například textil. Snadné vyřezávání šablon nebo fólií podle počítačové předlohy zvyšuje produktivitu práce také práci v reklamním průmyslu.

#### **5.6.1.2 Svařování kovů**

Svařování laserem je v mnoha případech výhodnější než použití klasických technologií. Tepelné působení paprsku je jenom lokální, takže nedochází k tepelnému poškození okolí svařovaného místa. Paprsek, soustředěný do průměru menšího než 0,5 mm, dovoluje vytvářet i velmi jemné a kvalitní sváry, celý proces je možno řídit počítačem. Svařovat se dá nejen většina materiálů svařovatelných běžným způsobem. Díky soustředění energie na nepatrnou plošku lze svářet i materiály s vysokou teplotou tání. Laser je zvláště vhodný pro svařování nerezavějící oceli, titanových, zirkonových nebo chromniklových slitin.

#### **5.6.1.3 Značení a gravírování**

Laserový paprsek vytváří na povrchu materiálu mechanicky odolný, velmi přesný a kontrastní popis. Jeho trvanlivost je zaručena bez použití chemických přísad, barev nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Označovat se dá prakticky jakýkoli kovový i nekovový materiál, povrch výrobku může mít libovolný tvar a povrchovou úpravu.

Změnou parametrů laseru je možno plynule měnit hloubku popisu od několika tisícín milimetru až po gravírování do větší hloubky. V technických aplikacích je důležitá hlavně trvanlivost popisu, reklamní použití klade důraz především na grafickou kvalitu popisu. Nejčastěji se používá neodymový nebo CO<sub>2</sub> laser.

#### **5.6.1.4 Dekorace skla**

Zajímavou aplikací je dekorování skleněného povrchu jeho „vypalováním“ laserovým paprskem. V místě dopadu paprsku se částečně odpaří sklovina z povrchu předmětu, změny teploty způsobí vznik jemných povrchových prasklin. Na jejich hranách dochází k rozptylu dopadajícího světla a předmět (např. váza) má v těchto místech zářivý vzhled. Pro dekoraci skla se používají lasery, vyzařující infračervené světlo, které je sklem dobře pohlcováno - např. CO<sub>2</sub> laser.

#### **5.6.1.5 Zaměřování a měření vzdáleností**

Laserový paprsek se šíří přímočaře a má - na rozdíl od světla z běžných zdrojů - minimální rozbíhavost. Je proto ideálním pomocníkem při zaměřování a vytyčování objektů na stavbách nebo v geodézii. S rozvojem polovodičových laserových diod dnes najdeme zaměřovače v profesionálních i spotřebitelských zařízeních. Patří k nim třeba laserová vodováha (ta na obrázku měří vodorovnou polohu s přesností 0,1 %) nebo přímočará pilka se zaměřovacím paprskem pro přesné řezání. Laserovým paprskem se měří pozemské vzdálenosti v geodézii, ale i vzdálenosti družic nebo Měsíce od Země. Princip je podobný jako u radaru - měří se doba mezi vysláním a přijetím světelného impulzu.

#### **5.6.2 Využití v medicíně**

Specifické vlastnosti laserového světla našly už velmi brzy po objevu své uplatnění. Rozsah použití laseru v současné medicíně je velmi široký a jeho aplikací stále přibývá. Pro lékaře je zvláště cenná možnost koncentrace energie záření na nepatrné plošce. Tato energie se ve tkáních pohlcuje a mění na teplo. Proto má laser významné postavení především v chirurgii. Laserové operace jsou bezdotykové a jejich výsledkem je ostře ohraničený řez tkání bez poškození okolí. Současně s řezem dochází ve tkáni ke koagulaci - teplem se uzavřou konce cév, takže rána mnohem méně krvácí. Rozvoj vláknové optiky umožnil přenos laserového záření optickými vlákny i do různých vnitřních orgánů.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část.
3. Provedení experimentu.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Praktická část bakalářské práce se zabývá výzkumem ovlivnění povrchové vrstvy při řezání laserem měřením pomocí instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti. Pro hodnocení povrchové vrstvy při řezání laserem bylo vybráno 5 typů ocelí s rozdílným obsahem uhlíku ČSN 411373 (S235JR, 1.0038), ČSN 411500 (E295, 1.0050), ČSN 412060 (C55, 1.1203), ČSN 414220 (16MnCr5, 1.7131) a ČSN 414160 (55MnCr). Ty byly následně nařezány laserem na zařízení TRUMPF výkonem 1837 W a rychlostí posuvu 2090 mm/min na vzorky o rozměrech 100 x 25 mm a tloušťce 4 mm. Na laboratorně připravených zkušebních vzorcích bylo provedeno měření mikrotvrdomosti při třech různých zatížení (0,5N, 1N a 5N). Výsledky měření byly graficky znázorněny a vyhodnoceny.

### Příprava zkušebních vzorků

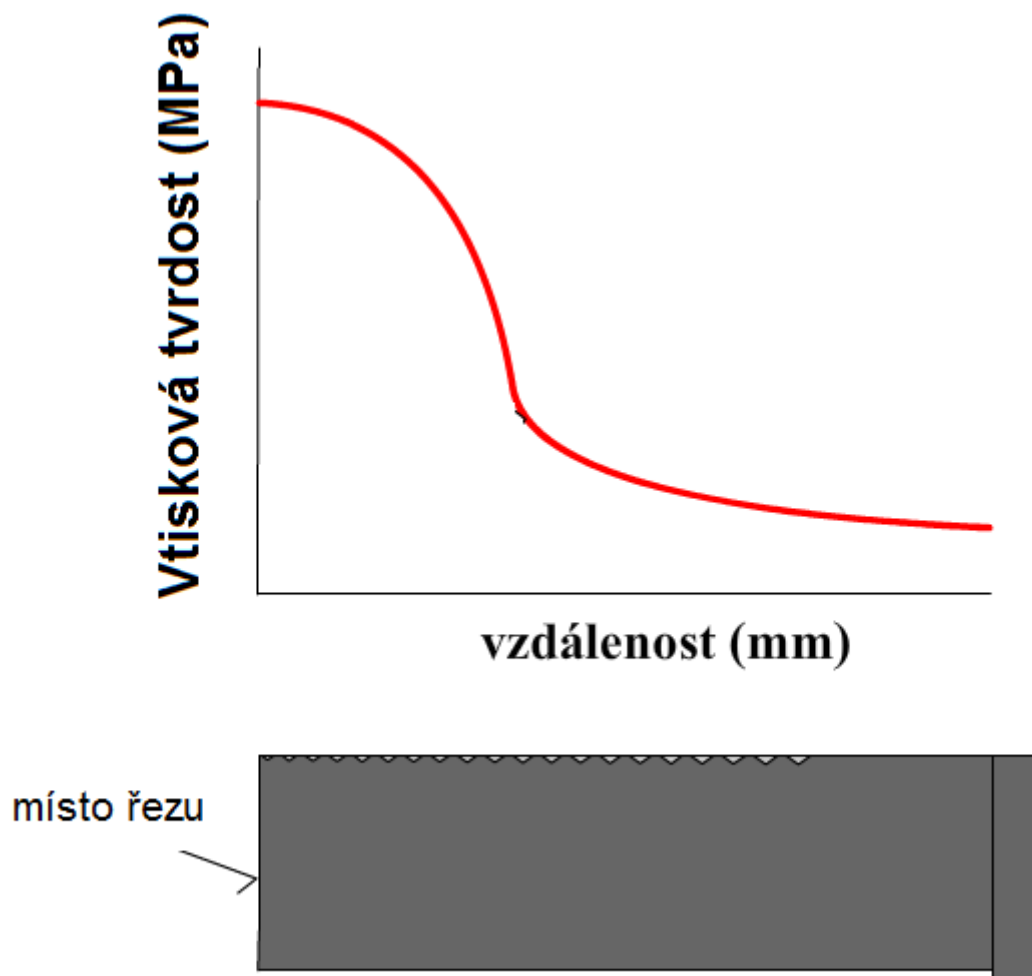
Zkušební vzorky byly připraveny na laseru typu TRUMPF ve firmě TAJMAC-ZPS a.s., Zlín. Tento 2D-laserový řezací stroj pracuje na principu „létací optiky“, což znamená, že pohybující se řezací laserová hlava opracovává fixně uložený obrobek na výměnném obrábějícím stole. Pracovní rozsah je 1500 x 3000 mm a maximální kusy materiálu k obrobení jsou 20 mm (konstrukční ocel), 15 mm (nerezová ocel) a 10 mm (hliník). Pro různé typy vzorků, podle jejich velikosti a typu materiálu, byl pro řezání použitý adekvátní výkon a rychlost posuvu podle přiložené tabulky.

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

Tabulka 1 Výkon a posuv laseru pro různé velikosti vzorků

## 7.1 Laboratorní příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky nařezané laserem musely být dále upraveny pro měření mikrotvrdomosti. Nejprve byly zkušební vzorky nařezány na příslušné velikosti (10x10) mm na přesné pile ISOMET 4000 při otáčkách řezného kotouče 1900 ot/min. Nařezané zkušební vzorky byly dále zalisovány do lisovací hmoty PHENOCURE na lisovacím zařízení SIMPLYMET 1000 tlakem 290 bar, teplota 150°C, čas ohřevu 1,30 min., čas ochlazování 4 min. leštění probíhalo na leštícím stroji ECOMET 250, kdy zalisované připravené zkušební vzorky byly přitlačeny na různá plátna silou 30N. Plátna byla střídána dle velikosti zrn. Otáčky hlavy leštícího přístroje byly 40 ot/min. Otáčky plátna leštícího přístroje byly 100 ot/min. Finální část probíhala pomocí diamantové pasty CAMEO o velikosti zrn 9 mikro metrů.



Obrázek 1. Dělení materiálu laserem

## 7.2 Měření mikrotvrlosti

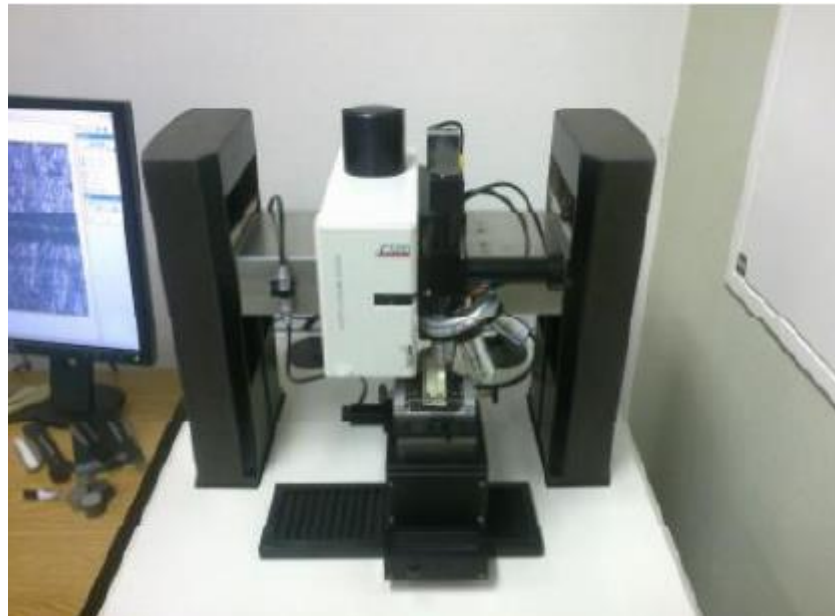
Měření mikrotvrlosti bylo provedeno na mikrotvrdoměru MicroCombi Testeru (obr. 2), CSM Instruments (Switzerland) dle normy CSN EN ISO 14577-1.

Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 0.5, 1 N a 5 N
- výdrž na maximálním zatížení - 10 s
- Poissonovo číslo - 0,3

Indentor byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  (Vickersův indentor). Měření bylo provedeno metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a následné vyhodnocení mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr. Pro měření byly stanoveny následující parametry:

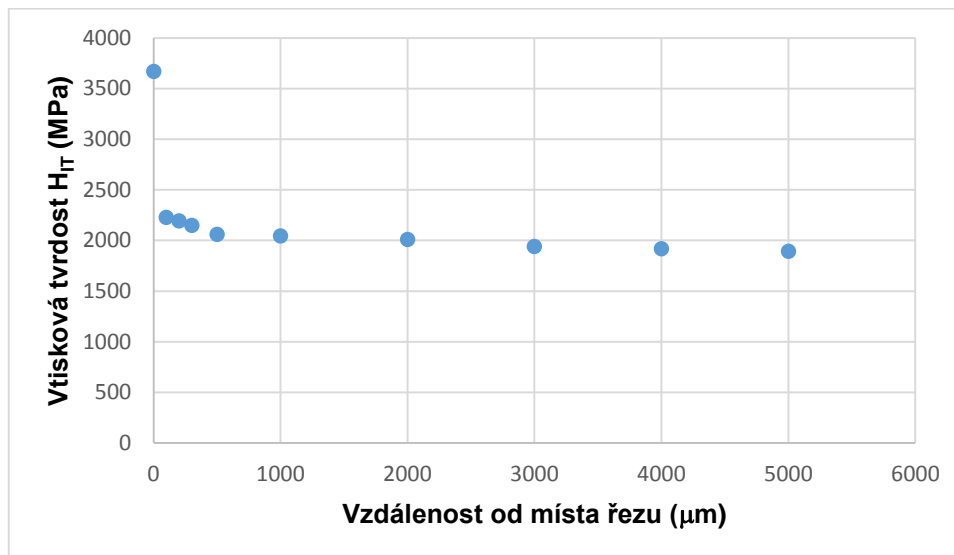
- $H_{IT}$  – vtisková tvrdost (MPa)
- $E_{IT}$  – vtiskový modul pružnosti (GPa)
- $W_{total}$  – celková deformační práce (pJ)
- $W_{pl}$  – plastická deformační práce (pJ)
- $h_{IT}$  – elastická část deformační práce (%)



Obrázek 2. Mikrotvrdoměr MicroCombi Tester

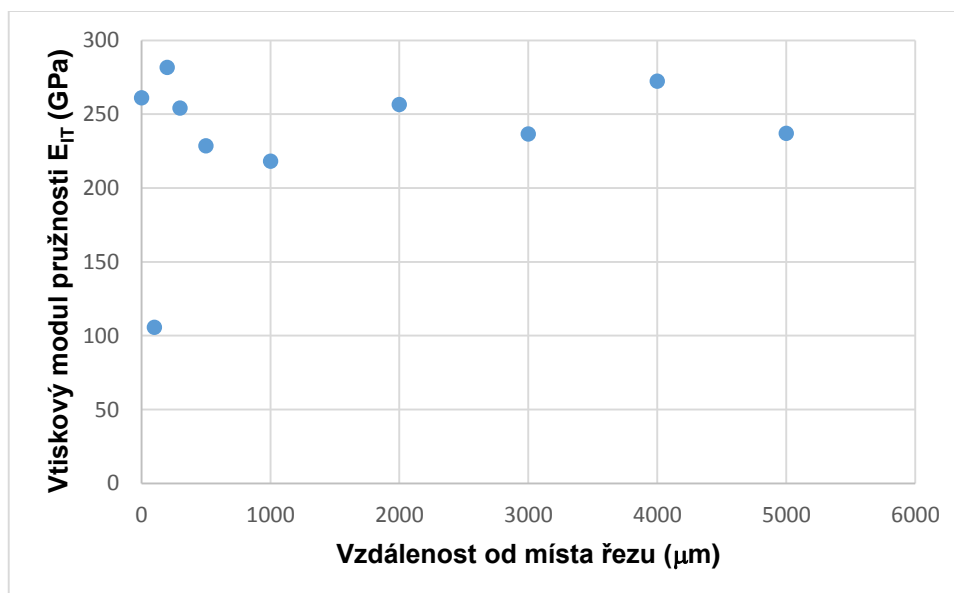
## 8 ČSN 411373 (S235JR, 1.0038)

### 8.1 Zatížení 0,5N



Obrázek 3. Vtisková tvrdost oceli 11373 při zatížení 0,5N

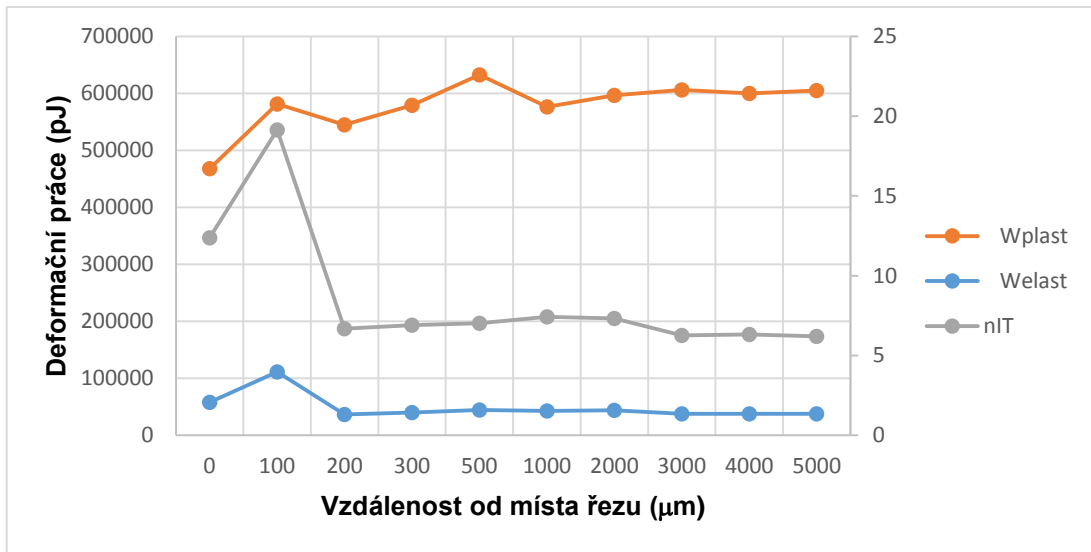
Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 11373 při aplikovaném zatížení 0,5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3671 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (1893 MPa), jak je patrné z obrázku č. 3



Obrázek 4. Vtiskový modul pružnosti oceli 11373 při zatížení 0,5N

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 0,5 N největší (281,8 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (105,6 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 4

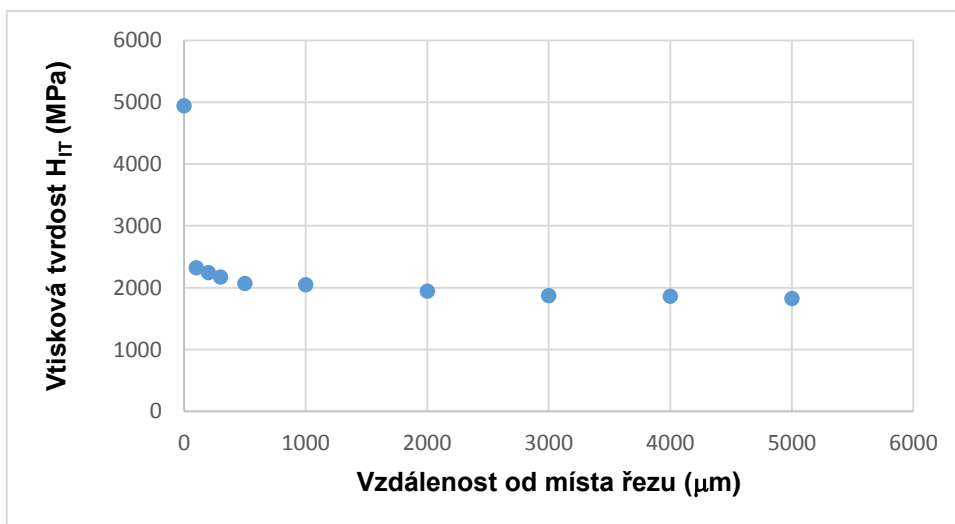




Obrázek 5. Deformační práce oceli 11373 při zatížení 0,5N

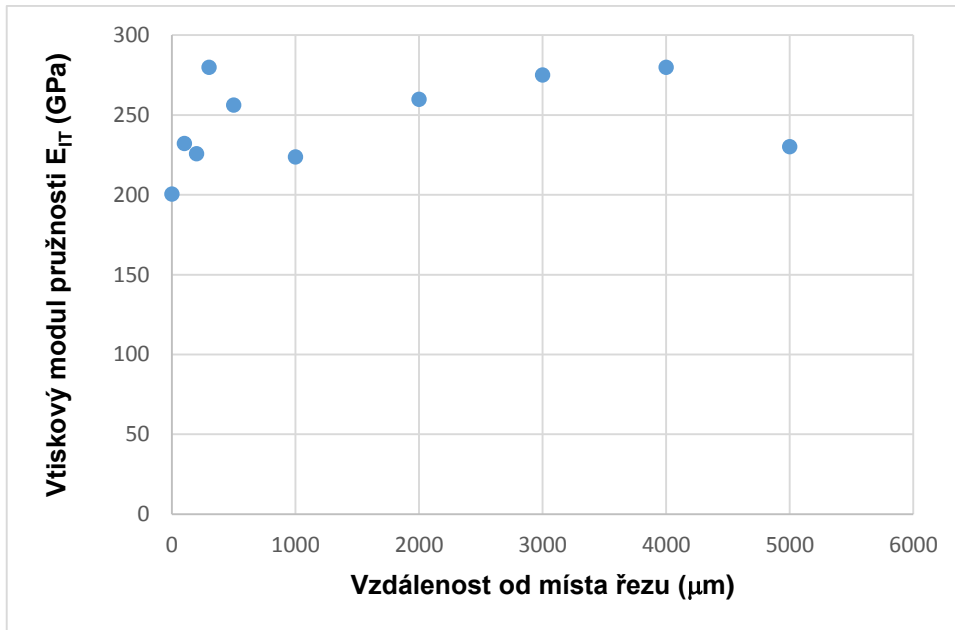
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 0,5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 5

## 8.2 Zatížení 1N



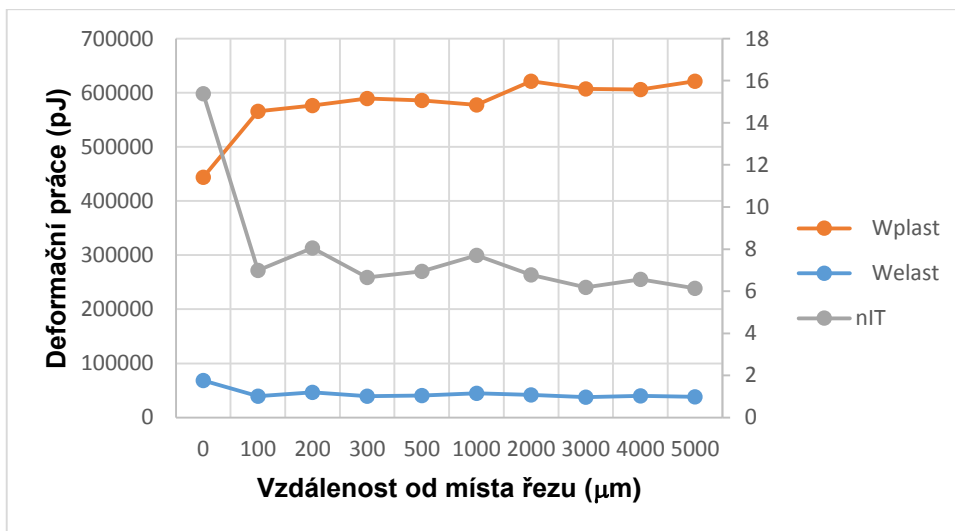
Obrázek 6. Vtisková tvrdost oceli 11373 při zatížení 1N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 11373 při aplikovaném zatížení 1 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (4942 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (1830 MPa), jak je patrné z obrázku č. 6



Obrázek 7. Vtiskový modul pružnosti oceli 11373 při zatížení 1N

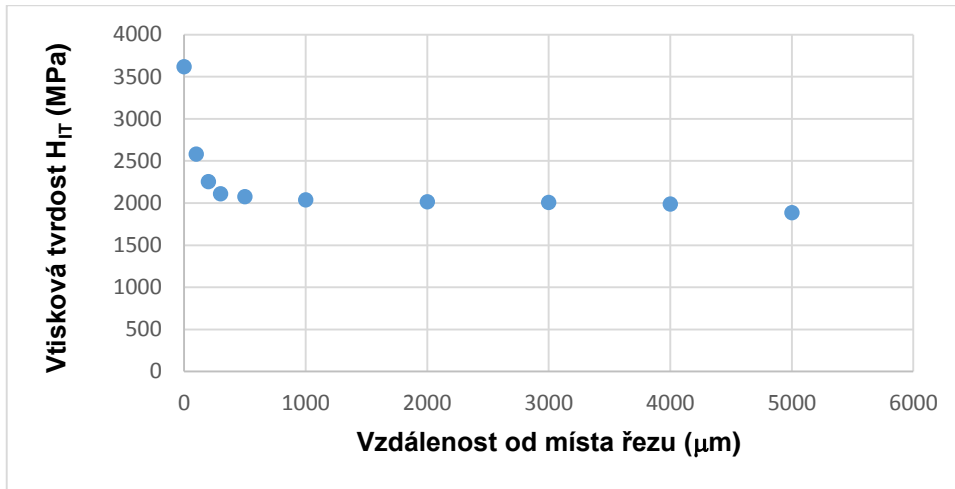
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 1 N největší (279,8 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (225,7 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. 7



Obrázek 8. Deformační práce oceli 11373 při zatížení 1N

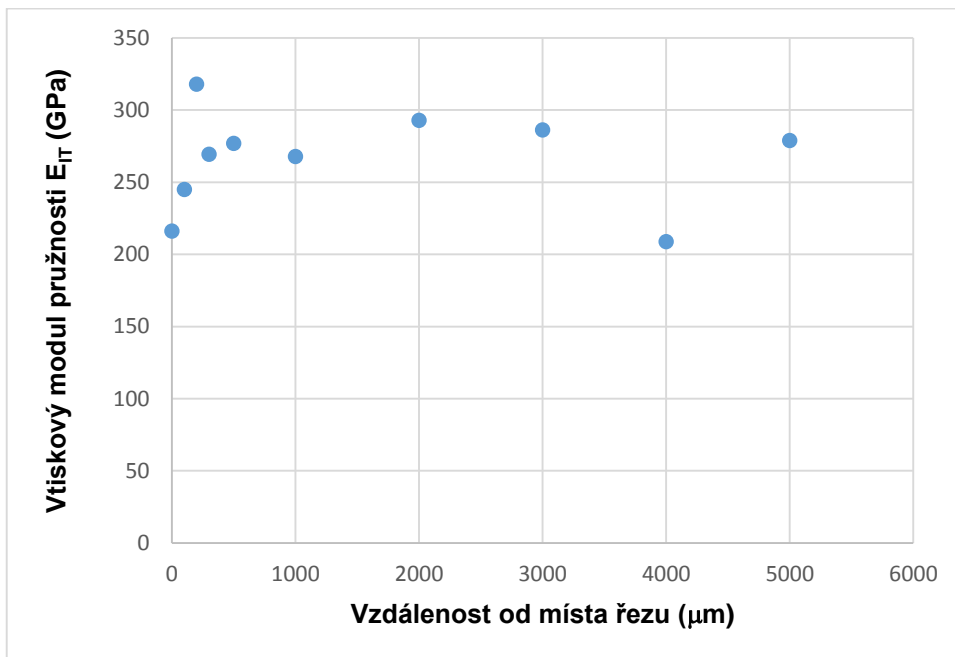
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 1 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 8

### 8.3 Zatížení 5N



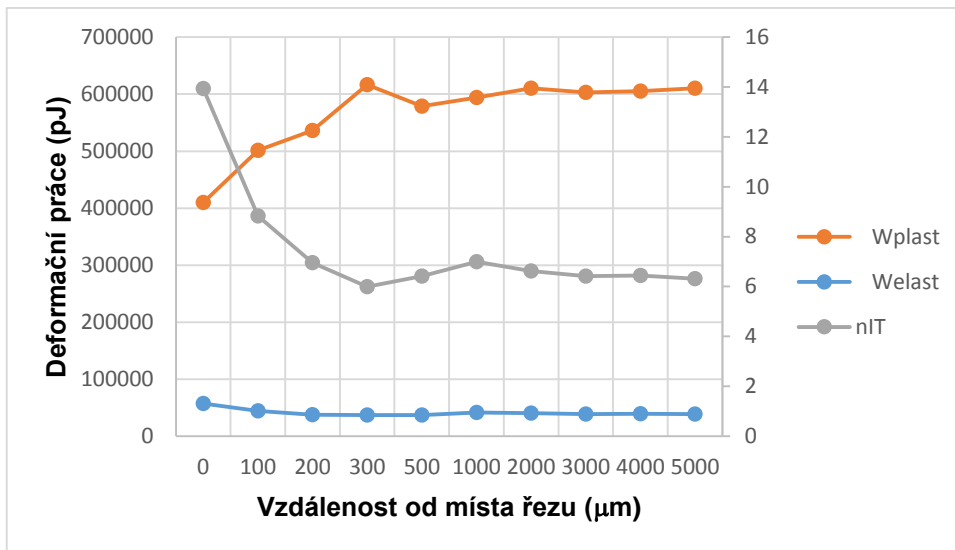
Obrázek 9. Vtisková tvrdost oceli 11373 při zatížení 5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 11373 při aplikovaném zatížení 5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3620 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (1886 MPa), jak je patrné z obrázku č. 9



Obrázek 10. Vtiskový modul pružnosti oceli 11373 při zatížení 5N

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 5 N největší (318 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (208,9 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 10

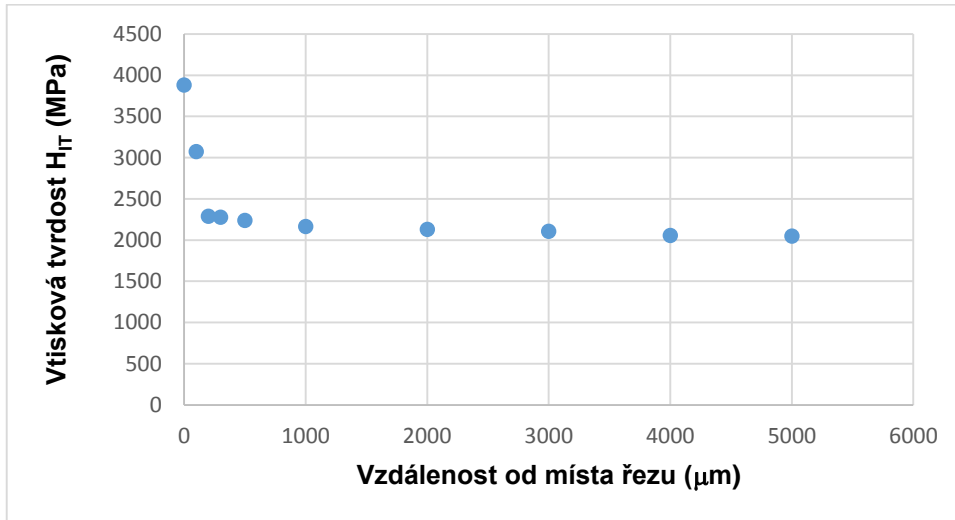


Obrázek 11. deformační práce oceli 11373 při zatížení 5N

Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 11

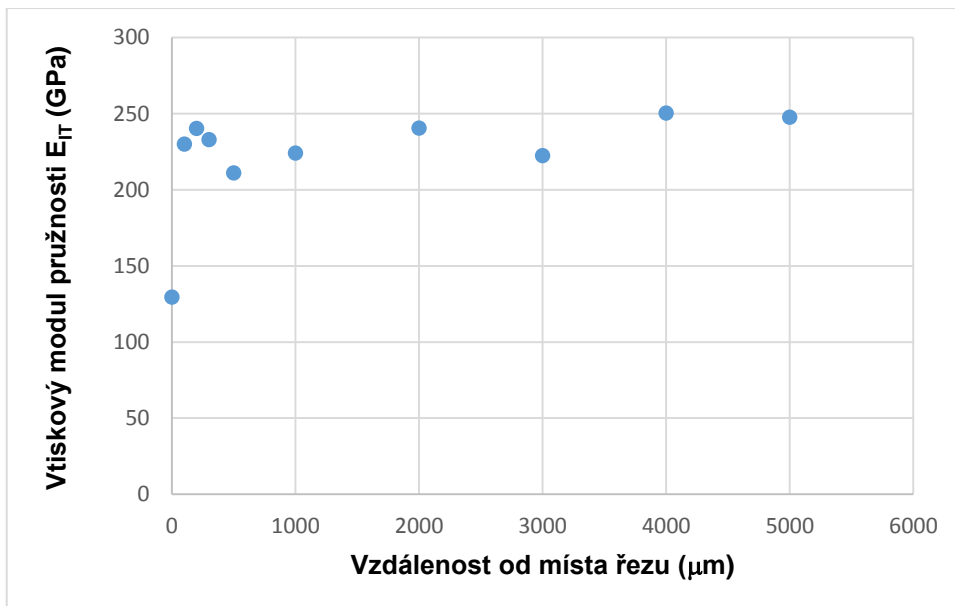
## 9 ČSN 411500 (E295, 1.0050)

### 9.1 Zatížení 0,5N



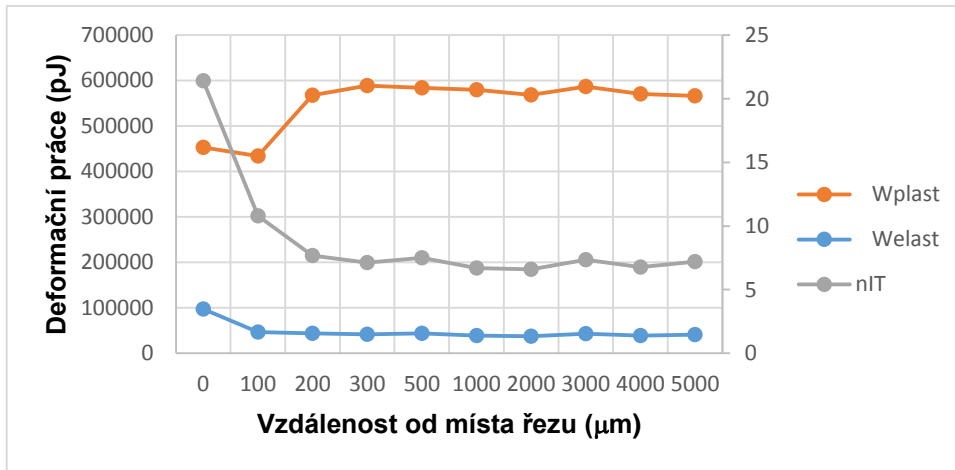
Obrázek 12. Vtisková tvrdost oceli 11500 při zatížení 0,5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 11500 při aplikovaném zatížení 0,5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3881 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2048 MPa), jak je patrné z obrázku č. 12



Obrázek 13. Vtiskový modul pružnosti oceli 11500 při zatížení 0,5N

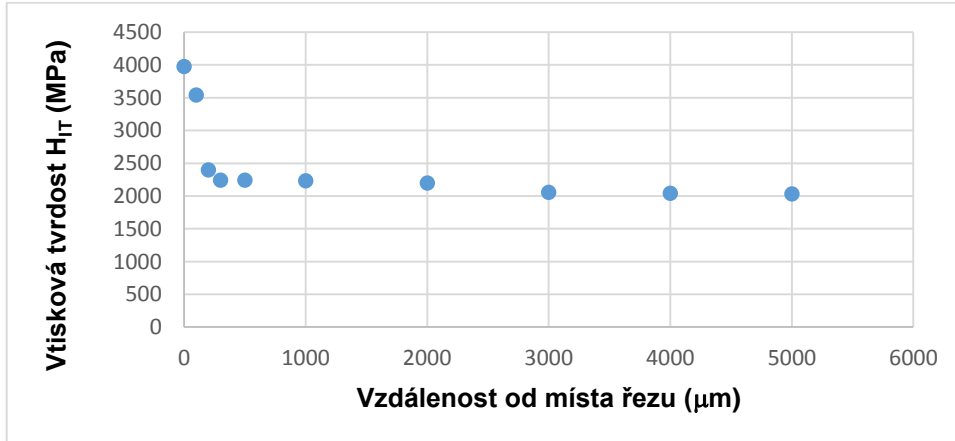
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 0,5 N největší (250 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (130 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 13



Obrázek 14. deformační práce oceli 11500 při zatížení 0,5N

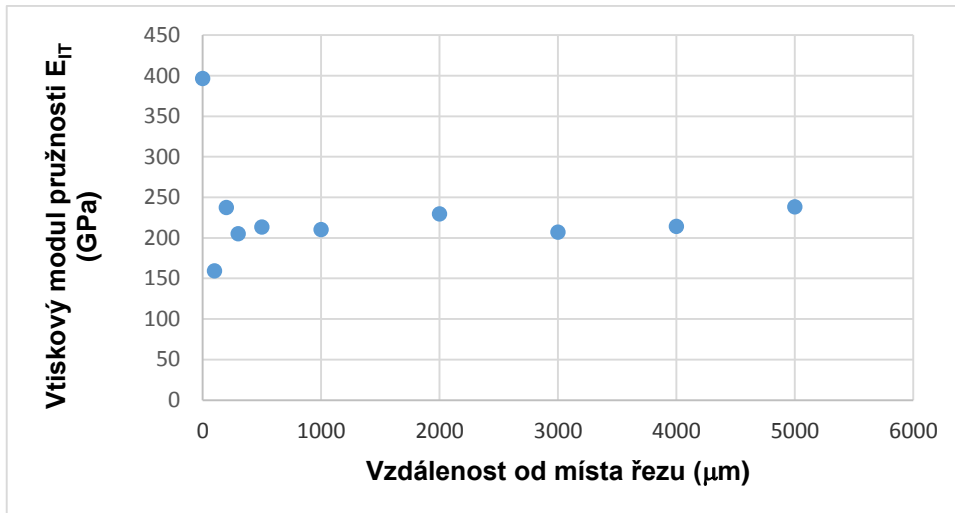
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 0,5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 14

## 9.2 Zatížení 1N



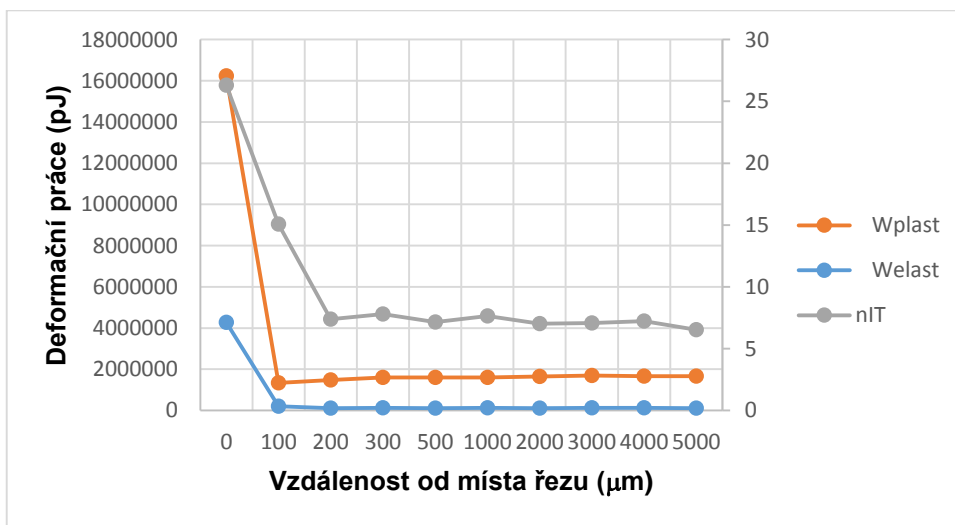
Obrázek 15. Vtisková tvrdost oceli 11500 při zatížení 1N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 11500 při aplikovaném zatížení 1 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3977 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2033 MPa), jak je patrné z obrázku č. 15



Obrázek 16. Vtiskový model pružnosti oceli 11500 při zatížení 1N

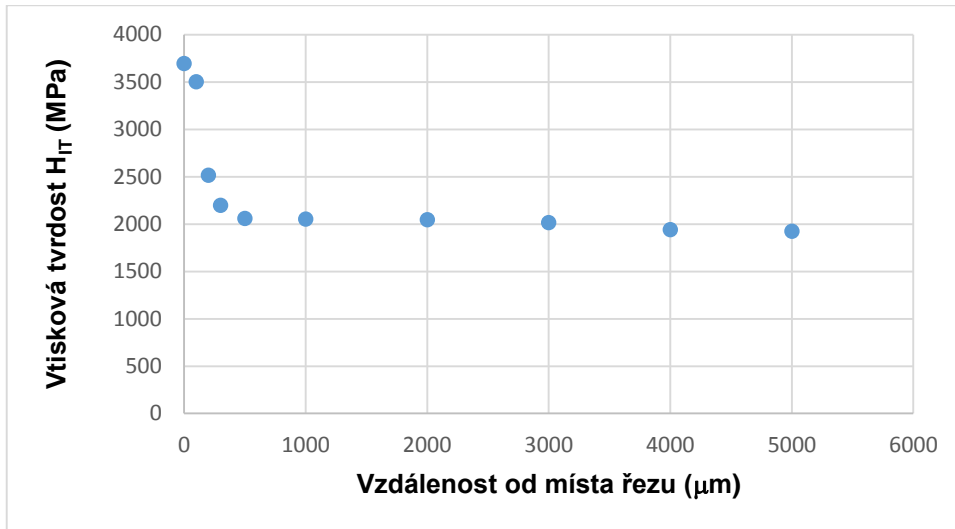
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 1 N největší (396 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (159 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. 16



Obrázek 17. deformační práce oceli 11500 při zatížení 1N

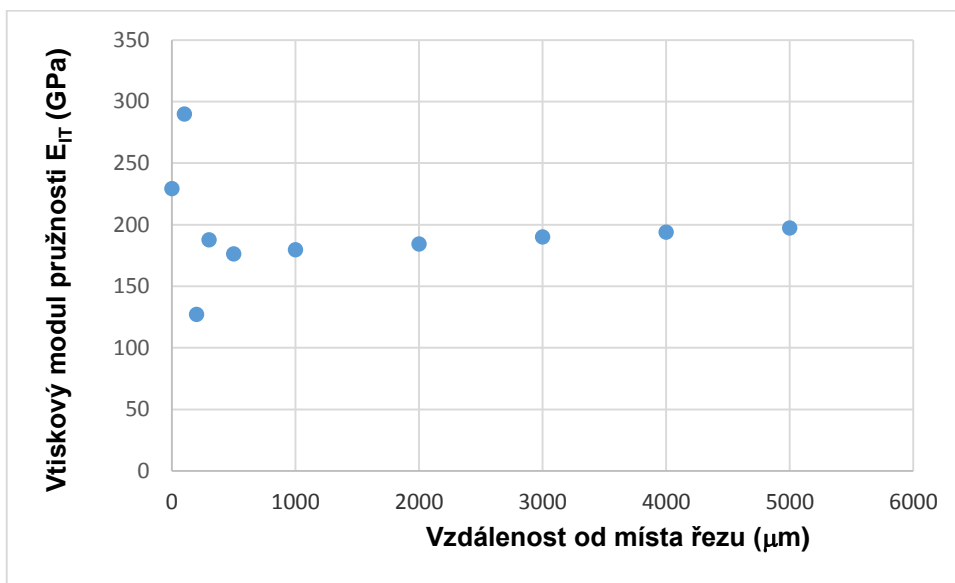
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 1 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 17

### 9.3 Zatížení 5N



Obrázek 18. Vtisková tvrdost oceli 11500 při zatížení 5N

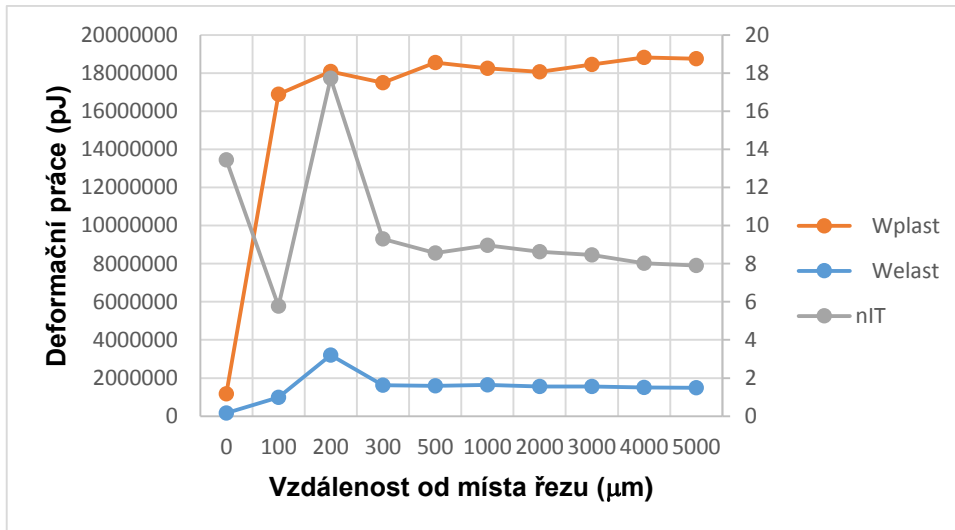
Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 11500 při aplikovaném zatížení 5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3694 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (1923 MPa), jak je patrné z obrázku č. 18



Obrázek 19. Vtiskový modul pružnosti oceli 11500 při zatížení 5N

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 5 N největší (290 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (127 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 19



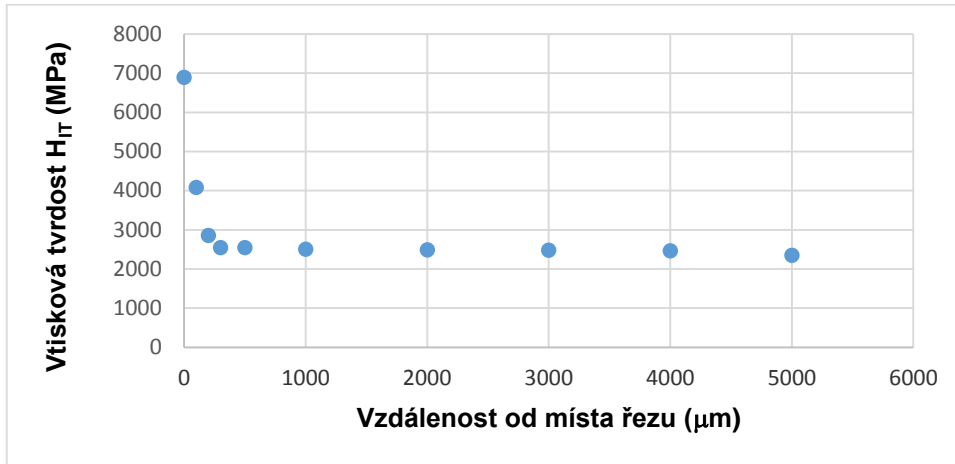


Obrázek 20. deformační práce oceli 11500 při zatížení 5N

Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 20

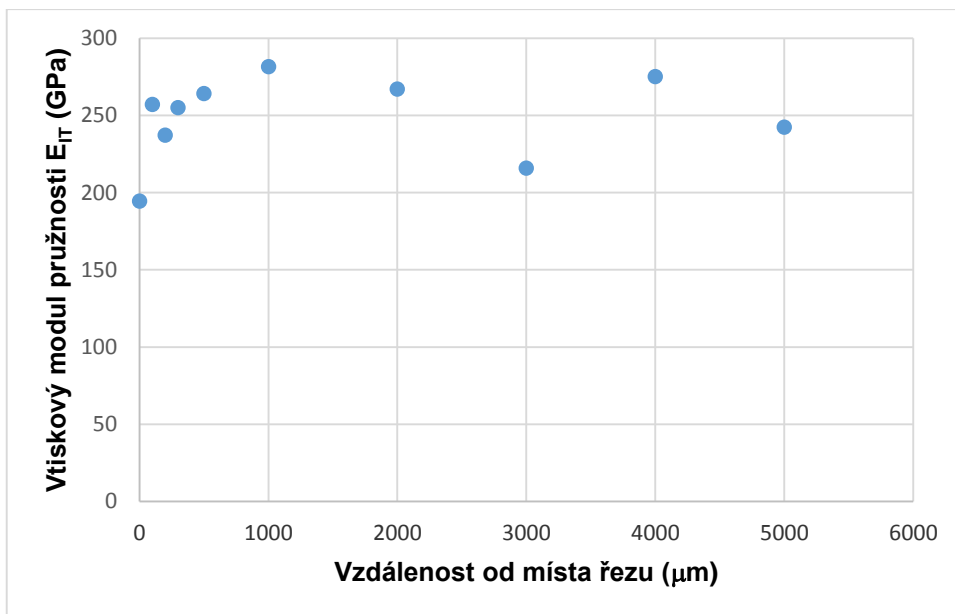
## 10 ČSN 412060 (C55, 1.1203)

### 10.1 Zatížení 0,5N



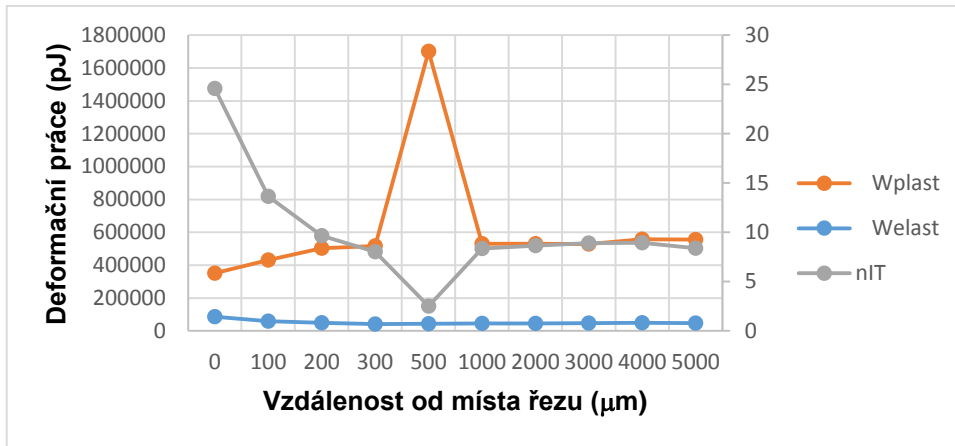
Obrázek 21. Vtisková tvrdost oceli 12060 při zatížení 0,5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 12060 při aplikovaném zatížení 0,5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (6893 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2325 MPa), jak je patrné z obrázku č. 21



Obrázek 22. Vtiskový modul pružnosti oceli 12060 při zatížení 0,5N

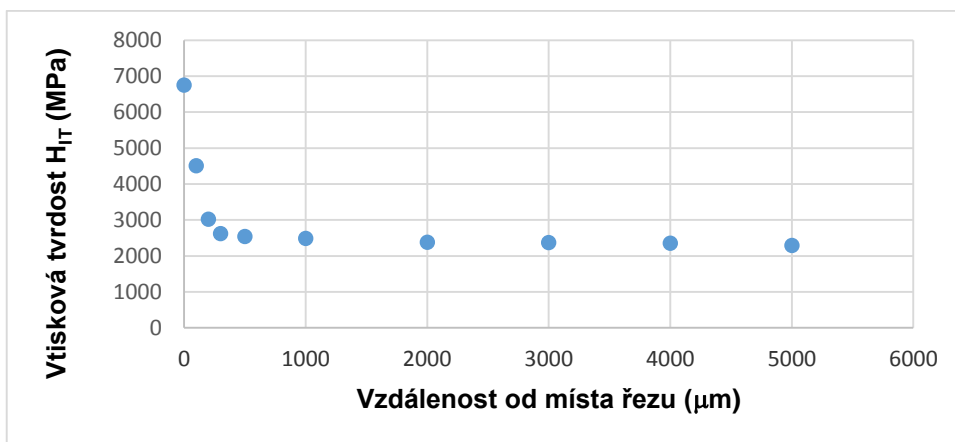
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 0,5 N největší (243 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (194 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 22



Obrázek 23. Deformační práce oceli 12060 při zatížení 0,5N

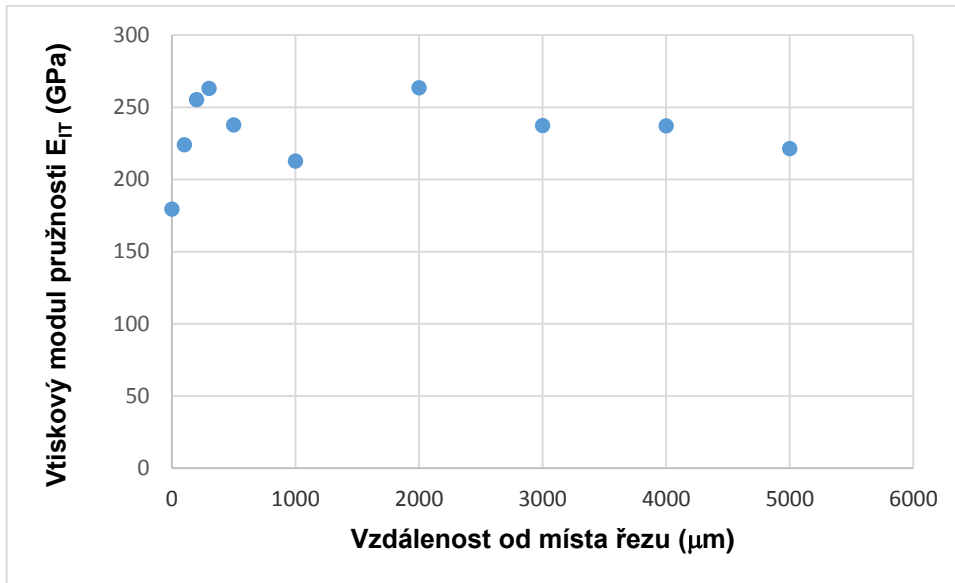
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 0,5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 23

## 10.2 Zatížení 1N



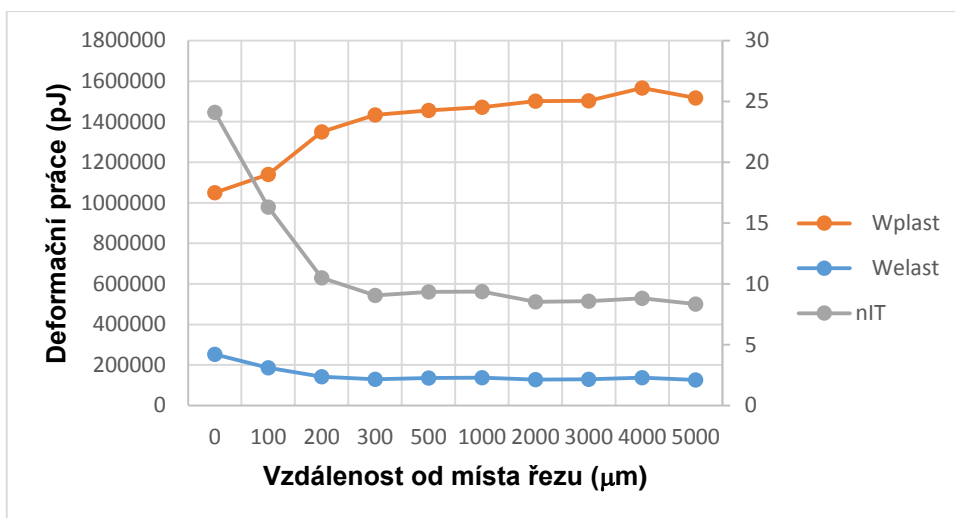
Obrázek 24. Vtisková tvrdost oceli 12060 při zatížení 1N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 12060 při aplikovaném zatížení 1 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (6750 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2295 MPa), jak je patrné z obrázku č. 24



Obrázek 25. Vtiskový modul pružnosti oceli 12060 při zatížení 1N

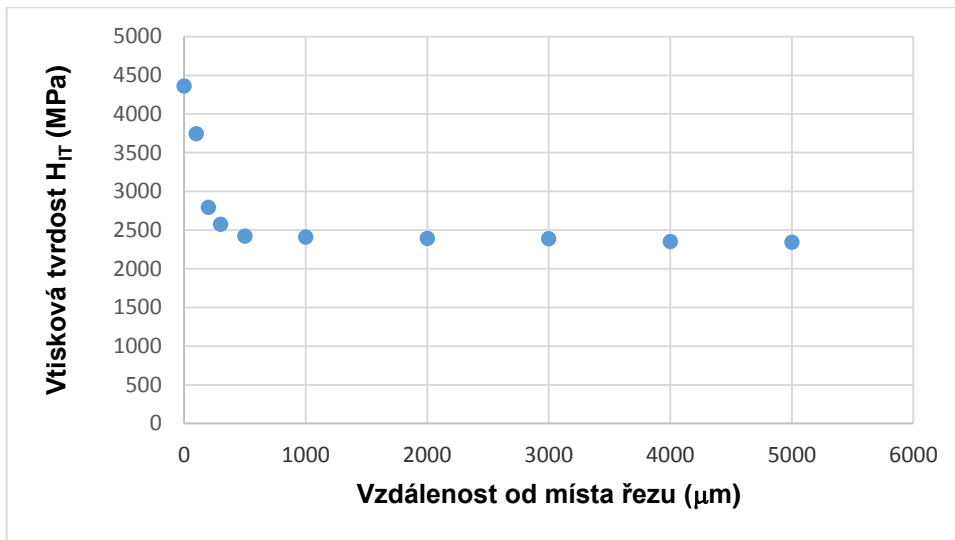
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 1 N největší (263,5 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (179,4 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 25



Obrázek 26. Deformační práce oceli 12060 při zatížení 1N

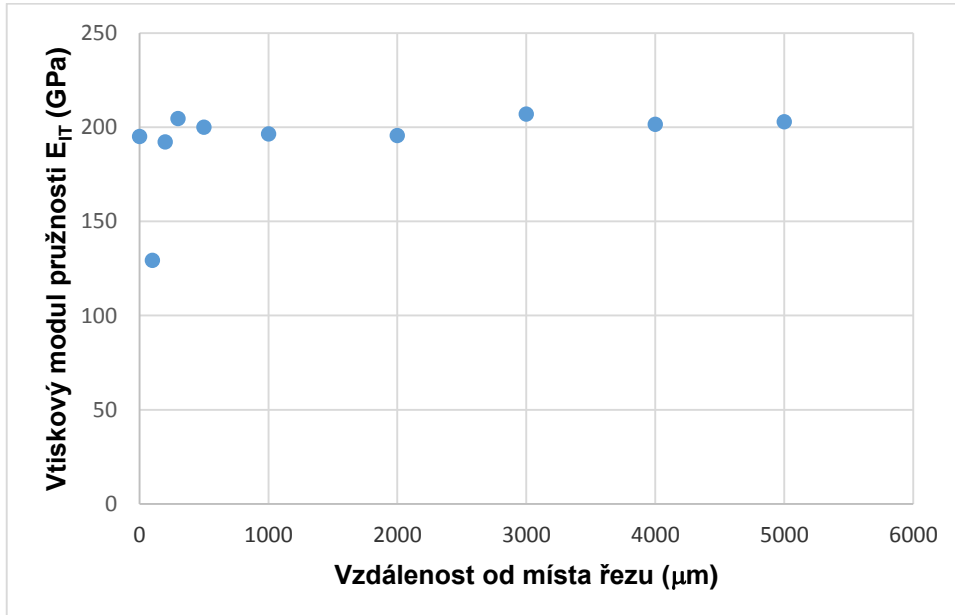
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 1 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 26

### 10.3 Zatížení 5N



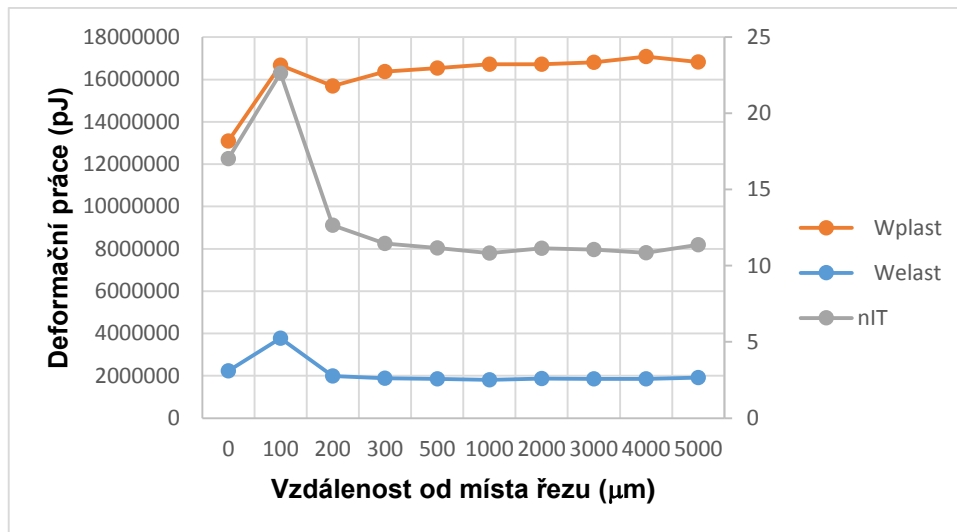
Obrázek 27. Vtisková tvrdost oceli 12060 při zatížení 5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 12060 při aplikovaném zatížení 5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (4630 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2344 MPa), jak je patrné z obrázku č. 27



Obrázek 28. Vtiskový modul pružnosti oceli 12060 při zatížení 5N

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 5 N největší (204,5 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (129,2 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 28

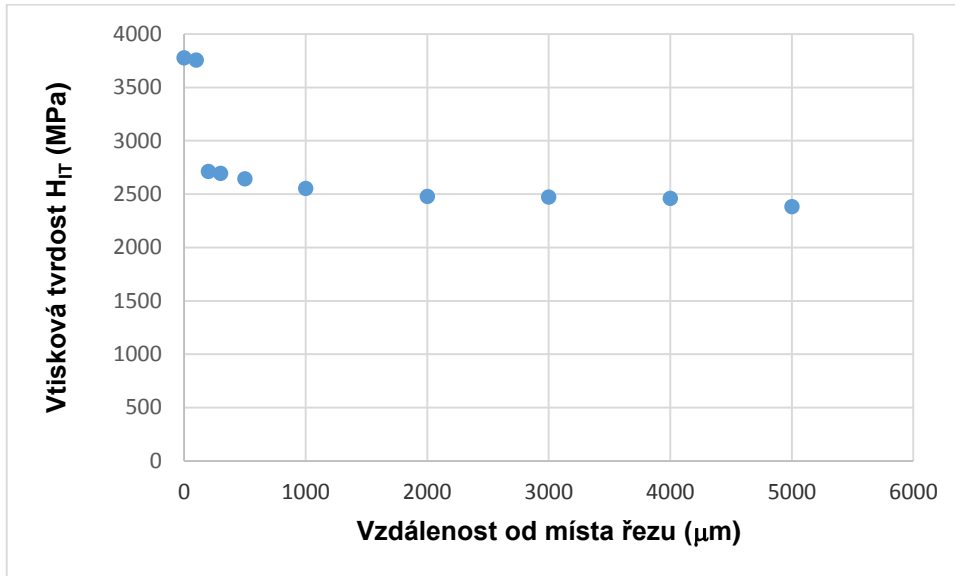


Obrázek 29. Deformační práce oceli 12060 při zatížení 5N

Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 29

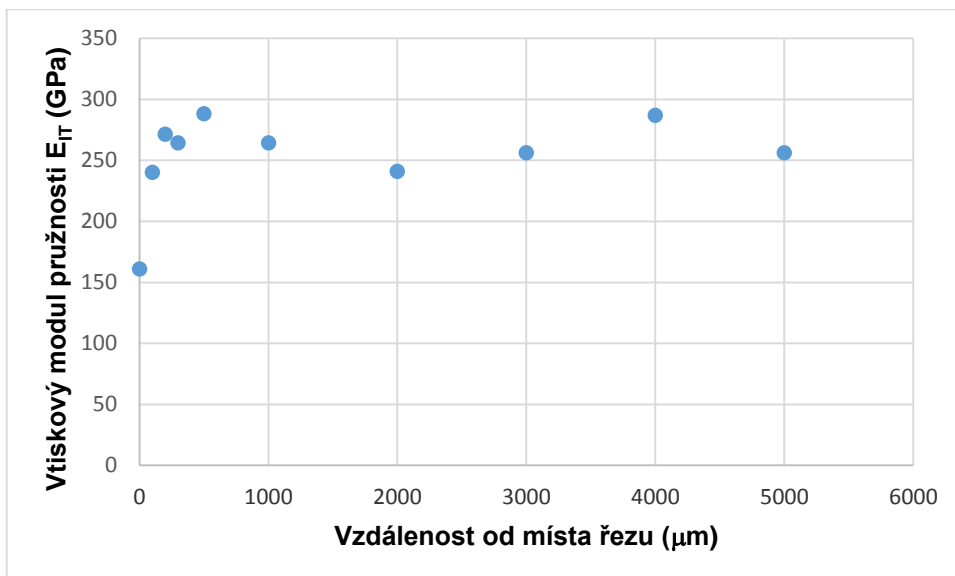
## 11 ČSN 414220 (16MNCr5, 1.7131)

### 11.1 Zatížení 0,5N



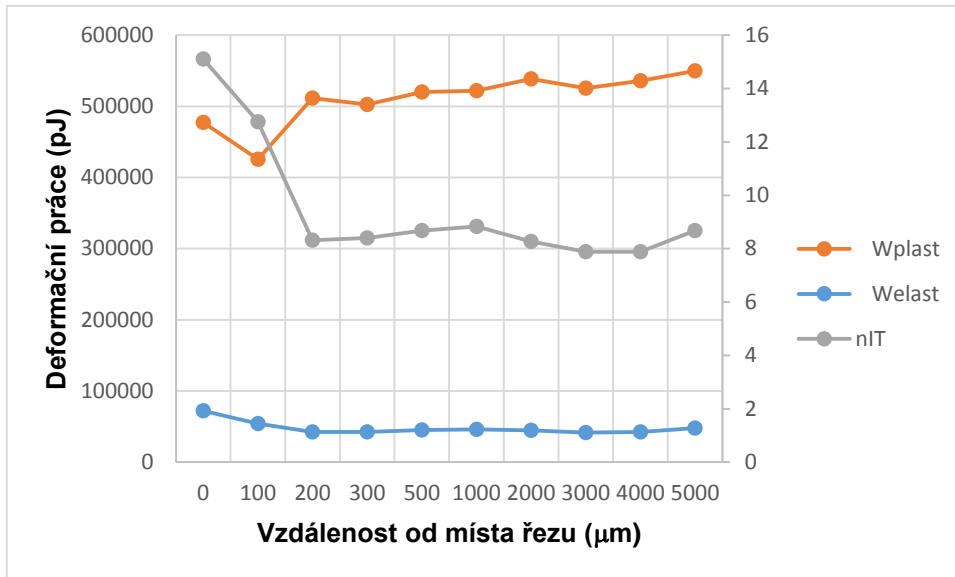
Obrázek 30. Vtisková tvrdost oceli 14220 při zatížení 0,5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 14220 při aplikovaném zatížení 0,5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3777 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2383 MPa), jak je patrné z obrázku č. 30



Obrázek 31. Vtiskový modul pružnosti oceli 14220 při zatížení 0,5N

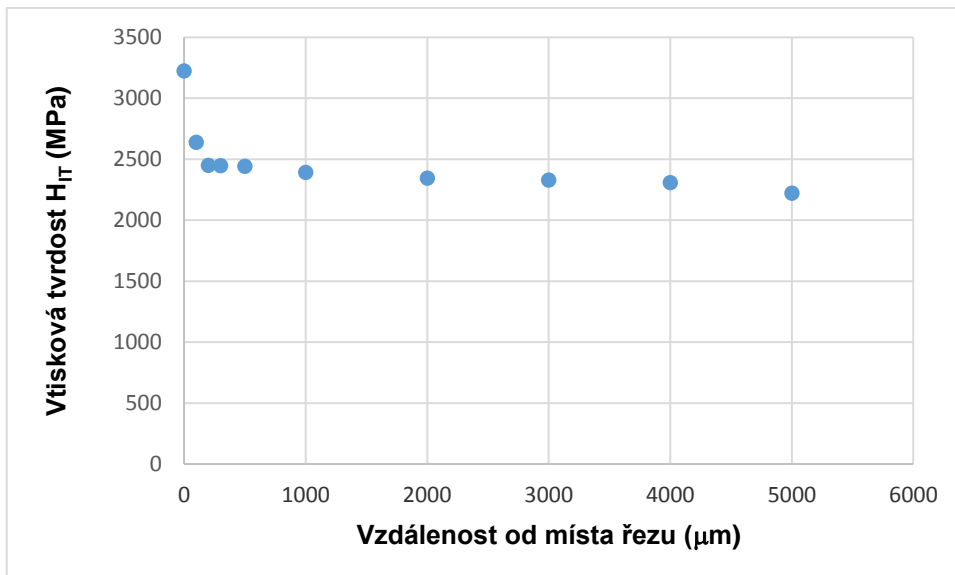
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 0,5 N největší (288 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (161 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 31



Obrázek 32. deformační práce oceli 14220 při zatížení 0,5N

Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 0,5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 32

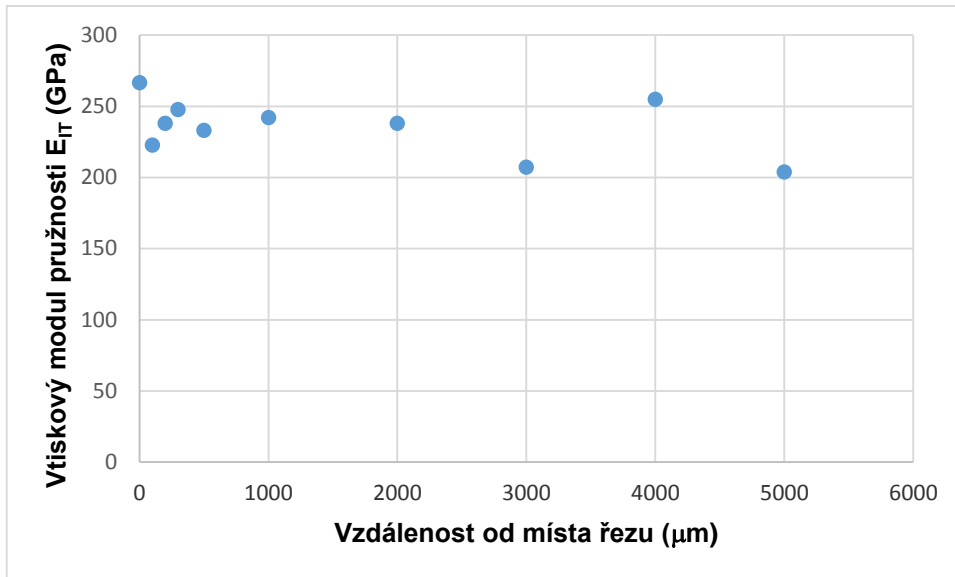
## 11.2 Zatížení 1N



Obrázek 33. Vtisková tvrdost oceli 14220 při zatížení 1N

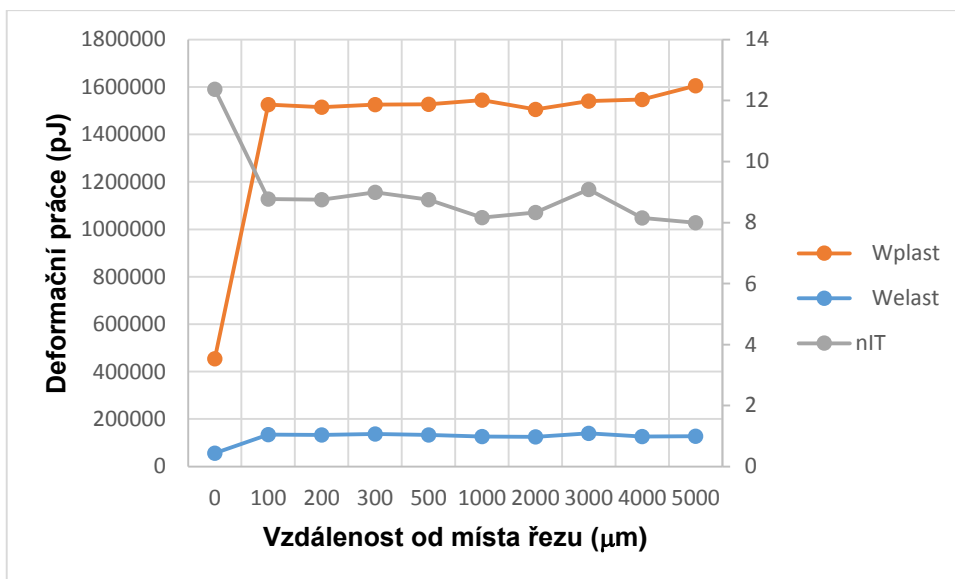
Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 14220 při aplikovaném zatížení 1 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3224 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2220 MPa), jak je patrné z obrázku č. 33





Obrázek 34. Vtiskový modul pružnosti oceli 14220 při zatížení 1N

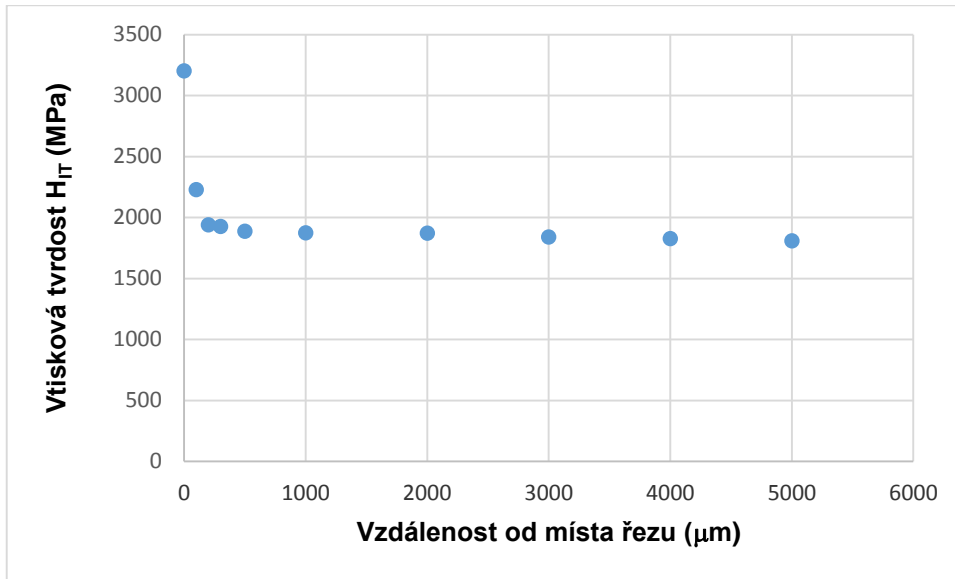
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 1 N největší (266 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (203 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 34



Obrázek 35. Deformační práce oceli 14220 při zatížení 1N

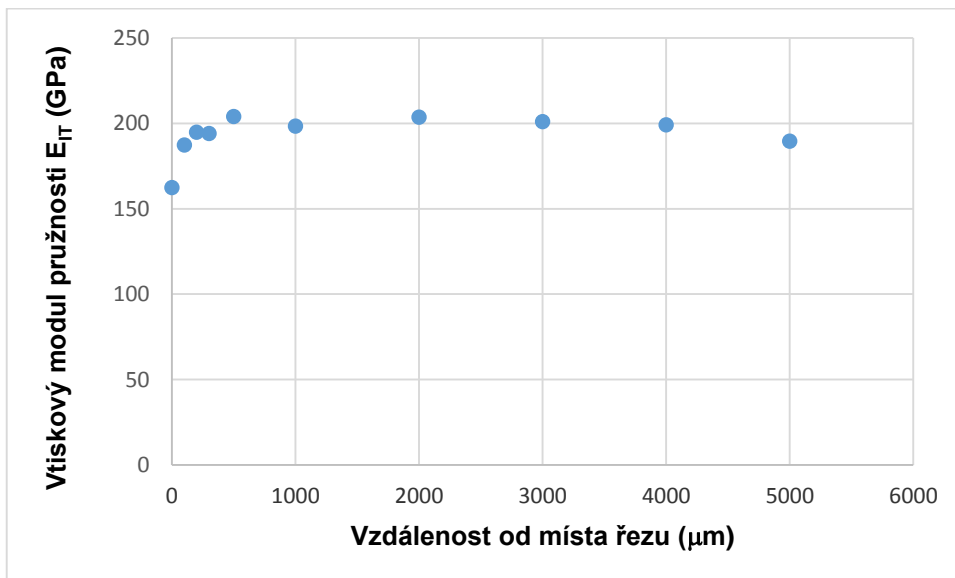
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 1 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 35

### 11.3 Zatížení 5N



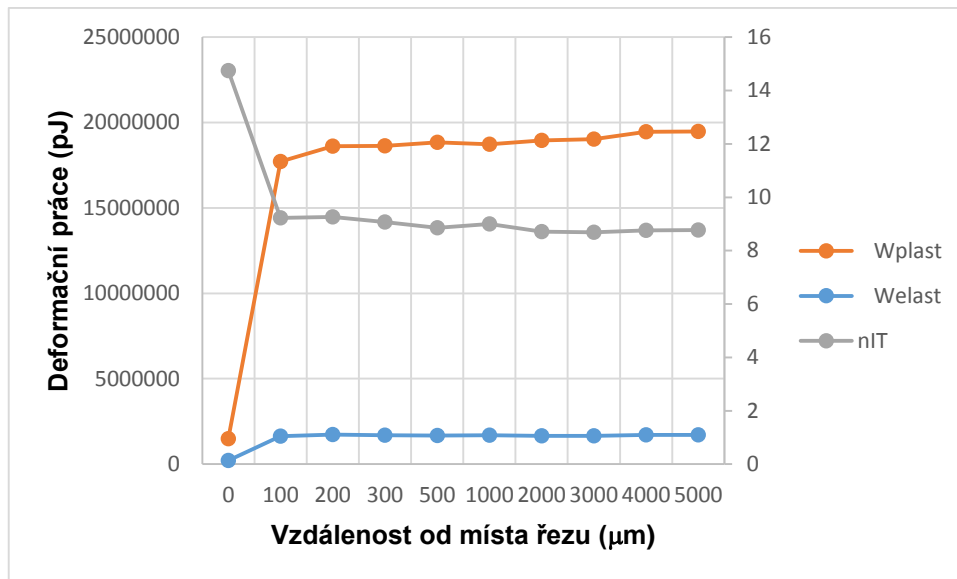
Obrázek 36. Vtisková tvrdost oceli 14220 při zatížení 5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 14220 při aplikovaném zatížení 5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (3202 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (1810 MPa), jak je patrné z obrázku č. 36



Obrázek 37. Vtiskový modul pružnosti oceli 14220 při zatížení 5N

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 5 N největší (204,2 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (162,5 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 37

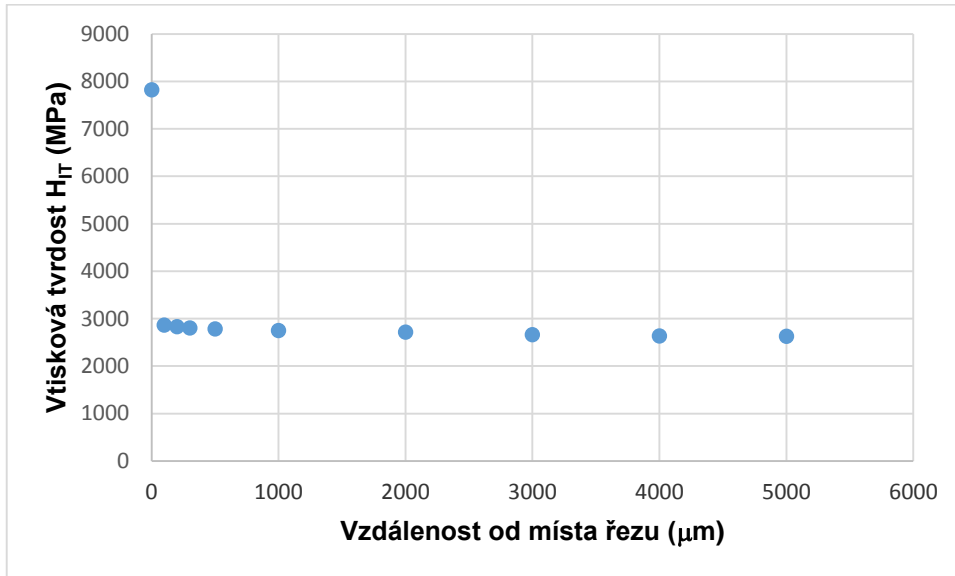


Obrázek 38. deformační práce oceli 14220 při zatížení 5N

Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 38

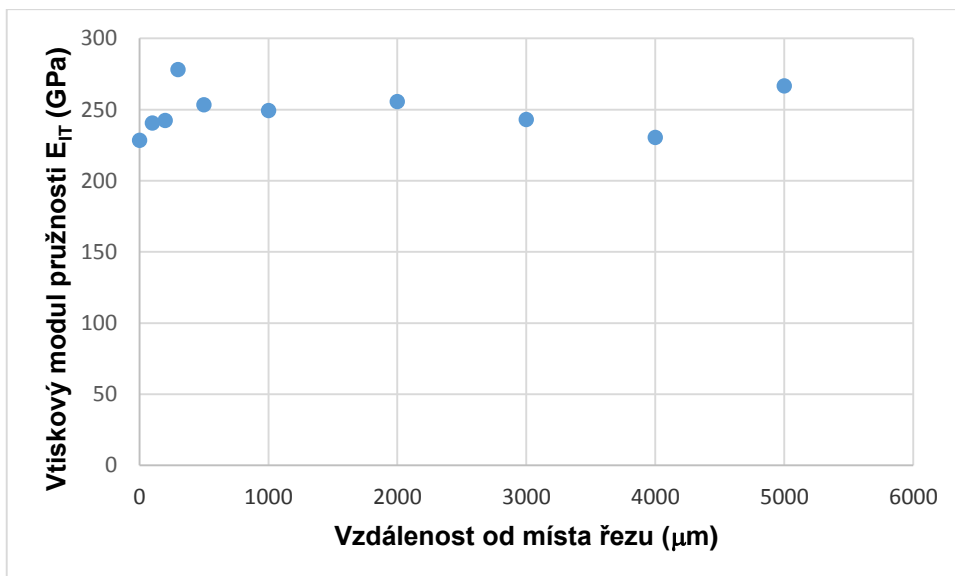
## 12 ČSN 414160 (55MNCR)

### 12.1 Zatížení 0,5N



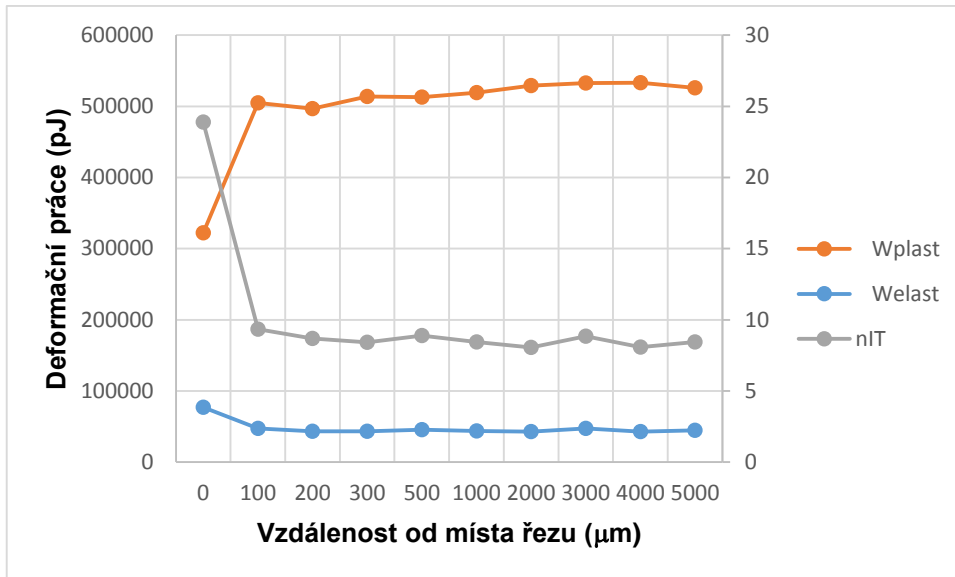
Obrázek 39. Vtisková tvrdost oceli 14160 při zatížení 0,5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 14160 při aplikovaném zatížení 0,5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (7825 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2632 MPa), jak je patrné z obrázku č. 39



Obrázek 40. Vtiskový modul pružnosti oceli 14160 při zatížení 0,5N

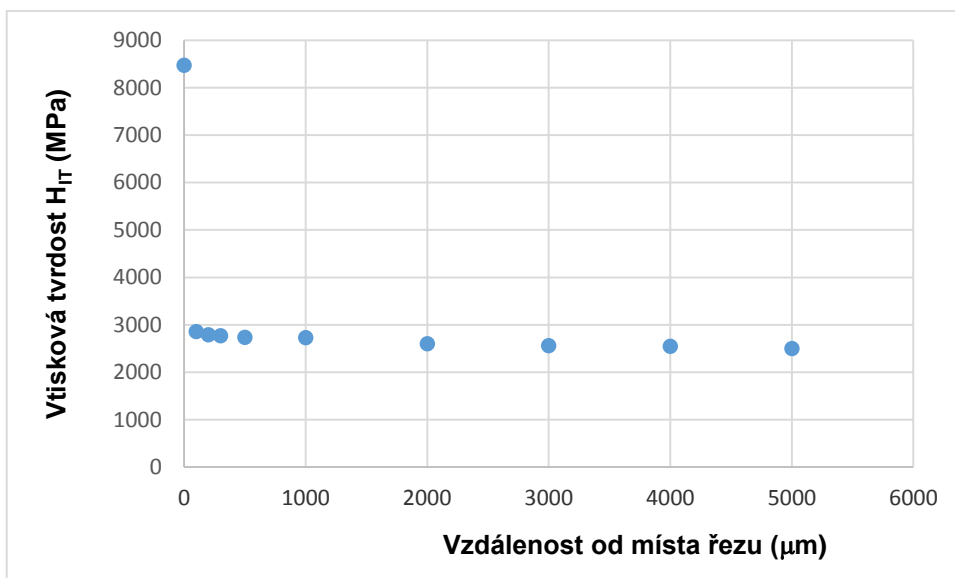
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 0,5 N největší (278 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (228,42 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 40



Obrázek 41. Deformační práce oceli 14160 při zatížení 0,5N

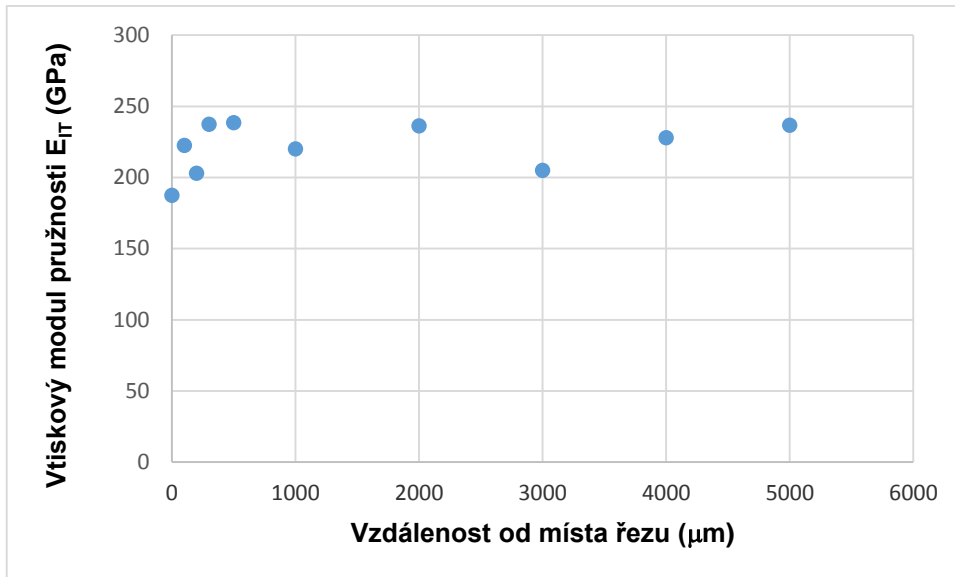
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 0,5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušební vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 41

## 12.2 Zatížení 1N



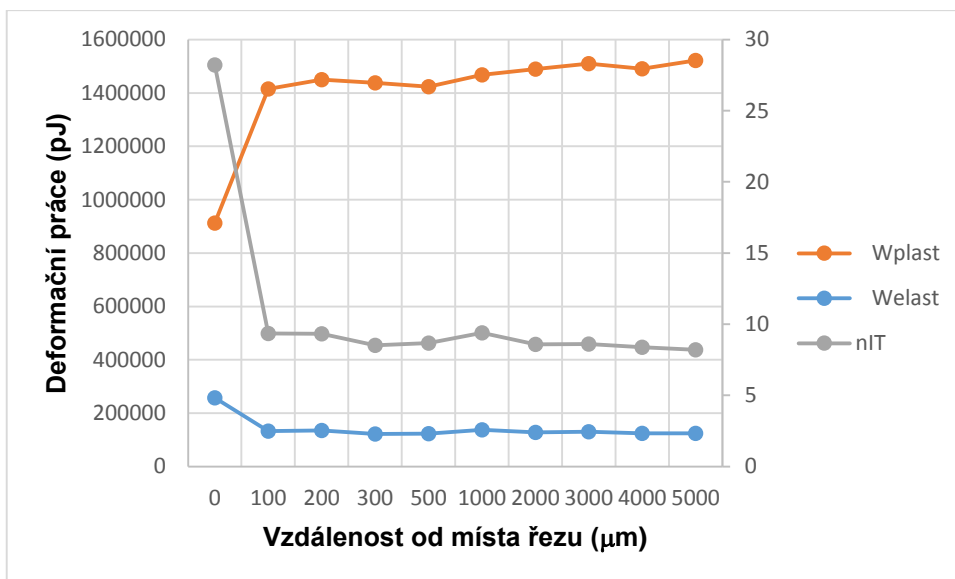
Obrázek 42. Vtisková tvrdost oceli 14160 při zatížení 1N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 14160 při aplikovaném zatížení 1 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (8470 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (2498 MPa), jak je patrné z obrázku č. 42



Obrázek 43. Vtiskový modul pružnosti oceli 14160 při zatížení 1N

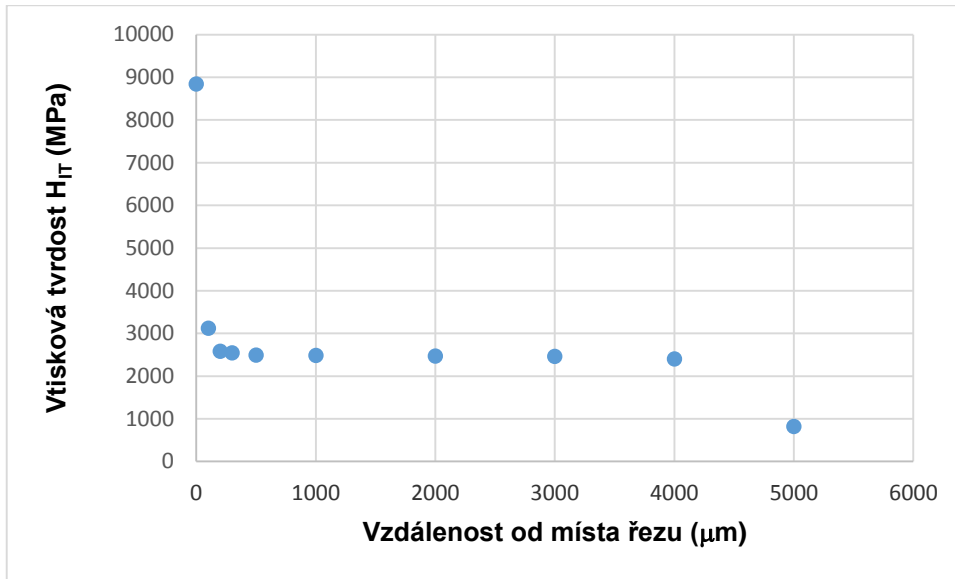
Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 1 N největší (238 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (187 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 43



Obrázek 44. Deformační práce oceli 14160 při zatížení 1N

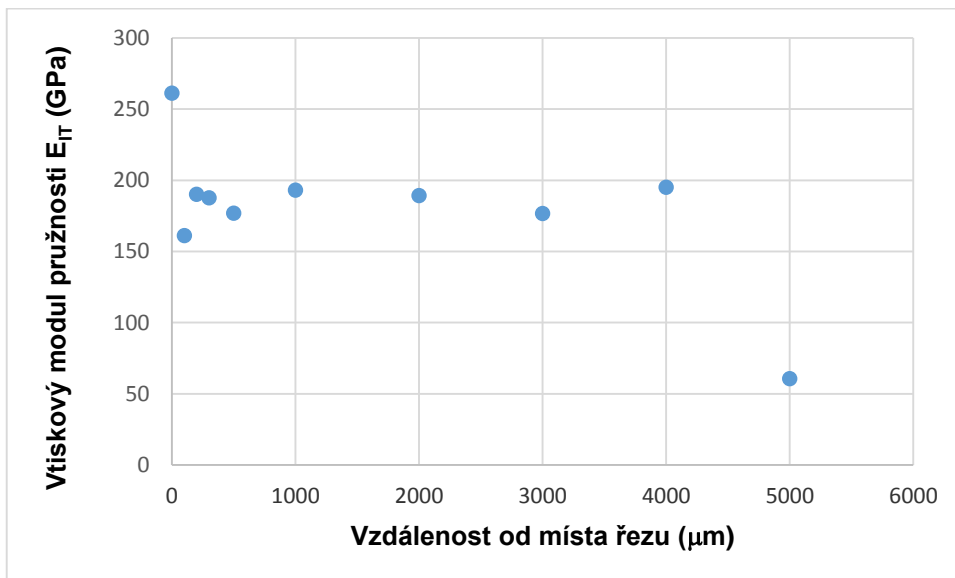
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 1 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 44

### 12.3 Zatížení 5N



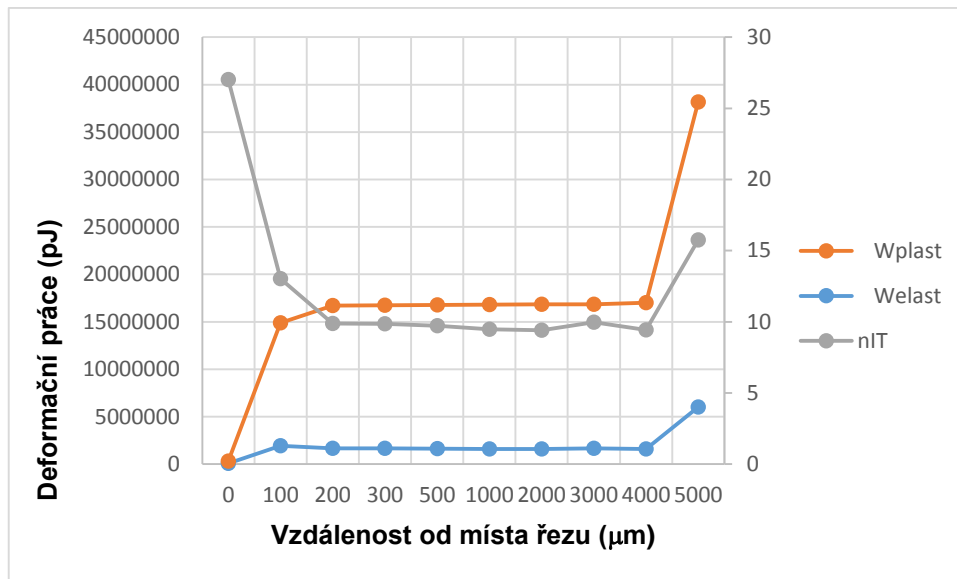
Obrázek 45. Vtisková tvrdost oceli 14160 při zatížení 5N

Při měření vtiskové tvrdosti u oceli 14160 při aplikovaném zatížení 5 N bylo zjištěno, že nejvyšší dosažená tvrdost byla naměřena v místě řezu (8839 MPa), naopak nejmenší tvrdost byla zjištěna ve středu součásti a dosáhla (817 MPa), jak je patrné z obrázku č. 45



Obrázek 46. Vtiskový modul pružnosti oceli 14160 při zatížení 5N

Vtiskový modul pružnosti, který reprezentuje mikrotuhost testované ovlivněné vrstvy byl naměřen při aplikovaném zatížení 5 N největší (261 GPa), naopak nejmenší mikrotuhost (60 GPa) byla zjištěna ve středu a na okraji součásti, jak je vidět z obr. č. 46



Obrázek 47. Deformační práce oceli 14160 při zatížení 5N

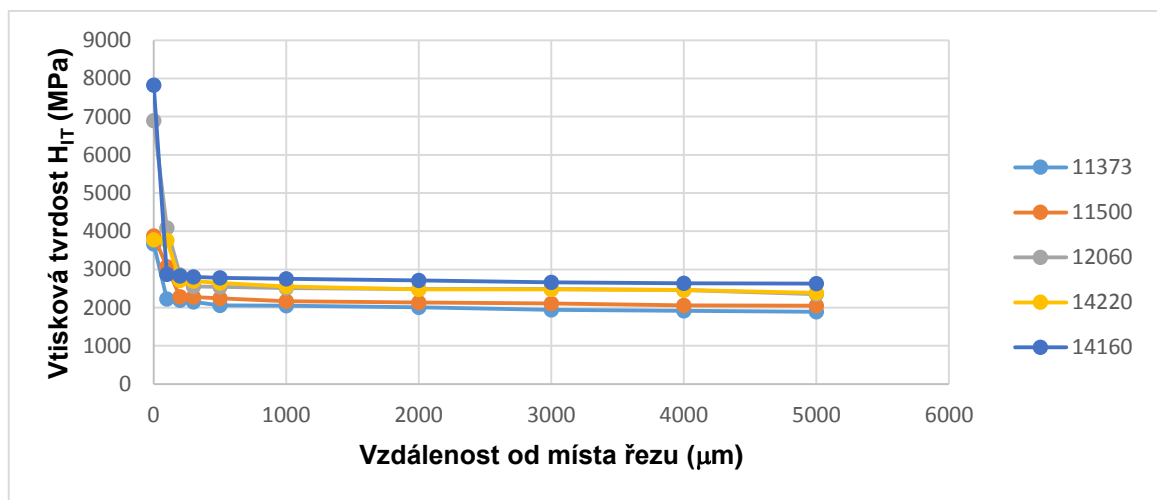
Při vyhodnocení deformační práce bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty elastické a plastické deformační práce měřené při zatížení 5 N byly zjištěny ve střední části měřeného zkušebního vzorku. Naopak nejmenší hodnoty byly naměřeny na okraji, v místě řezu, jak je patrné z obrázku č. 47



## 13 DISKUSE VÝSLEDKŮ

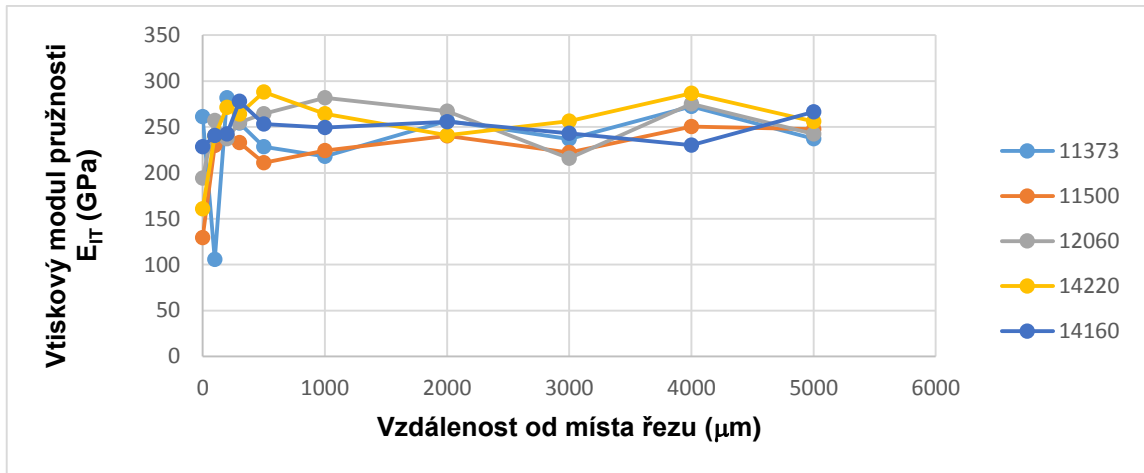
Praktická část bakalářské práce řeší problém ovlivnění povrchové vrstvy ocelí při řezání laserem. Bylo vybráno 5 typů ocelí (ČSN 411373 (S235JR, 1.0038), ČSN 411500 (E295, 1.0050), ČSN 412060 (C55, 1.1203), ČSN 414220 (16MnCr5, 1.7131) a ČSN 414160 (55MnCr)). Zkušební vzorky z vybraných typů ocelí byly nařezány laserem na příslušné rozměry. Ovlivnění povrchové vrstvy bylo měřeno instrumentovanou zkouškou mikrotvrdoměří. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

### 13.1 Zatížení 0,5N



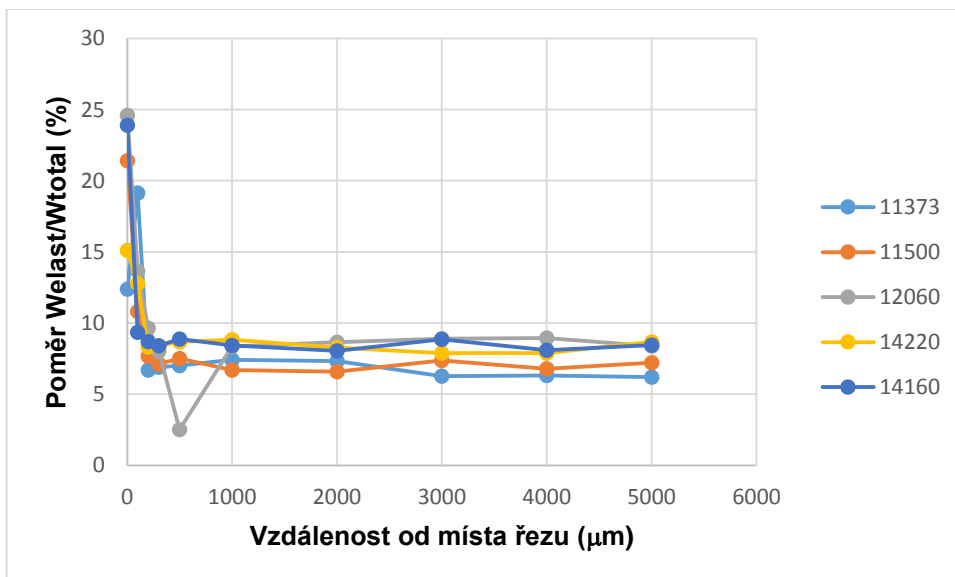
Obrázek 48. porovnání vtiskových tvrdostí jednotlivých ocelí při zatížení 0,5N

Při vyhodnocení vtiskové tvrdosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti pro zatížení 0,5 N byly naměřeny u oceli 14 160, naopak nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny u oceli 11373, jak je vidět z obrázku č. 48. Druhou nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti dosáhla ocel 12060. Při pohledu na výsledky měření je zřejmé, že rozhodující vliv bude mít obsah uhlíku. Oceli s vyšším obsahem uhlíku dosahují vyšších hodnot vtiskové tvrdosti. Ovlivnění povrchové vrstvy při řezání laserem bylo do hloubky 0.1 až 0.2 mm.



Obrázek 49. porovnání vtisk. modulů pružnosti jednotlivých ocelí při zatížení 0,5N

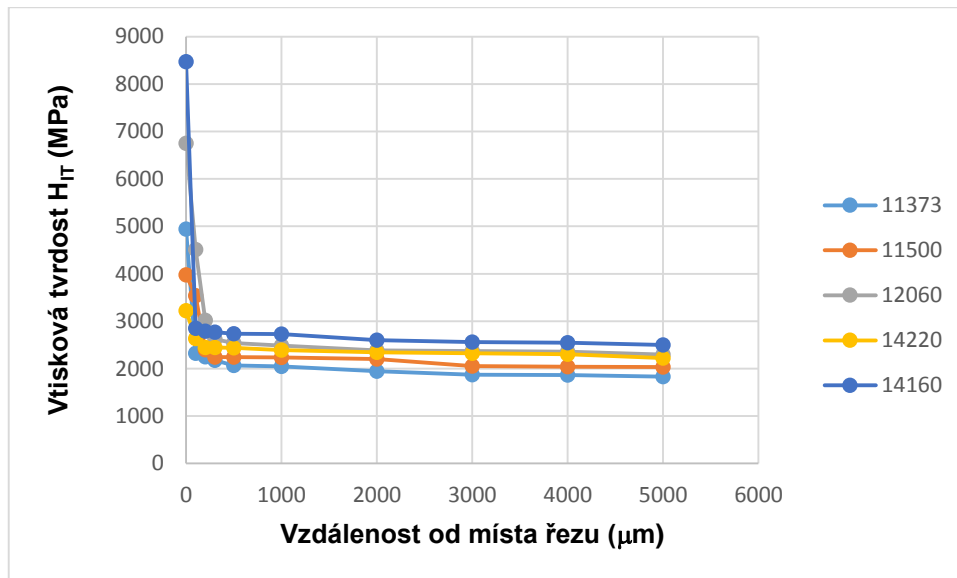
Porovnáním vtiskového modulu pružnosti pro zatížení 0,5 N (obrázek č. 49), který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy (oblasti) bylo zjištěno, že nejvyšší hodnotu mikrotuhosti dosáhla střední oblast zkušební vzorku. Nejmenší hodnoty mikrotuhosti dosáhl okraj zkušební vzorku v místě řezu. To je způsobeno vzniklou strukturou, která vznikla v místě řezu, které bude tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým (obrázek č. 57). Naopak střední oblast zkušební vzorku bude tvořena perlitem, který bude vykazovat větší mikrotuhost.



Obrázek 50. porovnání deformačních prací jednotlivých ocelí při zatížení 0,5N

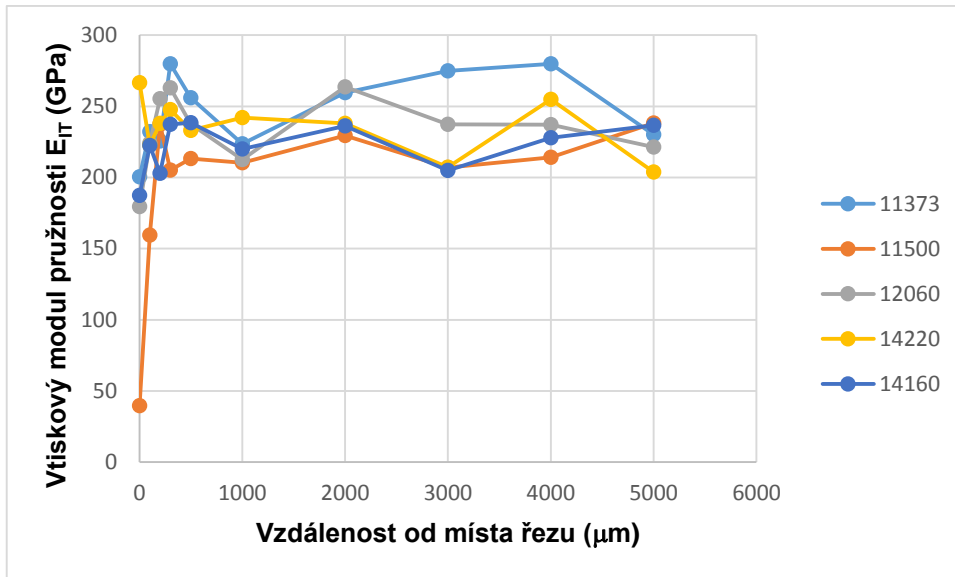
Poměr deformační práce elastické ku práci celkové při zatížení 0,5 N byl zaznamenán nejvyšší u oceli 12060, ocel 14160 ho má ovšem velmi podobný, nejvyšší hodnoty se nacházejí blízko k místu řezu jak je patrné z obrázku č. 50.

### 13.2 Zatížení 1N



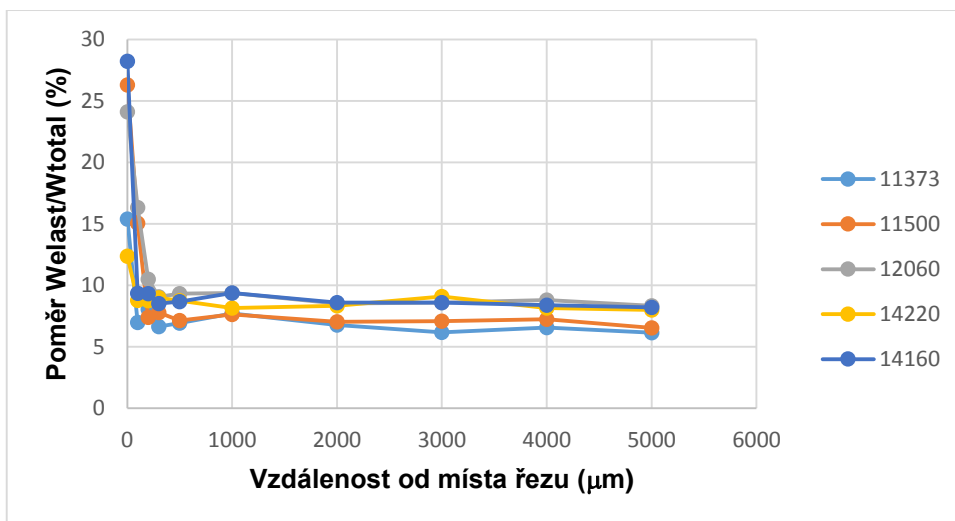
Obrázek 51. porovnání vtiskových tvrdostí jednotlivých ocelí při zatížení 1N

Při vyhodnocení vtiskové tvrdosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti pro zatížení 1 N byly naměřeny u oceli 14 160, naopak nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny u oceli 14220, jak je vidět z obrázku č. 51. Druhou nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti dosáhla ocel 12060. Při pohledu na výsledky měření je zřejmé, že rozhodující vliv bude mít obsah uhlíku. Oceli s vyšším obsahem uhlíku dosahují vyšších hodnot vtiskové tvrdosti. Ovlivnění povrchové vrstvy při řezání laserem bylo do hloubky 0.1 až 0.2 mm.



Obrázek 52. porovnání vtisk. modulů pružnosti jednotlivých ocelí při zatížení 1N

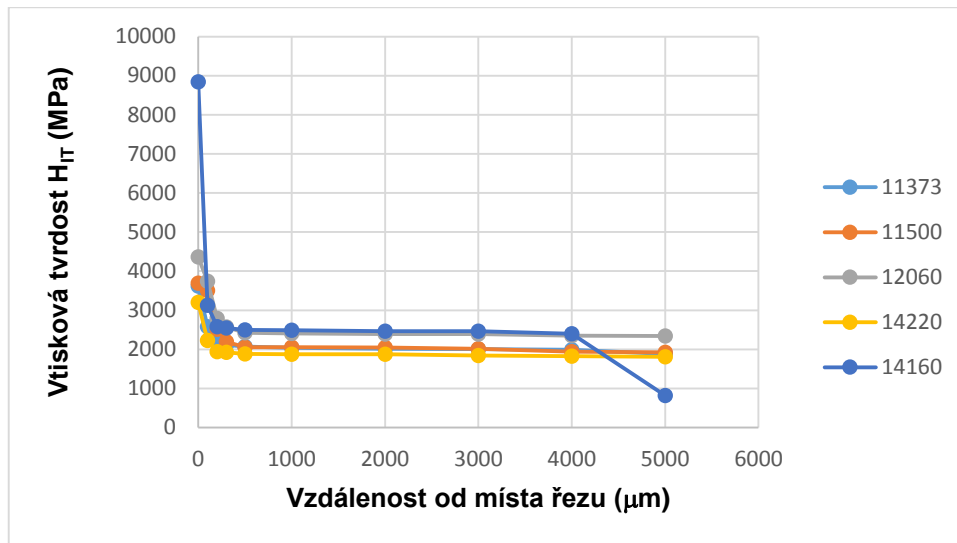
Porovnáním vtiskového modulu pružnosti pro zatížení 1 N (obrázek č. 52), který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy (oblasti) bylo zjištěno, že nejvyšší hodnotu mikrotuhosti dosáhla střední oblast zkušební vzorku. Nejmenší hodnoty mikrotuhosti dosáhl okraj zkušební vzorku v místě řezu. To je způsobeno vzniklou strukturou, která vznikla v místě řezu, které bude tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým (obrázek č. 57). Naopak střední oblast zkušební vzorku bude tvořena perlitem, který bude vykazovat větší mikrotuhost.



Obrázek 53. porovnání deformačních prací jednotlivých ocelí při zatížení 1N

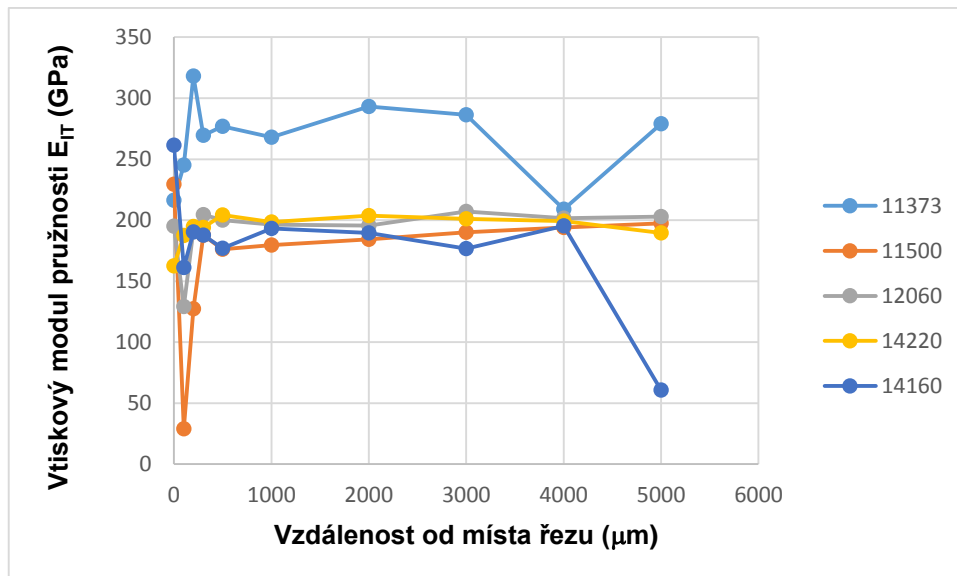
Poměr deformační práce elastické ku práci celkové jsem zaznamenal nejvyšší u oceli 14160, ocel 11500 a 12060 ho mají ovšem velmi podobný, nejvyšší hodnoty se nacházejí blízko k místu řezu. Nejnižší hodnotu má ocel 14220 jak je patrné z obrázku č. 53.

### 13.3 Zatížení 5N



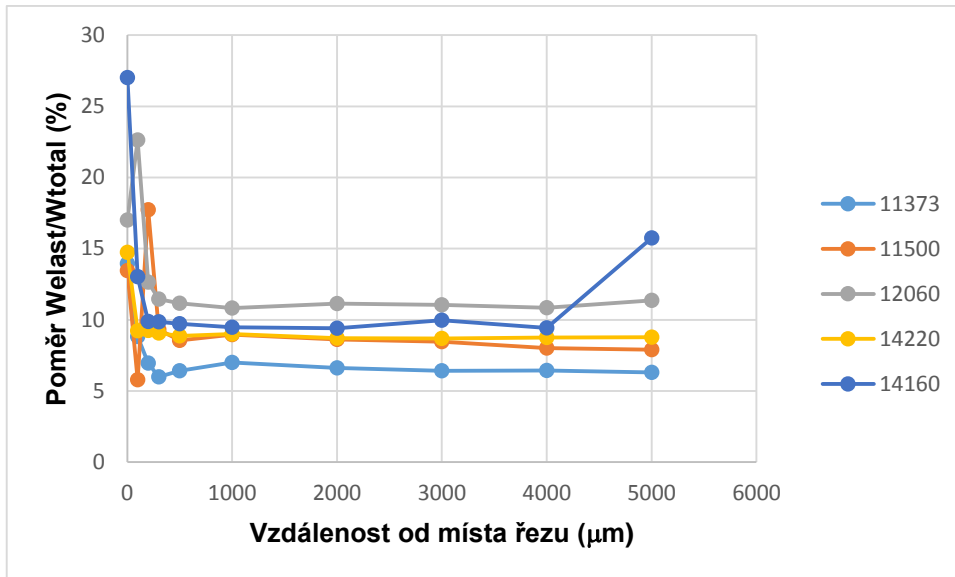
Obrázek 54. porovnání vtiskových tvrdostí jednotlivých ocelí při zatížení 5N

Při vyhodnocení vtiskové tvrdosti bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti pro zatížení 5 N byly naměřeny u oceli 14 160, naopak nejmenší hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny u oceli 14220, jak je vidět z obrázku č. 54. Druhou nejvyšší hodnotu vtiskové tvrdosti dosáhla ocel 12060. Při pohledu na výsledky měření je zřejmé, že rozhodující vliv bude mít obsah uhlíku. Oceli s vyšším obsahem uhlíku dosahují vyšších hodnot vtiskové tvrdosti. Ovlivnění povrchové vrstvy při řezání laserem bylo do hloubky 0.1 až 0.2 mm.



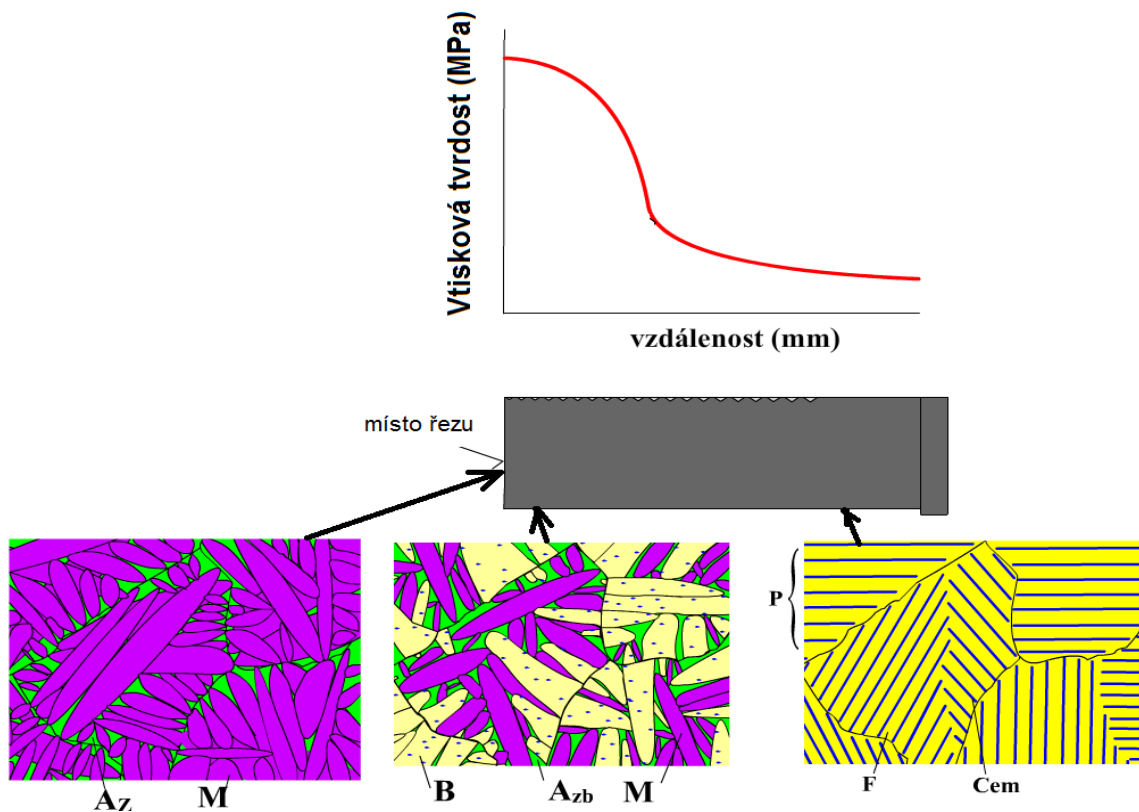
Obrázek 55. porovnání vtisk. Modulů pružnosti jednotlivých ocelí při zatížení 5N

Porovnáním vtiskového modulu pružnosti pro zatížení 5 N (obrázek č. 55), který reprezentuje mikrotuhost testované povrchové vrstvy (oblasti) bylo zjištěno, že nejvyšší hodnotu mikrotuhosti dosáhla střední oblast zkušební vzorku. Nejmenší hodnoty mikrotuhosti dosáhl okraj zkušební vzorku v místě řezu. To je způsobeno vzniklou strukturou, která vznikla v místě řezu, které bude tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým (obrázek č. 57). Naopak střední oblast zkušební vzorku bude tvořena perlitem, který bude vykazovat větší mikrotuhost.



Obrázek 56. porovnání deformačních prací jednotlivých ocelí při zatížení 5N

Poměr deformační práce elastické ku práci celkové jsem zaznamenal nejvyšší u oceli 14160, ostatní oceli jsou poměrně níže a jejich hodnoty jsou velmi podobné, jak je patrné z obrázku č. 56.



Obrázek 57. struktura v místě řezu tvořená martenzitem a austenitem zbytkovým

## ZÁVĚR

Bakalářská práce řeší problém tepelného ovlivnění povrchové vrstvy při řezání (dělení) materiálu laserem. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část proběhla v podniku TAJMAC – ZPS na zařízení TRIUMPF a pro měření mikrotvrdomi upravena na strojích v laboratoři ÚVI. Pro výzkum ovlivnění povrchové vrstvy byly vybrány následující typy ocelí s různým obsahem uhlíku, které jsou průmyslově vyráběny a zpracovávány. Vybrány byly oceli ČSN 411373 (S235JR, 1.0038), ČSN 411500 (E295, 1.0050), ČSN 412060 (C55, 1.1203), ČSN 414220 (16MnCr5, 1.7131) a ČSN 414160 (55MnCr). Na připravených zkušebních vzorcích bylo provedeno měření mikrotvrdomi (DSI – instrumentovaná zkouška mikrotvrdomi) přístrojem MicroCombi Tester, CSM – Instruments při aplikovaném zatížení 0,5N, 1N a 5N. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány a vyhodnoceny.

Z výsledků měření mikrotvrdomi vyplynulo, že nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti dosáhly oceli vyšším obsahem uhlíku, které jsou běžně kalitelné. Jedná se o oceli 14160 a 12050. Naopak nejmenších hodnoty vtiskové tvrdosti byly zjištěny u nízkouhlíkatých vybraných typech ocelí (11373 a 14220). Při pohledu na velikost zatížení při zkoušce mikrotvrdomi vyšlo najevo, že se vzrůstajícím zatížení docházelo k poklesu hodnot vtiskové tvrdosti. Ovlivněná povrchová oblast při řezání laserem byla u ocelí okolo 0,1 až 0,2 mm. Oceli s vyšším obsahem uhlíku vykazují vyšší hloubku ovlivnění a oceli s nižším obsahem uhlíku vykazují nižší hloubku ovlivnění.

Výsledky vtiskového modulu pružnosti ukázaly, že nejvyšší hodnoty mikrotuhosti reprezentované vtiskovým modulem pružnosti byly naměřeny ve střední části zkušebního vzorku, naopak nejnižší hodnoty mikrotuhosti byly zjištěny v místě řezu, to je způsobeno strukturou vzniklou v místě řezu vytvořenou rychlým ochlazením (vyšší než kritická rychlost ochlazení). Struktura je tvořena martenzitem a austenitem zbytkovým. S rostoucím zatížením klesala hodnota mikrotuhosti. Oceli s vyšším obsahem uhlíku dosahují vyšší hodnoty mikrotuhosti, zatímco oceli s nižším obsahem uhlíku dosahují nižší mikrotuhosti.

Výsledky deformační práce ukázaly, že nejvyšší hodnoty deformační práce nabývala v místě řezu, naopak nejnižší hodnoty byly zjištěny ve středu a na krajích materiálu.



U oceli s vyšším obsahem uhlíku se v místě řezu vytváří struktura tvořená austenitem zbytkovým a martenzitem s mnohem vyšší tvrdostí než u oceli s nižším obsahem uhlíku, u kterého vzniká struktura martenzitu a austenitu zbytkového s mnohem nižší tvrdostí.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] WALLA, Viktor. *Praktická metalografie*. Praha: SNTL, 1962. 101s. bez ISBN
- [2] PTÁČEK L. *Nauka o materiálu 2. rozšířené a upravené vydání*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 516s. ISBN 80-2704-283-1.
- [3] SILFVAST T, William. *Laser Fundamentals*. Cambridge: University Press, 1996. 552s. ISBN 0-521-55617-1.
- [4] TABOR, David. *The hardness of metals*. Oxford: University press, 2000, 175s. ISBN 0-19-850776-3.
- [5] ŘASA J., ŠVERCL J. *strojnické tabulky II*. 1. vyd. Praha: nakladatelství SCIENTIA, spol. s.r.o, 2007, 586s. ISBN 978-80-86960-20-3
- [6] DEGARMO, E. PAUL, BLACK, J T, KOHSER, RONALD A. *Materials and Processes in Manufacturing*. Wiley, 2003. 1168s. ISBN 0-471-65653-4
- [7] BODYCOTE, [online]. 2002 [cit. 2016.04-25]. Dostupné z <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/harden-and-temper.aspx>
- [8] ATEAM, [online]. 2005 [cit. 2016.04-22]. Dostupné z [http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [9] VUTBR, [online]. 2009 [cit. 2016.04-18]. Dostupné z [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27306](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306)
- [10] REZEME-VODOU, [online]. 2000 [cit. 2016.04-17]. Dostupné z <http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- [11] ESAB, [online]. 1995 [cit. 2016.04-27]. Dostupné z <http://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>
- [12] TUMLIKOVO, [online]. 2008 [cit. 2016.04-23]. Dostupné z <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-oceli/oceli-tridy-17/>
- [13] JHAMERNIK, [online]. 2010 [cit. 2016.04-29]. Dostupné z [http://jhamernik.sweb.cz/technicke\\_materialy.htm](http://jhamernik.sweb.cz/technicke_materialy.htm)
- [14] CEZ, [online]. 2000 [cit. 2016.04-27]. Dostupné z <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.htm>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$H_{IT}$	Vtisková tvrdost
$E_{IT}$	Vtiskový modul pružnosti
$W_{elast}$	Pružná část práce vnikacího procesu
$W_{plast}$	Plastická část práce vnikacího procesu
$W_{total}$	Celková práce vnikacího procesu
$n_{IT}$	Poměr elastické a celkové práce vnikacího procesu

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1. Dělení materiálu laserem .....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 2. Mikrotvrdoměr MicroCombi Tester .....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 3. Vtisková tvrdost oceli 11373 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 4. Vtiskový modul pružnosti oceli 11373 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 5. Deformační práce oceli 11373 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 6. Vtisková tvrdost oceli 11373 při zatížení 1N.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 7. Vtiskový modul pružnosti oceli 11373 při zatížení 1N .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 8. Deformační práce oceli 11373 při zatížení 1N .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 9. Vtisková tvrdost oceli 11373 při zatížení 5N.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 10. Vtiskový modul pružnosti oceli 11373 při zatížení 5N .....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 11. deformační práce oceli 11373 při zatížení 5N .....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 12. Vtisková tvrdost oceli 11500 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 13. Vtiskový modul pružnosti oceli 11500 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 14. deformační práce oceli 11500 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 15. Vtisková tvrdost oceli 11500 při zatížení 1N.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 16. Vtiskový model pružnosti oceli 11500 při zatížení 1N .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 17. deformační práce oceli 11500 při zatížení 1N .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 18. Vtisková tvrdost oceli 11500 při zatížení 5N.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 19. Vtiskový modul pružnosti oceli 11500 při zatížení 5N .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 20. deformační práce oceli 11500 při zatížení 5N .....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 21. Vtisková tvrdost oceli 12060 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 22. Vtiskový modul pružnosti oceli 12060 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 23. Deformační práce oceli 12060 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 24. Vtisková tvrdost oceli 12060 při zatížení 1N.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 25. Vtiskový modul pružnosti oceli 12060 při zatížení 1N .....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 26. Deformační práce oceli 12060 při zatížení 1N .....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 27. Vtisková tvrdost oceli 12060 při zatížení 5N.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 28. Vtiskový modul pružnosti oceli 12060 při zatížení 5N .....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 29. Deformační práce oceli 12060 při zatížení 5N .....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 30. Vtisková tvrdost oceli 14220 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 31. Vtiskový modul pružnosti oceli 14220 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 32. deformační práce oceli 14220 při zatížení 0,5N .....</i>	<i>56</i>

<i>Obrázek 33. Vtisková tvrdost oceli 14220 při zatížení 1N.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 34. Vtiskový modul pružnosti oceli 14220 při zatížení 1N.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 35. Deformační práce oceli 14220 při zatížení 1N.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 36. Vtisková tvrdost oceli 14220 při zatížení 5N.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 37. Vtiskový modul pružnosti oceli 14220 při zatížení 5N.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 38. deformační práce oceli 14220 při zatížení 5N.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 39. Vtisková tvrdost oceli 14160 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 40. Vtiskový modul pružnosti oceli 14160 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 41. Deformační práce oceli 14160 při zatížení 0,5N.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 42. Vtisková tvrdost oceli 14160 při zatížení 1N.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 43. Vtiskový modul pružnosti oceli 14160 při zatížení 1N.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 44. Deformační práce oceli 14160 při zatížení 1N.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 45. Vtisková tvrdost oceli 14160 při zatížení 5N.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 46. Vtiskový modul pružnosti oceli 14160 při zatížení 5N.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 47. Deformační práce oceli 14160 při zatížení 5N.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 48. porovnání vtiskových tvrdostí jednotlivých ocelí při zatížení 0,5N.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 49. porovnání vtisk. modulů pružnosti jednotlivých ocelí při zatížení 0,5N.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 50. porovnání deformačních prací jednotlivých ocelí při zatížení 0,5N.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 51. porovnání vtiskových tvrdostí jednotlivých ocelí při zatížení 1N.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 52. porovnání vtisk. modulů pružnosti jednotlivých ocelí při zatížení 1N.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 53. porovnání deformačních prací jednotlivých ocelí při zatížení 1N.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 54. porovnání vtiskových tvrdostí jednotlivých ocelí při zatížení 5N.....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 55. porovnání vtisk. Modulů pružnosti jednotlivých ocelí při zatížení 5N.....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 56. porovnání deformačních prací jednotlivých ocelí při zatížení 5N.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 57. struktura v místě řezu tvořená martenzitem a austenitem zbytkovým.....</i>	<i>71</i>