

# **Studium strukturálních změn v oceli po průchodu laserového paprsku**

Bc. Lubomír Josefík

---

Diplomová práce  
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lubomír Josefík**

Osobní číslo: **T15334**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium strukturálních změn v oceli po průchodu laserového paprsku**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Experimentální obrábění vybraných materiálů
3. Laboratorní zkoušky za účelem posouzení strukturálních změn v materiálu
4. Vyhodnocení získaných dat a statistické zpracování

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**dle vedoucí práce**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

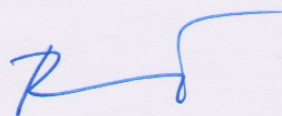
Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2017**

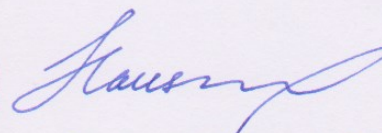
Termín odevzdání diplomové práce:

**12. května 2017**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



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



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <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 užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 12.5.2017

.....



---

<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 vzdělávacímu 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). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá jak tematikou technologickou, tak tematikou materiálovou ve spojení s oblastí dělení materiálu laserem. Vzhledem k různým používaným metodám v dnešní průmyslové praxi, práce porovnává změnu mechanických vlastností materiálu po průchodu laserového paprsku. V rešeršní části práce jsou z hlediska principu tyto metody rozebrány a porovnány obecné charakteristiky a průmyslové i oborové využití. Náplní praktické části je experimentální obrábění kovových materiálů na vláknovém laseru. Získané vzorky jsou podrobeny laboratornímu měření za účelem vyhodnocení jakosti řezných ploch a posouzení možných strukturálních změn v důsledku teplotního zatížení o různé intenzitě. Z důvodu statistického vyhodnocení je vytvořeno několik vzorků různých materiálů.

Klíčová slova: Laser, paprsek, ocel, řezání

## **ABSTRACT**

Diploma thesis begins with technologic and material theme in connection with laser cutting section. Since, in view of the fact that different methods in industry are used, thesis puts these methods in comparison after operation of laser cutting. In the theoretical part are these methods and their basic attributes compared from the point of view of industry. Main subject of practical part is experimental machining of metal materials. Obtained samples are measured in order to evaluation of cutting surface roughness and structural transformation in case of exposition to heating source of different intensity. On the grounds of statistic results were made a few samples of different materials.

Keywords: Laser, beam, steel, cutting

Těmito několika řádky bych chtěl poděkovat doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za vedení, ochotu a trpělivost při četných dotazech. Za finanční podporu a skálopevnou důvěru bych chtěl poděkovat svým rodičům a v neposlední řadě přítelkyni za psychickou podporu během celého studia.

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

Ve Zlíně, 12.5.2017

.....

# OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 LASER.....	12
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	12
1.1.1 Laserový svazek .....	12
1.1.2 Stimulovaná emise .....	13
1.1.3 Inverzní populace .....	13
1.2 ROZDĚLENÍ LASERŮ .....	13
1.2.1 Pevnolátkové lasery .....	13
1.2.2 Polovodičové lasery .....	14
1.2.3 Plynové lasery .....	14
1.2.3.1 CO <sub>2</sub> laser .....	15
1.2.3.2 CO <sub>2</sub> lasery z hlediska čerpání .....	15
1.2.4 Kapalinové lasery .....	15
1.2.5 Plazmové lasery .....	15
1.3 KATEGORIE BEZPEČNOSTI .....	16
1.3.1 Kategorie I.....	16
1.3.2 Kategorie II .....	17
1.3.3 Kategorie III .....	17
1.3.4 Kategorie IV .....	17
2 APLIKACE LASERU.....	18
2.1 INTERAKCE PAPRSKU A MATERIÁLU .....	18
2.2 LASEROVÉ OXIDAČNÍ ŘEZÁNÍ .....	20
2.3 LASEROVÉ SUBLIMAČNÍ ŘEZÁNÍ .....	20
2.4 LASEROVÉ PROTAVOVÁNÍ .....	21
2.5 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ .....	21
2.6 LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ.....	22
2.6.1 Soustružení.....	23
2.6.2 Frézování.....	24
2.6.3 Vrtání.....	24
2.6.3.1 Jednotlivé a nárazové vrtání .....	24
2.6.3.2 Spirálové vrtání.....	25
2.6.3.3 Trepanační vrtání .....	25
2.7 LASEROVÉ ZNAČENÍ .....	26
2.8 LASEROVÉ NANÁŠENÍ POVLAKŮ .....	26
2.9 ODJEHLOVÁNÍ SOUČÁSTÍ.....	27
2.10 LÁMÁNÍ TRÍSEK.....	27
2.11 LASEROVÉ MIKROOBRÁBĚNÍ .....	27
3 MATERIÁLY .....	28

3.1	MATERIÁLY VHODNÉ PRO ŘEZÁNÍ LASEREM .....	28
3.1.1	Přídavné médium .....	28
3.1.2	Kovové materiály .....	28
3.1.3	Neželezné kovy .....	29
3.1.4	Nekovové materiály .....	29
3.1.5	Značení ocelí .....	29
3.2	OCELI JAKOSTNÍ TŘÍDY 11 .....	30
3.2.1	Materiál 11 375 .....	30
3.3	OCELI JAKOSTNÍ TŘÍDY 17 .....	31
3.3.1	Materiál 17 240 .....	32
3.4	SOUSTAVA FE – FE <sub>3</sub> C .....	33
3.4.1	ARA diagram .....	33
3.4.2	IRA diagram .....	34
<b>4</b>	<b>POUŽITÝ STROJ – TRUMPH 5030 FIBER.....</b>	<b>37</b>
4.1	VLÁKNOVÉ LASERY .....	38
4.1.1	Výhody vláknových laserů .....	39
<b>5</b>	<b>PARAMETRY VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>40</b>
5.1	KUŽELOVITOST .....	40
5.2	SKLUZ .....	40
5.3	MIKROTVRDOST .....	41
5.3.1	Mikrotvrdost dle Vickerse .....	42
5.3.2	Teplotní pole .....	43
5.4	JAKOST POVRCHU .....	46
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ LASEREM.....</b>	<b>49</b>
6.1	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI .....	49
6.2	LASEROVÉ ŘEZÁNÍ .....	49
6.3	LASEROVÉ ODPAŘOVÁNÍ .....	50
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....</b>	<b>51</b>
7.1	VZHLED ŘEZNÉ PLOCHY .....	51
7.1.1	Vyhodnocení .....	52
7.2	MĚŘENÍ KUŽELOVITOSTI .....	65
7.3	MĚŘENÍ SKLUZU .....	68
7.4	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI .....	70
7.5	TEPLOTNÍ POLE.....	79
7.6	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	82
7.6.1	Prostorové zobrazení skenovaných povrchů .....	87
7.7	OBCENÉ SHRNU TÍ .....	96
<b>ZÁVĚR</b>	<b>.....</b>	<b>98</b>



<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>100</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>103</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>105</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>109</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>110</b>

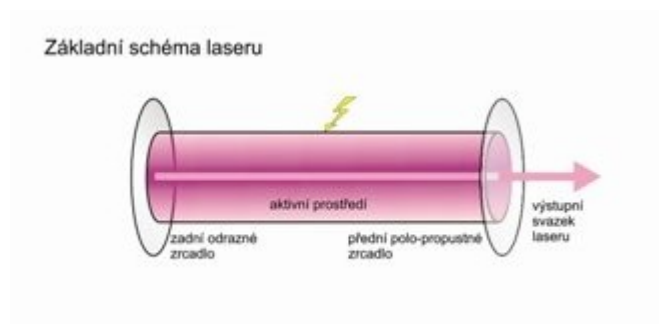
## ÚVOD

Výrazem nekonvenční označujeme technologie, u kterých nedochází k úběru materiálu důsledkem použití mechanické práce, ale fyzikálních, chemických nebo kombinací obou zmíněných metod. Jednotlivé technologie můžeme v současnosti rozdělit do několika základních skupin, které jsou členěny podle způsobu a principu obrábění. Neodmyslitelně k nim patří i laserové technologie. Nekonenční technologie zažívají v posledním desetiletí velký rozmach a v určitých aplikacích vytlačují méně výhodné konvenční technologie obrábění. O rozvoj nekonvenčních technologií se ve velkém měřítku zasadil vývoj nových aplikací v oboru vojenství nebo lékařství. Nekonenční technologie jsou využívány v oblastech, kde tradiční metody obrábění materiálu nejsou ekonomicky výhodné. Z hlediska dělení materiálu jsou tyto metody již delší dobu považovány za monopolní v oblasti plechových polotovarů. Pro využití nekonvenčních technologií je často nutné zohlednit parametry jako je velikost dávky, fyzikální vlastnosti materiálu nebo tvar a velikost součástky. V současné době předpokládáme, jaké vlastnosti po obrobení laserem může materiál získat, avšak při různých technologických podmínkách, materiálech a laserových zařízeních, jsou výsledné hodnoty daných vlastností rozdílné. Proto může být přesnější predikce vzniklých stavů poměrně obtížná. Existuje možnost předpokládat chování materiálu na základě matematických modelů s využitím aplikace konečněprvkového softwaru. Nicméně je vhodné porovnávat rozdíl ideálních podmínek a podmínek reálných. Z tohoto důvodu je vhodné prakticky testovat chování různých materiálů při daných aplikacích. Rozsáhlý sběr těchto dat ve výsledku může vytvořit celkový model laserového obrábění oceli. Ke zlepšení přesnosti daného modelu by bylo vhodné postupně rozšiřovat databázi naměřených hodnot.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 LASER

Slovo laser vyjadřuje zkratku pro zařízení optického zesilovače generujícího elektromagnetické záření s využitím procesu stimulované emise fotonů. Předchůdcem laserových zařízení byla zařízení označovaná zkratkou MASER – microwave amplification by stimulated emission of radiation (zesílení mikrovln s využitím stimulované emise záření). Funkce laseru byla fyzikálně popsána již roku 1916 Albertem Einsteinem, avšak ke zkonstruování tohoto zařízení došlo až v roce 1960. Laserová energie je získána vybuzením aktivního prostředí různými způsoby – opticky, elektricky apod. Aktivní prostředí může tvořit pevná látka (krytal), kapalina nebo plyn. Vybuzením elektronů dojde k jejich posunu na vyšší energetickou hladinu, tedy do pozice orbitalu vzdálenějšího od jádra atomu. Pro tyto částice je však tato energetická pozice nevýhodná a má snahu se dostat zpět na svou ustálenou nižší energetickou hladinu, k tomu dojde vyzářením fotonu. Tyto fotony naráží do elektronů a dochází k další emisi fotonů, následně dochází k jejich vyzáření přes polopropustné zrcadlo v podobě paprsku. Tento paprsek po dopadu na obráběný materiál přemění část svojí energie na teplo. Hlavní částí k vyzáření laserového svazku je rezonátor tvořený odrazovými zrcadly [1].



Obr. 1. Schéma laserového zařízení [4].

### 1.1 Základní pojmy

#### 1.1.1 Laserový svazek

Foton má při dopadu stejnou energii, směr, fázi i polarizaci. Z toho plynou tři základní vlastnosti laserového záření:

1. Kolimovaný svazek záření – svazek se nerozbíhá,
2. Monochromatický svazek – stejná vlnová délka,
3. Koherentní svazek – fotony mají stejnou fázi časovou i prostorovou [3].

### 1.1.2 Stimulovaná emise

Jev, kdy dochází ke srážce fotonu s vybuzeným atomem aktivního prostředí. Foton se následně dostává na vyšší energetickou hladinu a dochází k emisi. Vzniklé záření má stejný směr pohybu, fázovou polohu a frekvenci jako výchozí foton [3].

### 1.1.3 Inverzní populace

Moment, kdy počet částic na vyšší energetické hladině převyšuje počet částic na energetické hladině nižší. K tomu dochází vybuzením elektronů na vyšší energetickou hladinu [3].

Tab. 1. Hustota energie [1].

Energetický zdroj	Hustota energie [W/cm <sup>2</sup> ]
Slunce	$5 \cdot 10^3$
Acetylenovo-kyslíkový plamen	$10^4$
Elektrický oblouk	$10^5$
Plazma	$10^5$
Elektronový paprsek	$4 \cdot 10^8$
Jaderný výbuch	$10^{10}$
Nd:YAG laser	$10^{14}$
CO <sub>2</sub> laser	$10^9$

## 1.2 Rozdělení laserů

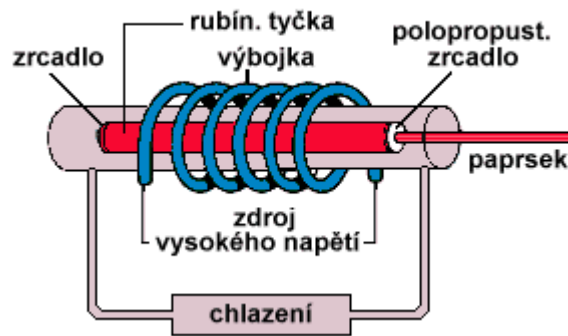
V rámci dělení dle aktivního prostředí jsou v dnešní době nejvíce využívány lasery plynové, přesněji CO<sub>2</sub> lasery, kdy aktivní prostředí tvoří směs CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He. Dalšími často používanými lasery jsou pevnolátkové lasery Nd:YAG [1].

### 1.2.1 Pevnolátkové lasery

Nejznámější představitel je laser rubínový. Právě pomocí krystalu rubínu byl získán první laserový paprsek. S plynovými lasery nejpoužívanější kategorie laserů s výkonem do 10 kW. Jako aktivní prostředí bývá používána pevná krystalická nebo opticky propustná amorfnní látka (krystaly, oxidy, sklo, keramika). V dnešní době nejpoužívanější je laser typu



Nd:YAG. Tento laser pracuje jak v pulsním, tak v kontinuálním režimu, kdy dosahuje výkonu max. 6 kW, naopak v pulsním režimu až v řádech GW. Hlavní nevýhodou je nízká účinnost, kdy je u těchto zařízení nutné přídavné chlazení. Nejstarší představitel – Rubínový laser byl využíván již v 60. letech k vrtání otvorů do diamantů. Buzení je vytvořeno světelnou absorpcí z výbojek, aktivní prostředí tvoří  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [2].



Obr. 2. Schéma pevnolátkového laseru [4].

### 1.2.2 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou nejpoužívanější lasery. Nejznámější laser tohoto typu je laserová dioda (LD) a luminiscenční dioda (LED). V dnešní době patří k nejmodernějším průmyslově používaným laserům. Aktivním prostředím je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi volné nosiče náboje – elektrony. Výkon je korigován změnou velikosti elektrického proudu, dalšími výhodami jsou malé rozměry a vysoká účinnost pohybující se kolem hranice 50 % [2].

### 1.2.3 Plynové lasery

Tyto lasery využívají široké spektrum vlnových délek. Nevýhodou je nízký výkon. V průmyslu jsou hojně využívány lasery  $\text{CO}_2$ , v menším měřítku pak lasery excimerové. Plynové lasery patří všeobecně mezi nejvýkonnější zařízení. Principem je zapálení směsi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , He, pomocí elektrického výboje. Zařízení dosahují výkonu až 20 kW a schopností řezat plech tloušťky 25 mm. Zvláštní metodou pro řezání křehkých materiálů je způsob využití vnitřního pnutí, kdy je materiál povrchově naříznut a následně je v materiálu ochlazením vyvoláno vnitřní pnutí. Tento způsob je velice rychlý a lomová plocha neobsahuje na rozdíl od klasického řezání tímto laserem mikrotrhliny [2].

### 1.2.3.1 CO<sub>2</sub> laser

CO<sub>2</sub> lasery jsou ty nejvýkonnější ze skupiny plynových laserů. Na rozdíl od jiných plynových laserů jsou zde molekuly CO<sub>2</sub> vybuzeny až při srážkách s molekulami N. Energetická účinnost těchto laserů je 10 až 18 %. U těchto laserů je nutné intenzivní chlazení, které je zprostředkováno vodou. Teplota uvnitř trubice rezonátoru nesmí přesáhnout hodnotu 400 °K. Záření vzniká připojením elektrod k vysokému napětí, mezi elektrodami začne hořet elektrický oblouk, který vybudí molekuly N<sub>2</sub>. Helium tvořící aktivní prostředí slouží k depopulaci nižší energetické hladiny. Srážkami s molekulami dochází k odvodu energie z nižších energetických hladin ve formě tepla. Kvalitu vzniklého paprsku nejvíce ovlivňuje rezonátor. Optické zařízení rezonátoru upravuje paprsek do požadovaných parametrů, kdy pro dané podmínky může být požadován paprsek úzce fokusovaný nebo rozbíhavý. Paprsek je optickým zařízením také transformován z tvaru čtvercového na kruhový, kdy největší intenzita energie je požadována ve středu paprsku [2].

### 1.2.3.2 CO<sub>2</sub> lasery z hlediska čerpání

- Tok plynu není řízený – lasery dosahují výkonu do 50 W. Životnost laseru končí disociací.
- Laser s axiálním tokem – tento druh toku umožňuje nahradit čerpaný CO<sub>2</sub>. Při výkonu do 1 kW má profil Gaussova rozložení. Dle rychlosti toku je možné tyto lasery dělit na nízkorychlostní a vysokorychlostní, které disponují výkonem 600 W na metr trubice a celkovým výkonem 6 kW. I u tohoto druhu je nutné chlazení.
- Laser s příčným tokem – výkon těchto laserů je 10 kW/m. Na rozdíl od předešlých druhů zde směs plynů CO<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub> proudí kolmo na optickou dutinu. Optické zařízení je vyrobeno ze selenidu zinku nebo arzenitu gália [4].

### 1.2.4 Kapalinové lasery

Nejčastějším aktivním prostředím laserů je vodný nebo alkoholový roztok. Výhodou je, že je možné vlnovou délku plynule měnit. Tento druh se v průmyslu téměř nepoužívá. Hlavním důvodem je krátká životnost v důsledku rozkladu aktivního prostředí [2].

### 1.2.5 Plazmové lasery

Vysokoenergetické lasery, které bývají používány při řezání těžkovitých kovů [2].

Tab. 2. Porovnání laserů [2].

Typ	Mód	Vlnová délka	Výkon	Použití
Rubínový laser	Pulzní, kontinuální	694 nm	Jednotky MW	Měření, pulzní holografie
Nd:YAG	Pulzní	1,06 $\mu\text{m}$	1 W – 8 kW	Obrábění, měření, medicína
Polovodičový laser	Pulzní, kontinuální	Infračervené spektrum	1 mW – 100 mW	Optoelektronika
CO <sub>2</sub> laser	Pulzní, kontinuální	10,6 $\mu\text{m}$	1 W – 40 kW 100 kW – pulzní mód	Medicína, oddělování izotopů
HeNe laser	Kontinuální	632,8 nm nebo 1150 nm	1 mW – 1 W	Měření, holografie
Argonový laser	Pulzní, kontinuální	458 nm, 477 nm, 488 nm, 497 nm, 501 nm, 515 nm	1 nW – 150 W	Tiskárny, medicína
Excimerový laser	Pulzní (10 ns – 100 ns), kontinuální	198 nm, 248 nm, 308 nm a další	1 kW – 100 MW	Mikrostrojírenství, medicína, laserová chemie
Barevný laser	Pulzní, kontinuální	Od infračerveného po viditelné	1 mW – 1 W	Měření, medicína, optická spektroskopie

### 1.3 Kategorie bezpečnosti

Lasery jsou dle bezpečnosti rozdělovány do čtyř skupin.

#### 1.3.1 Kategorie I

Lasery poměrně neškodné i při přímém pohledu do paprsku. Pro tyto lasery neplatí téměř žádné omezení. Jako příklad jsou uvedeny lasery v CD přehrávačích nebo čtečkách čárových kódů. Maximální hranice výkonu těchto laserů je 0,4  $\mu\text{W}$ .

### 1.3.2 Kategorie II

Vzhledem k mrkacímu reflexu by lasery této kategorie neměly poškodit oko, které se zavře za 0,25 s. Tento čas na poškození buněk zraku nestačí. Výkon těchto laserů je do 1 mW.

### 1.3.3 Kategorie III

V kontinuálním režimu emitují záření ve viditelné oblasti spektra, výkon nepřesahuje 5 mW. V pulzním režimu výkon nepřesahuje 0,5 W. Odraz záření nezpůsobuje poškození zdraví.

### 1.3.4 Kategorie IV

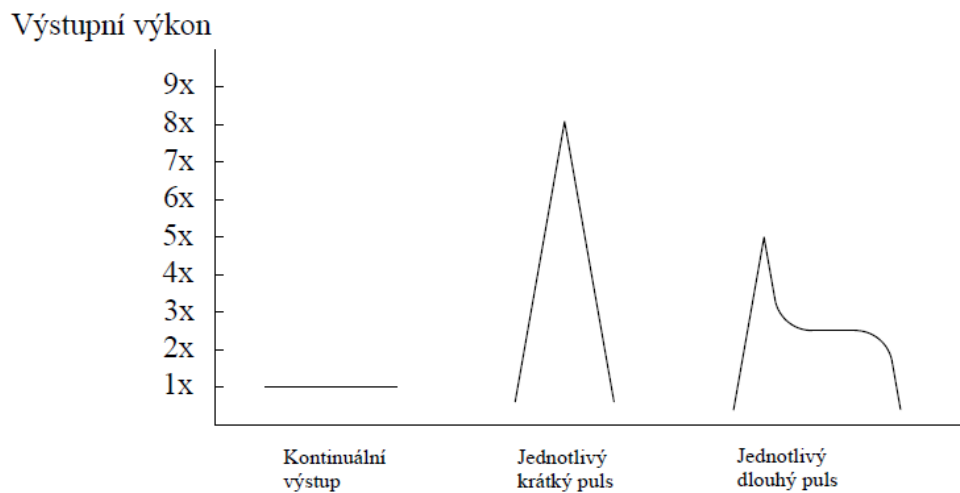
Odraz paprsku může způsobit vážné poranění v podobě popálenin. Parametry přesahují hodnoty kategorie III. Lasery této kategorie musí být zneprístupněné klucí [2].

Tab. 3. Interakce s živou tkání [5].

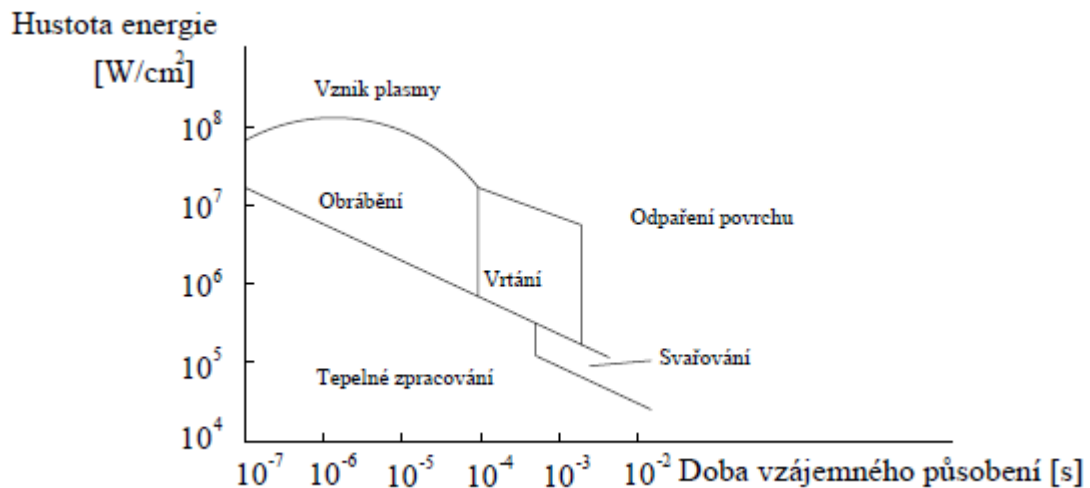
Druh záření	Mechanismus působení	Vliv na zdraví
Ultrafialové záření, viditelné záření	Změna struktury molekul, chemické procesy (netepelné působení)	Onemocnění kůže, poškození povrchu oka, zánět spojivek, porušení barvocitu
Viditelné záření, infračervené záření, radiofrekvenční záření o frekvenci vyšší než 100 kHz	Zrychlení neuspořádaného pohybu molekul (tepelné působení)	Popáleniny, poškození sítnice oka, zákal oční čočky
Elektromagnetické záření o frekvenci nižší než 10 MW	Stimulace nervové soustavy (netepelné působení)	Změna srdečního rytmu, poškození mozku

## 2 APLIKACE LASERU

Lasery jsou v dnešní době využívány v širokém rozsahu oblastí. Své zastoupení mají v odvětví automobilovém, elektronickém, při zpracování plechů, obrábění plastů nebo svařování profilů a trubek. Laser dle aplikace může pracovat v kontinuálním nebo pulsním režimu.



Obr. 3. Režimy laseru [1].



Obr. 4. Technologie použití laseru [1].

### 2.1 Interakce paprsku a materiálu

Absorpci laserového záření je možné popsat rovnicí:

$$A = 1 - R \quad (1)$$

Kde: A – absorpce záření [-],



R – odraz záření [-].

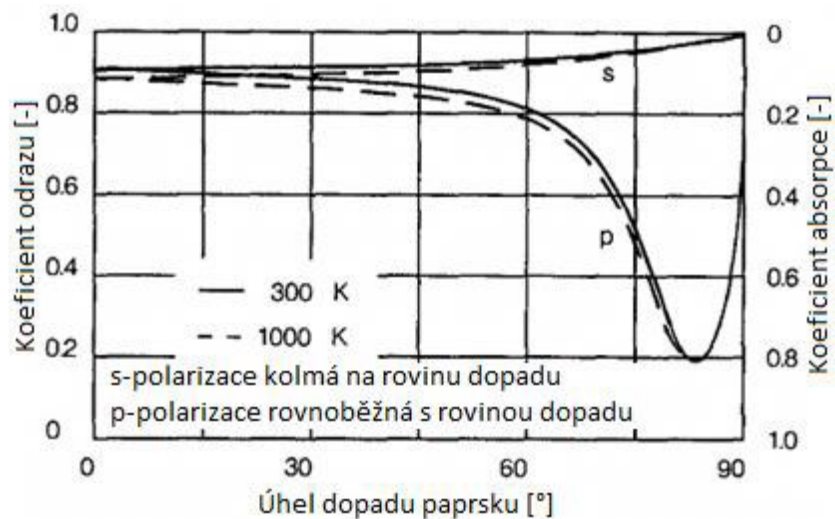
Výsledná absorpce pro kolmý dopad paprsku na vybraný materiál je popsána Bramsonovou rovnicí, tato rovnice zohledňuje změnu elektrického odporu v závislosti na teplotě:

$$A(t) = 0,365 \cdot \sqrt{\frac{R_e(t)}{\lambda}} - 0,0667 \cdot \frac{R_e(t)}{\lambda} + 0,006 \cdot \left(\frac{R_e(t)}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

Kde: A(t) – absorpční koeficient v závislosti na teplotě [-],

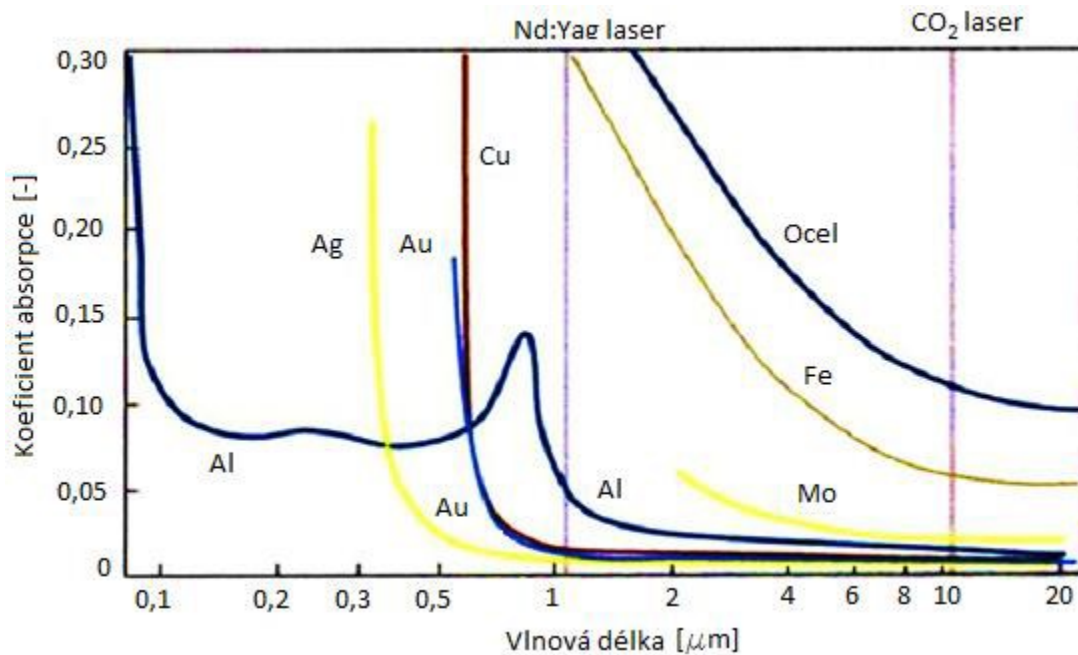
$R_e(t)$  – elektrický odpor v závislosti na teplotě [ $\Omega$ ].

Absorpci energie laserového paprsku ovlivňuje úhel dopadu paprsku, vlnová délka, samotný materiál nebo povrch materiálu. Například povrch upravovaný leštěním vykazuje vyšší odrazivost než povrch s vyšší drsností [6].



Obr. 5. Vliv úhlu dopadu paprsku [7].

S ohledem na vlnovou délku záření je možné tvrdit, že s rostoucí vlnovou délkou, klesá absorpce záření materiálem.



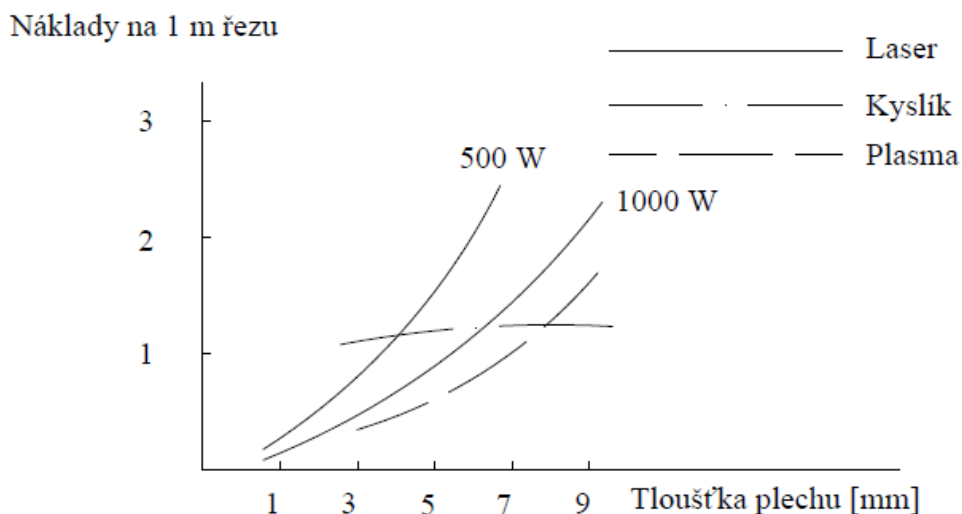
Obr. 6. Vliv vlnové délky [8].

## 2.2 Laserové oxidační řezání

Materiál je energií paprsku ohřát na zápalnou teplotu a spálen v proudu přídavného plynu nejčastěji kyslíku. Proces řezání je tedy důsledek exotermické reakce mezi kyslíkem a materiálem. Standardem je řezání ocelí do tloušťek 20 mm. Závislost vynaložených nákladů na řezání různých tloušťek oceli s ohledem na odlišné technologie dělení jsou znázorněny na obr. 7. Výhodami laserového pálení je přesný řez a vysoká posuvová rychlost. Na stejném principu funguje laserové tavné řezání, kdy je jako přídavný plyn použit dusík nebo argon, tato metoda se využívá pro řezání vysoce legovaných nebo korozivzdorných ocelí nebo hliníku, mědi, mosazi [1].

## 2.3 Laserové sublimační řezání

Materiál pohlcuje energii paprsku a je ohříván na teplotu odpaření. Páry, které vznikají jsou z místa řezu odstraňovány proudem inertního plynu. Oproti metodě protavování tato technologie spotřebovává větší množství energie na jednotku řezu. Hlavními výhodami jsou vysoká jakost povrchu a úzká řezná spára [1].



Obr. 7. Náklady na 1 m řezu [1].

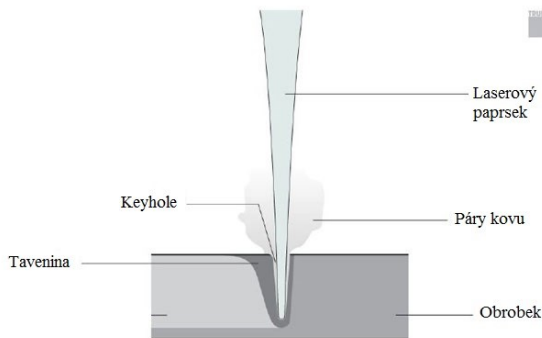
## 2.4 Laserové protavování

Materiál pohlcuje energii paprsku, dochází k ohřevu nad teplotu tavení. Tavenina je z řezné spáry odstraňována proudem inertního plynu. Charakteristikami této technologie jsou vysoká posuvová rychlost a nízká spotřeba energie na jednotku délky řezu. Na spodní straně řezaného polotovaru zůstávají v některých případech kapky rozstříknutého kovu. Používaným inertním plynem je argon nebo dusík [1].

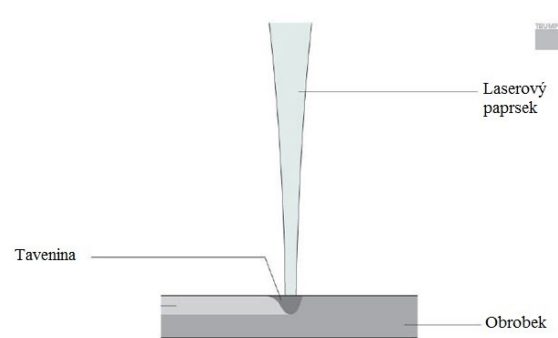
## 2.5 Laserové svařování

Pomocí laserů je možné spojovat materiály s vysokým bodem tání nebo vysokou tepelnou vodivostí a to povrchově nebo hlubokými svary. Touto metodou je možné spojovat materiály jinak nesvařitelné a to z důvodu krátké doby tavení a malého množství taveniny. V případě nutnosti bývá taky využíváno přídavného materiálu. Velikost tepelně ovlivněné vrstvy je ve srovnání s klasickým svařováním elektrickým obloukem nebo svařováním plazmou řádově nižší. Mimo bodové a švové svařování bývá laser taktéž využíván pro navařování, kdy je přídavný materiál dodáván do oblasti svaru ručně nebo strojně. Při manuálním navařování je přídavný materiál nejčastěji v podobě drátu o průměru 0,15 až 0,6 mm veden do místa svaru ručně. Ochrannou atmosféru zajišťuje proud Argonu. Po této operaci je navařovaná plocha opracována broušením, soustružením nebo frézováním tam, kde je to nutné. Při kondukčním svařování je přídavný materiál roztaven podél místa pro svar, taveniny se promíchávají a tuhnou. Toto svařování bývá využíváno pro spojování tenkostěnných součástí. Při

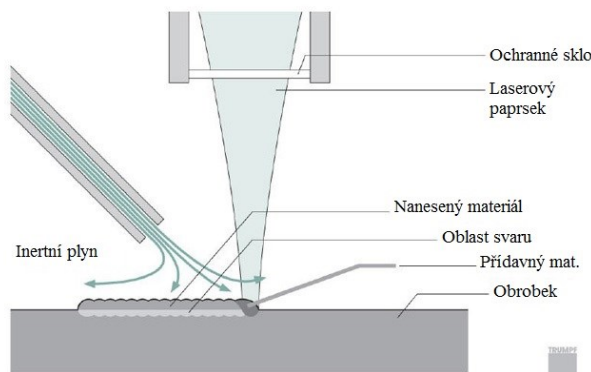
hlubokém svařování jsou nutné velmi vysoké výkony, laserový paprsek mimo tavení kovu vytváří také páru, která rostoucím tlakem vypuzuje taveninu. Hluboké svařování vykazuje vysokou účinnost a vysoké rychlosti svařování. Metoda je vhodná pro spojování více vrstev najednou a velké hloubky svarů. Dalšími metodami je hybridní svařování nebo skenerové svařování. V automobilovém průmyslu umožňují přesné a tenké svary zhotovené laserovými technologiemi nanášení laků bez předchozí vzhledové úpravy svarového spoje [9].



Obr. 8. Hluboké svařování [9].



Obr. 9. Kondukční svařování [9].



Obr. 10. Laserové navařování [9].

## 2.6 Laserové obrábění

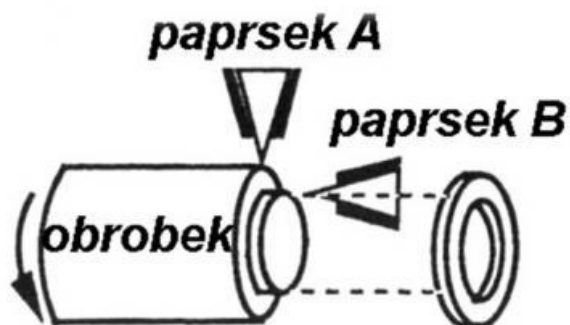
Lasery jsou využívány také pro klasické metody obrábění jako je soustružení, frézování nebo vrtání. Ve všech případech se jedná o tzv. bezkontaktní obrábění. Paprsek nebo více paprsků tvoří řezný nástroj. Tímto druhem obrábění jde zhotovovat většinou pouze jednodušší tvary [10].

Tab. 4. Srovnání metod nekonvenčních technologií [1].

Metoda	Drsnost Ra	Přesnost IT	Hloubka ovlivněné vrstvy [ $\mu\text{m}$ ]	Úběr [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]	Měrná spotřeba energie [ $\text{kWh}/\text{cm}^3$ ]
Obrábění laserem	50 až 6,3		100	$10^{-4}$	8 až 13
Obrábění plazmou			500 až 800	100	
Elektrochemické obrábění	2,5 až 1,6	9 až 12	Beze změn	0,05 až 0,5	0,1 až 0,3
Elektrochemické broušení	0,8 až 0,2	6 až 9	Beze změn	$10^{-2}$	0,04 až 0,08
Ultrazvukové obrábění	6,3 až 0,4	7 až 9	Beze změn	$10^{-2}$ až 10	0,07 až 0,8
Elektrojiskrové obrábění	50 až 0,2	6 až 12	10 až 300	$10^{-4}$ až 0,6	0,1 až 1

### 2.6.1 Soustružení

Soustružení laserem využívá tři základní metody – předehřívání materiálu, odtavování materiálu a odřezávání materiálu. Metoda předehřívání materiálu funguje jako podpora klasickému obrábění, kdy laserový paprsek je nasměrován těsně před řezný nástroj a je využit pro změnu mechanických vlastností obráběného materiálu vlivem tepla. Při odtavování je materiál intenzivně zahříván paprskem laseru a odstraňován z místa řezu asistenčním plynem. U metody odřezávání působí na materiál pod různým úhlem dva paprsky, které se setkávají v jednom bodě. Nejčastěji paprsky svírají úhel  $90^\circ$ , kdy se jedná o tzv. prstencový úběr [10].

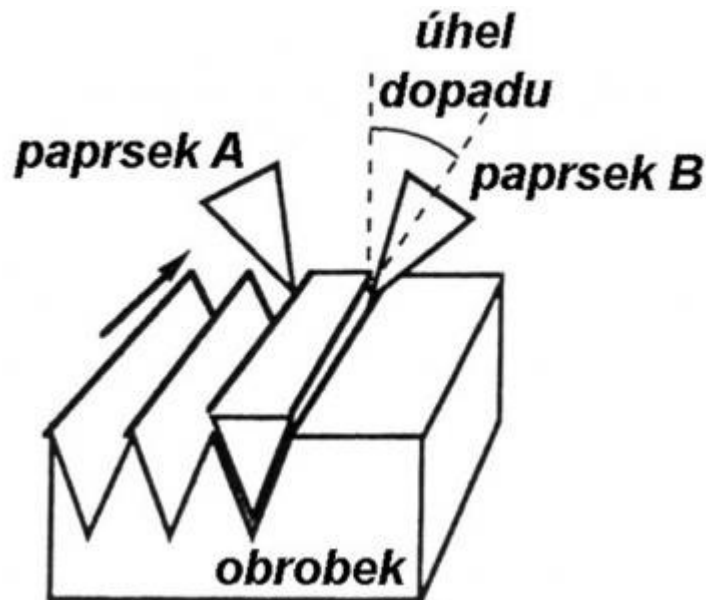


Obr. 11. Laserové soustružení [10].



### 2.6.2 Frézování

Frézování laserem využívá také metody odtavování a odřezávání. U metody odřezávání má větší smysl změna velikosti úhlu, který paprsky svírají [10].



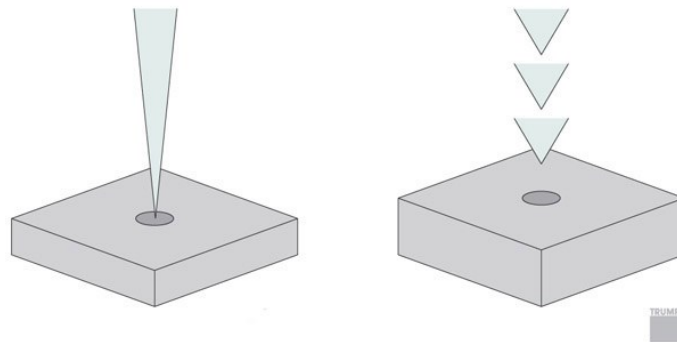
Obr. 12. Laserové frézování [10].

### 2.6.3 Vrtání

Princip vrtání s použitím laseru je založen na odpařování materiálu. Pro tuto metodu je vhodný tzv. pulzní režim laseru, délka těchto pulzů je kratší než 1 ms. Touto metodou je možné vrtat otvory o průměru od 10 do 100 mm s tloušťkou materiálu až 50 mm. S rostoucí délkou vrtaného otvoru roste také odchylka od původní uvažované geometrie. Vzhledem ke vznikající vrstvě materiálu na ploše vrtaného otvoru je taky nutné volit správnou metodu vrtání otvoru – vrtání pulzy, opakované pulzy, vyřezávání pohybem po kružnici, vyřezávání pohybem po šroubovici, laserovou erozí. Vrtat lze kovy, plasty, dřevo, tkaniny, keramiku, sklo a jiné přírodní materiály [9].

#### 2.6.3.1 Jednotlivé a nárazové vrtání

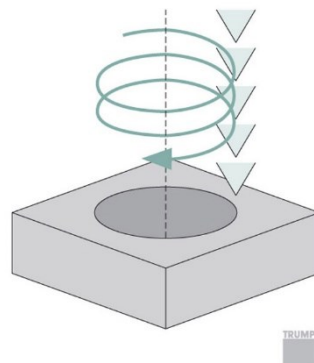
Při vrtání jednotlivými pulzy, působí paprsek laseru delší dobu větší energií na jedno místo obrobku. Metoda je vhodná pro rychlé zhotovení většího množství otvorů. Při využití metody nárazových pulzů, působí paprsek opakovaně v krátkých intervalech. Touto metodou je možné zhotovit hlubší, menší a přesnější otvory [9].



Obr. 13. Laserové vrtání [9].

### 2.6.3.2 Spirálové vrtání

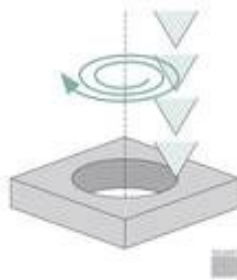
Laserový paprsek působí na obráběný materiál pohybem po šroubovici. Roztavený materiál vystupuje z místa řezu směrem nahoru. Po proniknutí laseru materiálem bývá přidáváno ještě několik kruhových pohybů, kdy je otvor začištěn. Tímto způsobem je možné zhotovit hluboké a velké otvory o vysoké kvalitě [9].



Obr. 14. Spirálové vrtání [9].

### 2.6.3.3 Trepanační vrtání

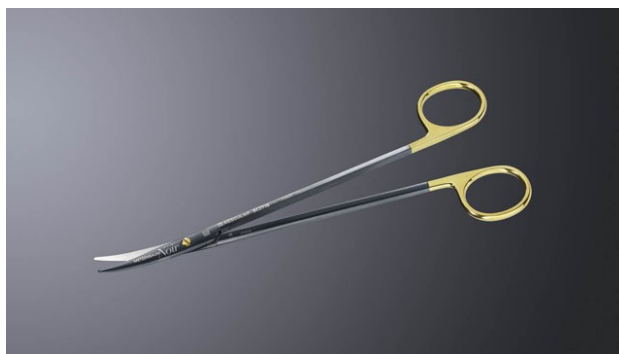
Tato metoda představuje spojení nárazového a spirálového vrtání. Pomocí jednotlivého pulzu je předvrtán otvor, který je následně zvětšován spirálovým pohybem nástroje nad obrobek. Výhodou metody je odvod roztaveného materiálu z místa řezu směrem dolů pod obrobek předvrtaným otvorem [9].



Obr. 15. Trepanační vrtání [9].

## 2.7 Laserové značení

Technologie, kdy laserový paprsek vlivem místního ohřevu zanechává na materiálu stopu – strukturální změnu, natavení, změnu barvy nebo odpaření materiálu. Tato metoda je vysoce variabilní a je možné značit velké množství materiálů – keramika, plasty, dřevo, ocel, hliník, sklo, korund apod. Výhodami této technologie je vysoká rychlost a přesnost značení, jednoduché programování, různé tvary značení, životnost. Tato technologie je často využívána u plastových vícevrstvých materiálů, kdy je odstraněna tenká povrchová vrstva zhotovená například lakováním [9].



Obr. 16. Aplikace laserového značení [9].

## 2.8 Laserové nanášení povlaků

Při této technologii je na kovových materiálech vytvářen povlak odolnější vůči vnějším vlivům než původní materiál. Na daném materiálu je nanesen prášek, který při průchodu paprsku vytvoří se zahřátým povrchem vrstvu s jistými vlastnostmi. Prášek může být také přidáván do přídavného plynu. Takto vzniklé povlaky mohou být korozivzdorné, odolné vůči opotřebení nebo odolné vysokým teplotám [9].

## 2.9 Odjehlování součástí

Při tomto postupu je využíván mód odpařování, jsou takto odjehlovány obrobené součástky nebo ozubení. Pro tuto aplikaci jsou využívány lasery Nd:YAG o výkonu v řádu stovek Wattů [9].

## 2.10 Lámání třísek

Využíváno při soustružení materiálů tvořících dlouhou třísku. Tříska je laserem zahřívána a naopak v místě kontaktu s obráběným materiálem ochlazována. Tímto mechanismem dojde k jejímu zakalení, nárůstu tvrdosti a následném odlomení. U materiálů, jež nelze kalit, je tříska přetavena [9].

## 2.11 Laserové mikroobrábění

Pro technologii mikroobrábění je využíváno zejména pevnolátkových laserů. Při procesech strukturování nebo ubírání materiálu je pracováno krátkými pulzy, které vytvoří v povrchu malé prohlubeniny o velikosti několik desítek mikrometrů. Vzniklá tavenina se nejčastěji okamžitě odpaří. Vytvořením pravidelné geometrie je možné docílit vylepšení vlastností základního materiálu, takto vzniklé prvky mají obvykle velikost pouze několik mikrometrů. Úběr materiálu v rámci mikroobrábění bývá využíván pro vytváření detailů vstřikovacích nástrojů, které se posléze promítnou na vstřikovaném výrobku. Tímto způsobem je také možné odstraňovat tenké vrstvy pro doladění tokových odporů. Délka pracovních pulzů mikroobráběcích zařízení se může pohybovat v rozmezí 30 ns až 300 ns a průměrný výkon se pohybuje do 1000 W [9].

## 3 MATERIÁLY

### 3.1 Materiály vhodné pro řezání laserem

Základní předpoklad pro efektivní využití laserového paprsku je absorpce záření obráběným materiálem a jeho přeměna na teplo. V případě, že obráběný materiál odráží velké množství světelné energie, množství energie absorbované je nižší, tím klesá účinnost operace a nevhodně odražené světlo může v krajním případě poškodit optický systém laseru. Interakce prostředí laser – materiál se během procesu řezání mění, to je vyvoláno změnou teploty, strukturními přeměnami nebo existencí plazmy. Z hlediska absorpce/odrazivosti je z materiálů dobře absorbující antikorozi ocel a špatně absorbující měď a její slitiny. Lesklé povrchy dosažené opracováním nebo povrchy přirozeně lesklé odráží laserový paprsek, to se projeví na efektivní prořezané tloušťce materiálu, pro porovnání laser s výkonem 1,5 kW prořeže konstrukční ocel tloušťky 12 mm, ale vysoce čistý hliník pouze o tloušťce 4 mm. Povrchy stříkané nebo natírané, oplastování nebo okuje ovlivňují nepříznivě činnost laseru. Povrchy poškrábané nebo jinak poškozené mají vliv na odchylování nebo rozšiřování laserového paprsku, což vynutí navýšení řezného času. Povrchy s vrstvou oleje prakticky neovlivňují činnost laseru. Plochy pískované a abrazivně opracované odchylují laserový paprsek a brání správnému proudění plynu v místech řezu. Pro pozinkované plechy řezané laserovými metodami platí pravidlo pro max. tloušťku kolem 3,2 mm a nanesená vrstva povlaku by neměla převyšovat hodnotu 8  $\mu\text{m}$  [3, 9].

#### 3.1.1 Přídavné médium

Při procesu řezání bývá používán pomocný plyn, který zabezpečuje odvod roztaveného materiálu z místa řezu a chrání optické části laseru od zastříknutí roztaveným materiálem. Tyto materiály jsou dodávány pod tlakem pohybujícím se v rozmezí 100 kPa až 2 MPa. Průměr trysky je závislý na šířce řezné spáry a bývá v rozmezí 1 – 2,5 mm. Nejúčinnější vzdálenost trysky od místa řezu je 0,5 až 2,5 mm. Jakožto podpurný plyn bývá nejčastěji využíván kyslík a dusík, u speciálních materiálů argon [9].

#### 3.1.2 Kovové materiály

Při dělení kovových materiálů je kladen důraz na povrch, kdy oxidovaná vrstva nebo zbytky maziv ovlivňují kvalitu řezu. U povrchově upravených materiálů dochází k poškození ochranné vrstvy. Důvodem tohoto poškození je odvod tepla z řezu. Dalším problémem je

řezání korozivzdorných ocelí, kdy oxidy chromu obsažené v oceli tvoří tvrdou vrstvu zabráňující řezání. Posuvová rychlost se oproti řezání uhlíkových ocelí výrazně snižuje, stejně tak maximální tloušťka řezaného materiálu. Z hlediska hospodárnosti řezání kovových materiálů se jako nejvhodnější jeví lasery CO<sub>2</sub>.

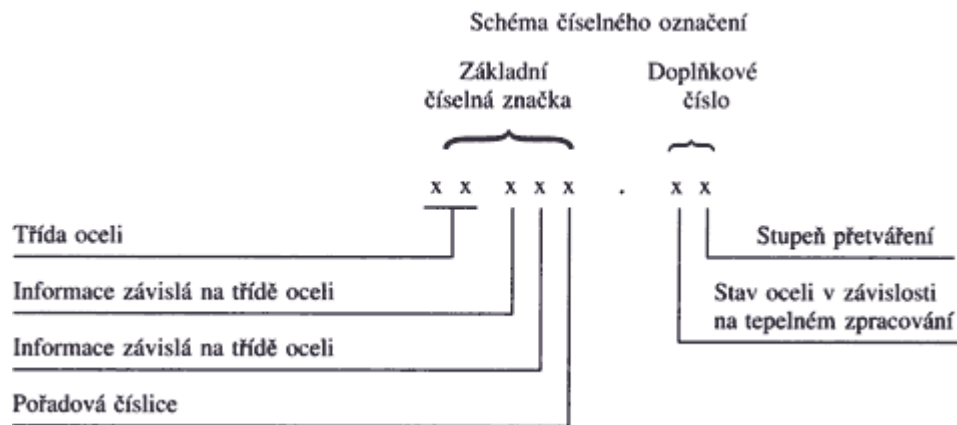
### 3.1.3 Neželezné kovy

Vzhledem k vysoké tepelné vodivosti neželezných kovů, je oproti uhlíkovým ocelím výrazně snížena posuvová rychlost při dělení neželezných kovů. Tyto kovy mají také silný sklon k oxidaci a proto je s výhodou využívána ochranná atmosféra, nejčastěji argon. Jedinou výjimkou je titan, který dovoluje podobné rezné podmínky jako uhlíková ocel. Řezání titanu probíhá také v ochranné atmosféře a s vysokým tlakem plynu, což zaručuje kvalitní řeznou plochu [9].

### 3.1.4 Nekovové materiály

Z hlediska redukce tepelně ovlivněné oblasti bývá používán pro dělení nekovových materiálů častěji laser Nd:YAG. Dělení probíhá pomocí tří metod – natavení materiálu a následný stříh, natavení a následné odpaření, chemická degradace [9].

### 3.1.5 Značení ocelí



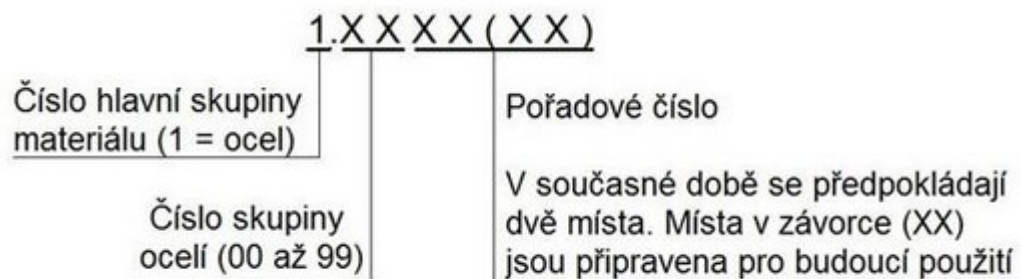
Obr. 17. Značení dle ČSN 42 0002:78 [12].

Třetí a čtvrtá číslice je závislá na třídě oceli:

- Třída 11 – třetí číslice 1 je značkou pro automatové oceli, čtvrtá číslice poté označuje střední obsah C v desetinách %; pokud se nejedná o automatové oceli, dvojčíslí na třetí a čtvrté pozici udává přibližnou pevnost v tahu v desítkách MPa.

- Třída 12 až 16 – třetí číslice označuje součet obsahů legovaných prvků v % zaokrouhlených na celé číslo; čtvrtá číslice označuje obsah C v desetinných %, pokud je obsah C vyšší než 0,92 % je čtvrtá číslice 0.
- Třída 17 – třetí číslice označuje legování jednotlivými prvky nebo skupinou prvků (0 – oceli legované Cr; 1 – oceli legované Cr a dalšími prvky; 2 – oceli legované Cr – Ni; 3 – oceli legované Cr – Ni a dalšími prvky); čtvrtá číslice označuje obsah legovacích prvků Cr, Mn, Ni [12].

Dalším v dnešní době často používaným značením je dodržování normy ČSN EN 10027. Norma používá jak značení pomocí prvků, tak značení číselné. Vzhledem k obsahu různých prvků je mnohdy výhodnější značení číselné a to zejména u korozivzdorných ocelí [12].



Obr. 18. Značení oceli dle ČSN EN 10027-2 [12].

## 3.2 Oceli jakostní třídy 11

Oceli třídy 11 dle ČSN 42 0002 mají zaručené hodnoty obsahu síry a fosforu a mechanické vlastnosti mez kluzu, tažnost a pevnost v tahu. Tyto oceli jsou používány u širokého spektra výrobků od spojovacího materiálu přes části potrubí, příruby, čepy, pouzdra až po ozubená kola, řetězová kola nebo hřídele. Do této skupiny ocelí patří také tzv. oceli automatové vyznačující se velmi dobrou obrobiteľností a jakostí povrchu po obrobení. Tyto oceli obsahují více než 0,1 % S [13].

### 3.2.1 Materiál 11 375

Zkoumaným materiálem je konstrukční ocel 11 375 (S235 JR). Tato ocel je vhodná pro součásti svařované z plechů, konstrukce namáhané staticky i dynamicky, součásti kované nebo tlakové nádoby namáhané přetlakem. Součásti vyráběné z tohoto materiálu: skříně vodních

turbín, vtokové objekty vodních turbín, vrata plavidlových komor, spojky podvozků a vagonů. Dle normy ČSN EN 10025-2 je ocel označována jako S235JR, číselně 1.0038 [14].

Tab. 5. Vlastnosti oceli 11 375 [14].

Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel				
	C	Mn	P	S	N
Chem. Složení v % hmotnosti (max)	0,19	1,5	0,045	0,045	0,014
Mechanické vlastnosti	Minimální mez kluzu $R_e$ v MPa pro výrobky dané tloušťky v mm				
	$\leq 16$	$>16 \leq 40$	$>40 \leq 63$	$>63 \leq 80$	$>80 \leq 100$
	235	225	215	215	215
	Pevnost v tahu $R_m$ v MPa pro výrobky dané tloušťky v mm				
	$\geq 3 \leq 100$		$>100 \leq 150$		$>150 \leq 250$
	360 – 510		350 - 500		340 - 490
	Minimální tažnost v % pro výrobky dané tloušťky v mm				
	$>3 \leq 40$	$>40 \leq 63$	$>63 \leq 100$	$>100 \leq 150$	$>150 \leq 250$
	26	25	24	22	21

### 3.3 Oceli jakostní třídy 17

Oceli třídy 17 jsou konstrukční legované oceli, dle účelu je možné je dělit na oceli korozi-vzdorné, žáruvzdorné a žárupevné. Korozi-vzdorné oceli mají vlastnost pasivace, kterou získávají legováním chromem. Obsah chromu, který tvoří s uhlíkem tvrdé karbidy, musí přesahovat hodnotu 11,5 % v tuhém roztoku. Charakteristický je nízký obsah uhlíku, jelikož uhlík má vysokou difúzní rychlost a tím způsobuje heterogenitu ve struktuře. Objemy ve kterých je obsah chromu nižší mají nižší korozi-vzdornost. Hodnota obsahu uhlíku v tuhém roztoku se tedy obvykle pohybuje pod hranicí 0,08 % [13].



### 3.3.1 Materiál 17 240

Daná austenitické korozivzdorná ocel velmi dobře odolává atmosférické korozi ve venkovním prostředí, pitné vodě. Po rozpouštěcím žihání odolává mezikrystalické korozi, dle normy ČSN EN 10088-2 se jedná o ocel 1.4301. U tloušťky plechu do 6 mm není nutné provádět rozpouštěcí žihání. Při vystavení oceli teplotám od 500 do 900 °C dochází k efektu zcitlivění a odolnost mezikrystalické korozi odpadá. Tato ocel je dobře tvárná za tepla i za studena. Pokud je ocel vystavena silným korozivním vlivům, je možné volit alternativu v podobě oceli 17 246. Maximální teplota použití je stanovena na 400 °C. Ocel je zpracovatelná metodami hlubokého tažení, ohýbání, zakružování, při obrábění je nutné používat určené nástroje. Ocel je dobře svařitelná metodou elektrického oblouku, naopak se nehodí pro svařování plamenem. Může vykazovat slabý nerovnoměrný magnetismus. Materiál je používán v oblasti strojírenství, nábytkářství, potravinářství, medicíny apod [15].

Tab. 6. Vlastnosti ocelových plechů materiálu 17 240 [15].

Druh oceli	Austenitická korozivzdorná ocel					
	C	Mn	S	P	Si	N
Chem. složení v % hmotnosti (max)	0,07	2	0,03	0,045	1	0,11
Mechanické vlastnosti						
	Tloušťka [mm]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]	KV(L)[J]	KV(Q)[J]
C	6	230	540 – 750	45	-	-
H	12	210	520 – 720	45	90	60
P	75	210	500 - 700	45	90	60

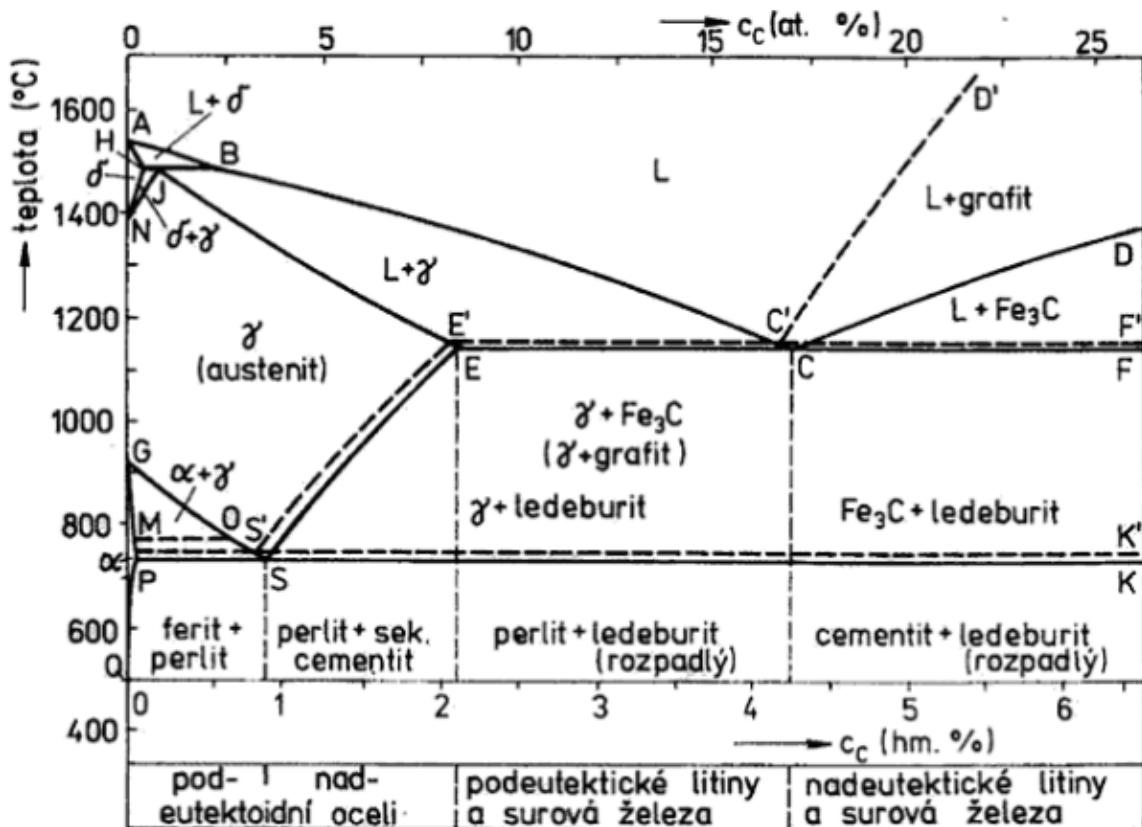
C – pás válcovaný za studena

H – pás válcovaný za tepla

P – plech válcovaný za tepla

### 3.4 Soustava Fe – Fe<sub>3</sub>C

Metastabilní soustava Fe-Fe<sub>3</sub>C zobrazuje fázové a strukturní přeměny oceli a litiny v závislosti na teplotě a obsahu uhlíku. Hodnota 6,68 % C označuje maximální rozpustnost uhlíku v železe. Obsah uhlíku 0,765 % rozděluje oceli na podeutektoidní a nadeutektoidní. Pod mezí 2,1 % C jsou v diagramu zahrnuty oceli, vyšší obsah uhlíku označuje litiny. Při vysokých rychlostech ochlazování jsou využívány diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA) nebo izotermického rozpadu austenitu (IRA). Ve spojení s laserovým dělením dochází k rychlému ohřevu materiálu nad austenitizační teplotu a vzhledem k malému množství austenitizovaného materiálu dochází také k rychlému odvodu tepla do okolního materiálu a okolí, což může způsobit fázové přeměny [13].

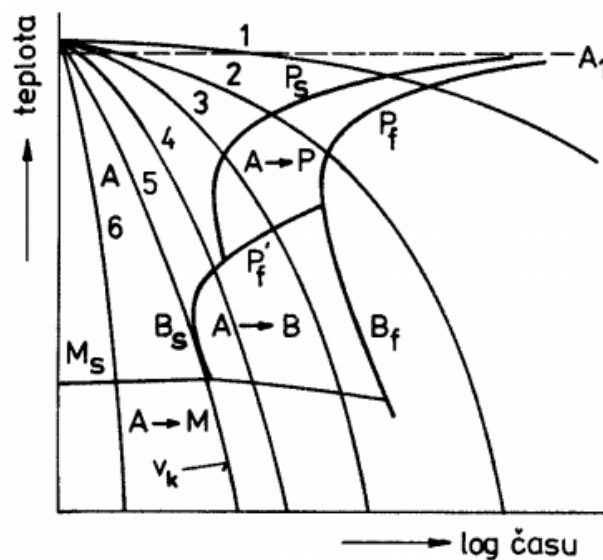


Obr. 19. Diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C [13].

#### 3.4.1 ARA diagram

Diagram popisující anizotermický rozpad austenitu podle metastabilního systému. Diagram představuje jednotlivé fáze vznikající v materiálu při ochlazování austenitu. Křivky ohraničující oblasti přeměny v jinou strukturu se mohou posunovat v různých směrech s ohledem

na obsah legur. Při ochlazování nižší rychlostí (křivka 1, 2) probíhá přeměna perlitická. Zvýšením ochlazovací rychlosti můžeme dosáhnout struktury kdy neproběhne perlitická přeměna do konce, ale zbylý austenit se transformuje na bainit. Při vysoké rychlosti ochlazování (křivka 6), vyšší než ochlazovací rychlosti kritické (křivka 5), je možné dosáhnout jednotné přeměny austenitu na martenzit, což se projeví vzrůstem tvrdosti daného materiálu. V řešeném případě se jedná o oceli podeutektoidní, pro strukturální přeměnu je nutné dosažení teploty  $A_{c3}$ , pokud by byla překročena pouze teplota  $A_{c1}$ , došlo by k přeměně vzniklého austenitu, nicméně zbylý ferit by strukturální změnou neprošel. Tato struktura by tedy při rychlém ochlazení byla tvořena martenzitem a feritem. V řešeném případě dochází k ochlazování na vzduchu, které bývá využíváno u vysokolegovaných samokalitelných ocelí. U uhlíkových a nízkoalegovaných ocelí daný proces značně ovlivňuje obsah legur, kdy s rostoucím obsahem většiny legur klesá teplota  $M_s$  [13].

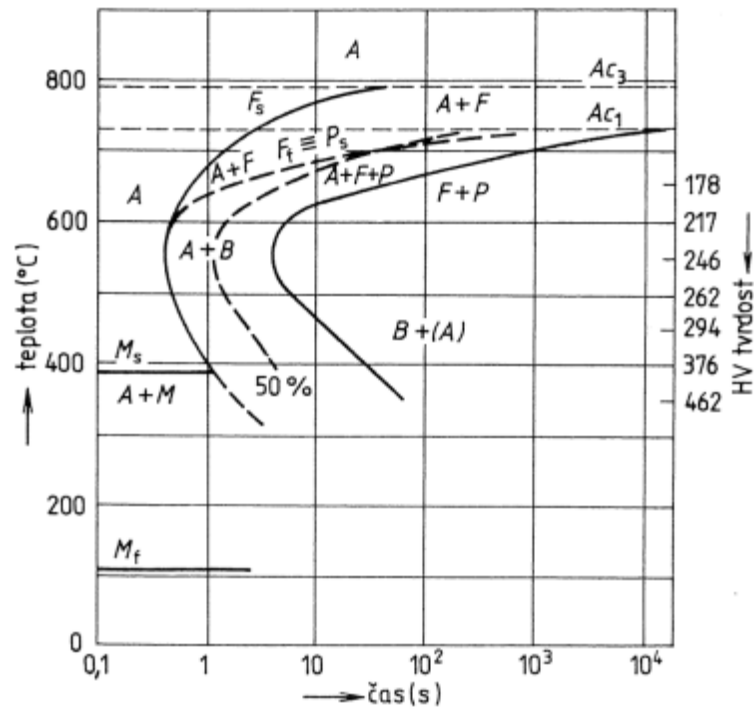


Obr. 20. ARA diagram [13].

### 3.4.2 IRA diagram

Diagram izotermického rozpadu austenitu. Na tvar diagramů mají také velký vliv legury. Toto prodlužuje tzv. inkubační dobu během které dochází ke vzniku zárodků pro další růst. Doba přeměny mezi perlitickou a bainitickou strukturou se prodlužuje. U ocelí, které obsahují vysoký obsah legur může dojít k oddělení oblastí vzniku perlitu a bainitu a dochází tak ke vzniku pásma, ve kterém je austenit stabilizován. Všechny prvky přísad v austenitu kromě hliníku způsobují posun křivek počátku a konce přeměny austenitu v kladném směru časové

osy, prvky, které jsou rozpustné ve feritu (Cu, Ni, Si) nemění tvar diagramu, přísady karbidotvorné (Mo, Cr, V, W) mění také tvar diagramu. Tyto prvky způsobují oddělení perlitické a bainitické oblasti. Dle obsahu uhlíku v oceli rozdělujeme diagramy na podeutektoidní, eutektoidní a nadeutektoidní. U podeutektoidní oceli dochází nejprve k vylučování feritu a následně perlitu [13].



Obr. 21. IRA diagram – podeutektoidní ocel [13].

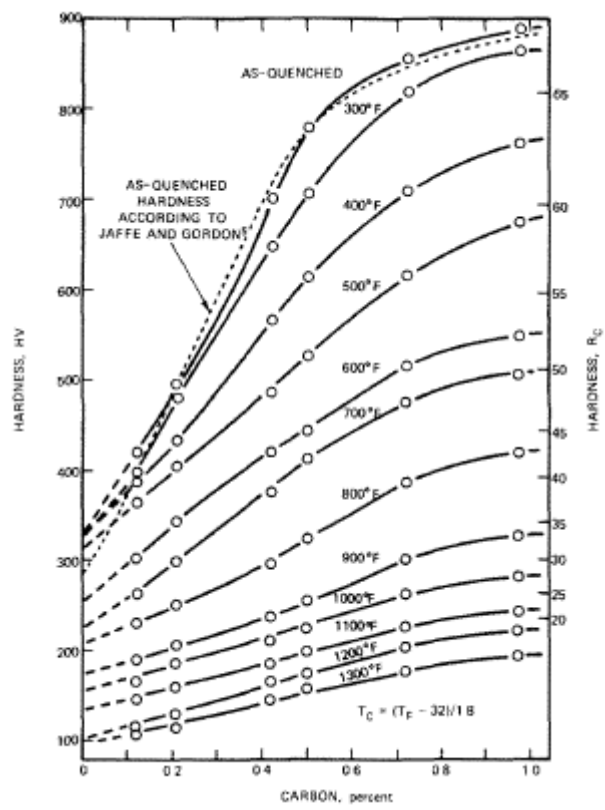


Obr. 22. Martenzitická struktura [16].



Obr. 23 Struktura Ferit – Perlit [16].

Tvrдость vzniklých struktur značně závisí na obsahu uhlíku v daném materiálu. Zejména se to týká martenzitické struktury. Tvrдость vykazují výrazný nárůst v rozmezí obsahu uhlíku 0,2 až 0,6 % a může dosahovat hodnot od 460 HV do 750 HV. S ohledem na druh oceli dosahují jednotlivé struktury přibližných tvrđostí – ferit – 80 HV; perlit – 250 HV [16].



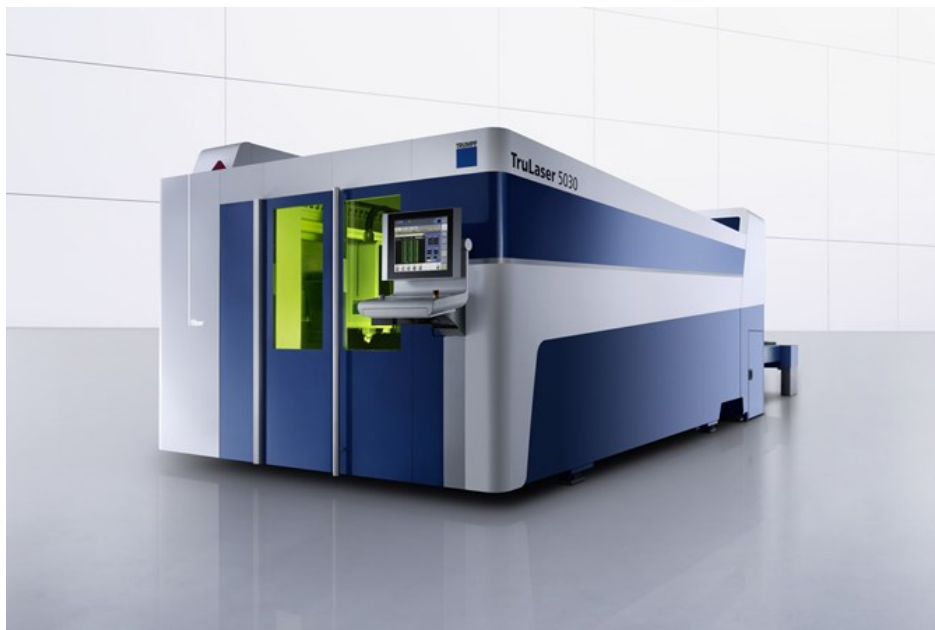
Obr. 24. Tvrdost v závislosti na obsahu C [17].

#### 4 POUŽITÝ STROJ – TRUMPH 5030 FIBER

Užitým strojem je pevnolátkový fiber laser od společnosti Trumpf s označením 5030 fiber. Oproti starším laserům tento stroj poskytuje možnost řezat větší množství materiálů s využitím větších posuvových rychlostí. Tento parametr je nejlépe možné pozorovat při řezání tenkých plechů do tloušťky 5 mm. Dále tento stroj disponuje zařízením pro automatickou výměnu trysek, technologií odpařování materiálu nebo gravírování [18].

Tab. 7. Parametry stroje [18].

	TruLaser 5030 Fiber
Pracovní rozsah os	
Osa Z	115 mm
Maximální tloušťky materiálů	
Konstrukční ocel	25 mm
Ušlechtilá ocel	20 mm
Hliník	12 mm
Další parametry	
Maximální souběžná rychlost os	300 m/min
Výkon	3000 W
Maximální formát plechu	3000 x 1500 mm



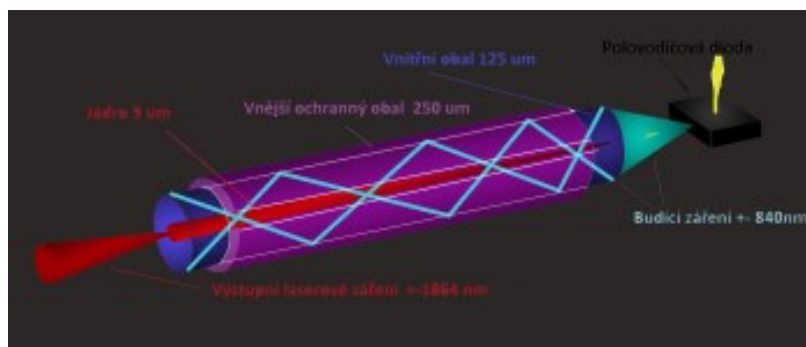
*Obr. 25. Trumph TruLaser 5030 [18].*

#### **4.1 Vlákňové lasery**

Aktivní prostředí vláknového laseru tvoří křemíkové vlákno, které je zároveň rezonátorem. Zrcadla rezonátoru tvoří tzv. Braggovy mřížky, které jsou součástí vlákna. Buzení prostředí je prováděno sadou polovodičových diod. Zvýšení výkonu laserů je dosahováno použitím většího počtu diod. Velikost jádra je příliš malá na soustředění většího počtu paprsků, jádro je proto obklopeno soustavou diod. V okamžiku, když paprsek z diody křížuje jádro vlákna, dochází ke vstřebání energie. Výhodou vláknových laserů je jejich vysoká účinnost s ohledem na nízký příkon, vzhledem k tomu postačuje chlazení zařízení vzduchem. Vlákňový laser se také vyznačuje úzkou fokusací paprsku, díky níž je dosahováno výborných výsledků při technologiích řezání, gravírování a popisování. Běžné výkonové rozmezí vláknových laserů je 500 až 3000 W. Vlákňové lasery nevyžadují složité a citlivé optické zařízení, jelikož generuje světlo uvnitř vlákna. Účinnost dosahuje hodnot až 80 %, pouze 20 % energie se přemění na teplo, optické vlákno tak může být dlouhé s minimální změnou optických vlastností [3, 19].

Tab. 8. Maximální řezná tloušťka [19].

Materiál	500W	1kW	2kW	3kW	4kW	6kW
Uhlík. ocel	5 mm	8 mm	15 mm	18-20 mm	18-20 mm	25 mm
Nerezová ocel	2 mm	4 mm	8 mm	10 mm	10 mm	15 mm
Hliník	2 mm	3 mm	6 mm	8 mm	10 mm	15 mm
Měď	1 mm	2 mm	5 mm	5 mm	5 mm	8 mm
Mosaz	1 mm	2 mm	4 mm	4 mm	4 mm	8 mm
Pozinkováno	1 mm	2 mm	4 mm	4 mm	4 mm	8 mm



Obr. 26. Vláknový laser [19].

#### 4.1.1 Výhody vláknových laserů

- Zaměření paprsků na velmi malý průměr.
- Odvedení laserového paprsku z rezonátoru pomocí optického vlákna.
- Vysoká účinnost laseru.
- Není nutné speciální chlazení.
- Vysoká životnost laseru.

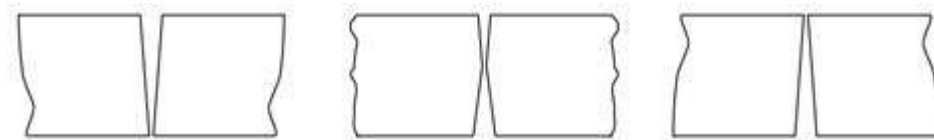


## 5 PARAMETRY VYHODNOCENÍ

Procesní podmínky, které jsou upravovány pro daný proces – výkon paprsku, rychlost posuvu, ohnisková vzdálenost, přídavný plyn a další. Z hlediska vyhodnocení jsou určovány následující parametry – drsnost povrchu řezné plochy, velikost TOO, kuželovitost řezné plochy, změna struktury materiálu, tvoření trhlin, šířka řezu apod. Pro danou problematiku bylo řešeno několik záležitostí a byly vyhodnoceny výsledky při zkoumání kuželovitosti a skluzu řezných ploch, výsledky zkoušek mikrotvrdosti ve spojitosti se strukturními změnami a jakost povrchu řezných ploch.

### 5.1 Kuželovitost

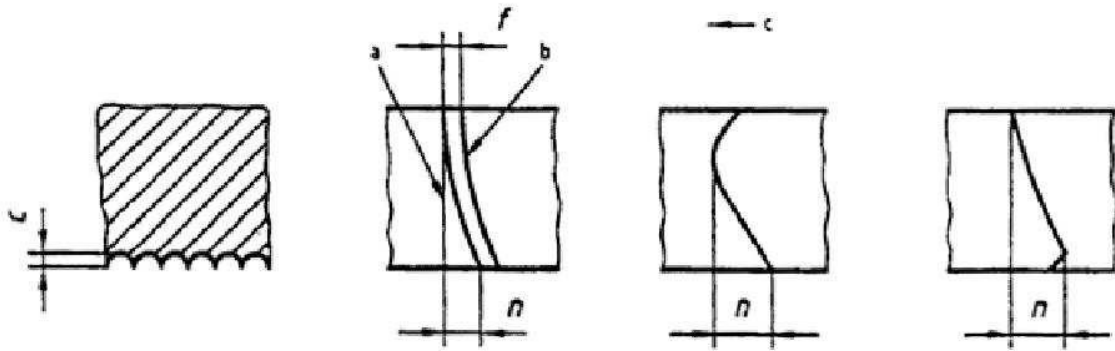
Kuželovitost je dána délkou vstupní hrany, výstupní hrany a tloušťkou řezaného materiálu. Tyto rozměry nemají předem danou závislost. Kuželovitost se mění v závislosti na měnících se řezných podmínkách. Kuželovitost je způsobena snížením koherence paprsku a vychylováním od své osy, na což mají vliv technologické parametry procesu. Tvar řezné plochy může být odlišný [20].



Obr. 27. Tvar řezu [20].

### 5.2 Skluz

Hodnota definovaná jako vzdálenost řezné rýhy v místech vstupu a výstupu laserového paprsku z materiálu. Tyto rýhy mohou mít odlišné tvary v závislosti na podmínkách. Tato hodnota je podstatně závislá na hodnotě výkonu laserového zařízení, posuvové rychlosti a tloušťce materiálu a může být považována za prvotní kontrolní parametr [21].

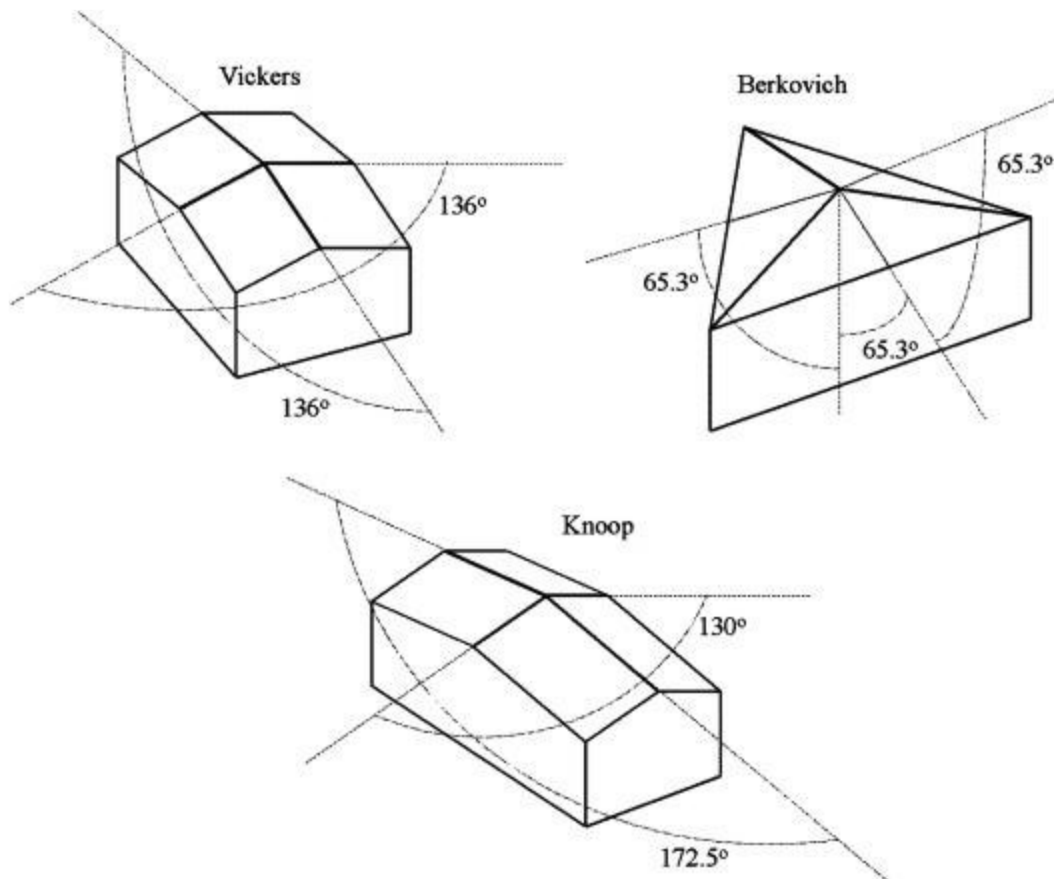


Obr. 28. Skluz [21].

- Kde: a – referenční přímka,  
 b – skluzová rýha,  
 c – směr posuvu,  
 n – vzdálenost dvou bodů skluzové rýhy,  
 C – velikost otřepů,  
 f – vzdálenost dvou bodů skluzových rýh.

### 5.3 Mikrotvrдость

Měření mikrotvrđosti se od klasického měření tvrdosti odlišuje hlavně velikostí zatížení, která se udává v gramech. Při vyhodnocování vtisku je k určení rozměru vtisku nutné využít mikroskop. Existuje více používaných druhů zkoušek mikrotvrđosti – dle Vickerse, Berkoviče nebo Knoop. Měření mikrotvrđosti je využíváno u malých nebo tenkých vzorků, křehkých materiálů, pro hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování, hodnocení svarových spojů nebo měření tvrdosti strukturních složek a fází [22].



Obr. 29. Druhy vnikacích těles [22].

### 5.3.1 Mikrotvrдость dle Vickerse

Podstatou zkoušky je vtláčování vnikacího tělesa do zkoušeného materiálu. Vnikacím tělesem je čtyřboký hranol s vrcholovým úhlem 136°. Těleso působí na zkoumaný materiál silou  $F$  po určenou dobu. Po odlehčení je stanovena délka úhlopříčky vtisku, z toho je následně určena plocha vtisku [22].

Tab. 9. Rozdělení metod dle Vickerse [24].

Značení	Symbol tvrdosti HV	Zatížení [N]
Zkouška tvrdosti dle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \geq 49,03$
Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení	$HV 0,2 \text{ až } < HV 5$	$1,961 \leq F < 49,03$
Zkouška mikrotvrdsti dle Vickerse	$HV 0,01 \text{ až } < HV 0,2$	$0,09807 \leq F < 1,961$

### 5.3.2 Teplotní pole

V důsledku přestupu tepla vedením v materiálu v průběhu laserového řezání je možné využít teplotní pole jako popis daného jevu. Teplotní pole zobrazuje teplotu pro každý bod závisle nebo nezávisle na čase. Při kontaktu laserového paprsku s povrchem materiálu dochází k ohřevu částic až na teplotu tavení. Natavená oblast se rozšiřuje a materiál se v místě působení paprsku začne odpařovat, tlakem páry je tavenina vytlačována a vytváří se v tomto místě otvor, kterým proniká paprsek dále do materiálu. Vzhledem k poměrně velké tepelné vodivosti oceli oproti polymerům, je teplo po přijetí rozváděno dál do materiálu. K vedení tepla materiálem dochází srážkami atomů a molekul předávajících si kinetickou energii, což se navenek projeví vzrůstem teploty. Řešenou problematiku je možné popsat transientním teplotním polem, tedy časově závislým. Pro tento případ je možné využít Fourierovu rovnici:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (3)$$

Kde:  $t$  – teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$\nabla$  - divergence gradientu pole [-],

$\tau$  – čas [s].

Pro odvození obecné rovnice sdílení tepla vedením uvažujme hranol o rozměrech  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  a izotropním prostředí určeného vlastnostmi  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ . V tomto objemu jsou uvažovány tepelné zdroje o měrném výkonu  $w$ . Bilance bude provedena dle rovnice:

$$\text{Přivedené teplo} + \text{vnitřní zdroj} = \text{odvedené teplo} + \text{akumulace} \quad (4)$$

Při úvaze nekonečně malého objemu prostředí ( $dV = dx dy dz$ ), je akumulováno za čas  $d\tau$  množství energie  $dQ$ :

$$dQ = dV \cdot \rho \cdot \frac{du}{d\tau} d\tau \quad (5)$$

Kde:  $\rho$  – hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$u$  – měrná vnitřní energie [ $\text{J}/\text{kg}$ ].

Přivedené teplo ve směru osy  $x$  je rovno:

$$Q_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (6)$$

Teplu odvedené je rovno:

$$Q_{x+dx} = \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz \cdot d\tau \quad (7)$$

Dle tohoto zápisu možno sestavit vztahy pro zbylé směry:

Tab. 10. Složky tepelné energie

Osa	Vstup	Výstup
X	$q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt$	$\left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz \cdot d\tau$
Y	$q_y \cdot dx \cdot dz \cdot dt$	$\left( q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx \cdot dz \cdot d\tau$
Z	$q_z \cdot dy \cdot dz \cdot dt$	$\left( q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dy \cdot dz \cdot d\tau$
Zdroj: $w \cdot dV \cdot d\tau$		Akumulace: $\rho \cdot dV \frac{\partial u}{\partial \tau} d\tau$

Po dosazení do slovní bilanční rovnice a vykrácení členem  $dV \cdot d\tau$ , získáme:

$$\rho \cdot w = \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} + \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (8)$$

Při ději za konstantního tlaku:

$$du = c_p \cdot dt - p \cdot dv \quad (9)$$

Kde:  $v$  – měrný objem [ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}$ ].

Hodnoty hustoty, případně měrného objemu jsou pro nestlačitelné prostředí konstantní a rovnice se zjednoduší na:

$$du = c_p \cdot dt \quad (10)$$

Základní zákon pro popis sdílení tepla vedením uváděn jako:

$$q = -\lambda \nabla t \quad (11)$$

Tento zákon byl odvozen z předpokladu, že množství tepla přeneseného mezi dvěma deskami o různé teplotě, které jsou ve vzdálenost  $dl$ , je přímo úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času a nepřímo úměrné jejich vzdálenosti. Při dosazení za  $q$  rovnici (10) a s využitím vztahu (9) obdržíme:

$$\rho \cdot w + \lambda \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (12)$$

Pro zápis rovnice bez úvahy tepelných zdrojů dostáváme diferenciální rovnici vedení tepla:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (13)$$

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (14)$$

Kde:  $t$  – teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$\nabla$  - divergence gradientu pole [-],

$\tau$  – čas [s],

$\lambda$  – součinitel teplotní vodivosti [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ],

$c_p$  – měrná tepelná kapacita [ $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ],

$\rho$  – hustota [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] [30].

Pokud je zkoumaným polem gradient teploty, kladná divergence určuje místo vzniku tepla, divergence záporná popisuje místo, kde teplo zaniká. Hodnota  $c_p$  vyjadřuje měrnou tepelnou kapacitu, což je množství tepla potřebného k ohřátí materiálu o  $1^{\circ}\text{C}$ . Tepelná vodivost materiálu je vyjádřena součinitelem tepelné vodivosti. Je závislá na chemickém složení daného materiálu, následně se mění s teplotou. S růstem teplot se u tuhých látek také zvyšuje tepelná vodivost:

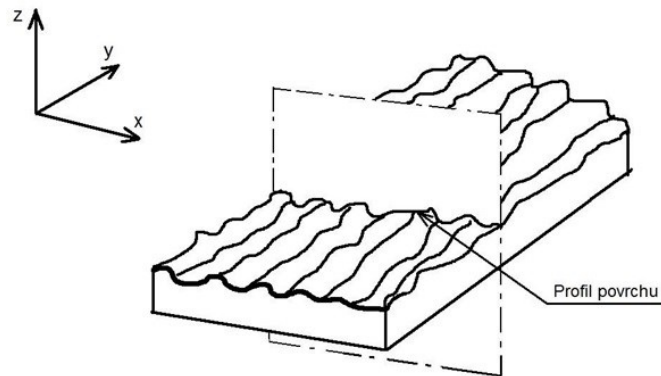
$$\lambda = \lambda_0 (1 + \alpha \cdot t) \quad (15)$$

Kde:  $\lambda_0$  – součinitel tepelné vodivosti při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$  [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ],

$\alpha$  – teplotní součinitel [27].

## 5.4 Jakost povrchu

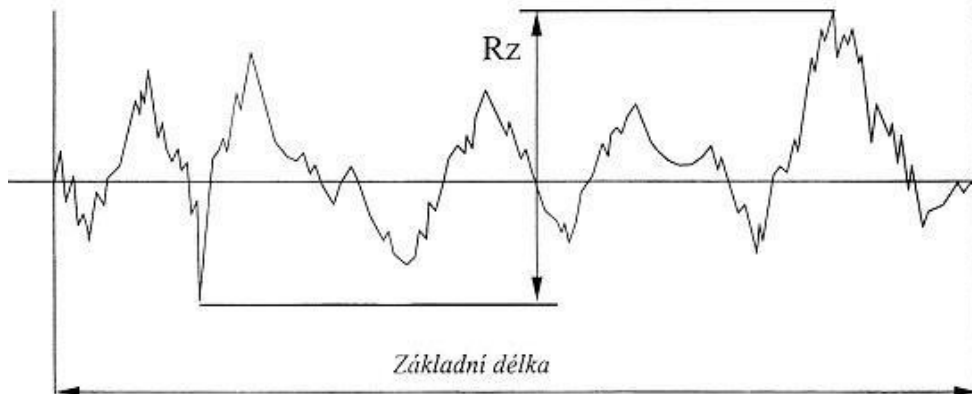
Libovolná technologie zanechává na povrchu materiálu určité nerovnosti, které mohou mít zásadní vliv při funkci těchto ploch. Zobrazení povrchu se řeší řezem rovinou kolmou k povrchu. Řezem je získán profil, který slouží pro posuzování struktury povrchu [25].



Obr. 30. Profil povrchu [25].

Strukturu povrchu je možné rozčlenit na složky dle roztečí nerovností a to drsnost povrchu, vlnitost povrchu a základní tvar.

- Největší výška profilu  $R_z$  – výškový parametr udávající součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně na základní délce [25].



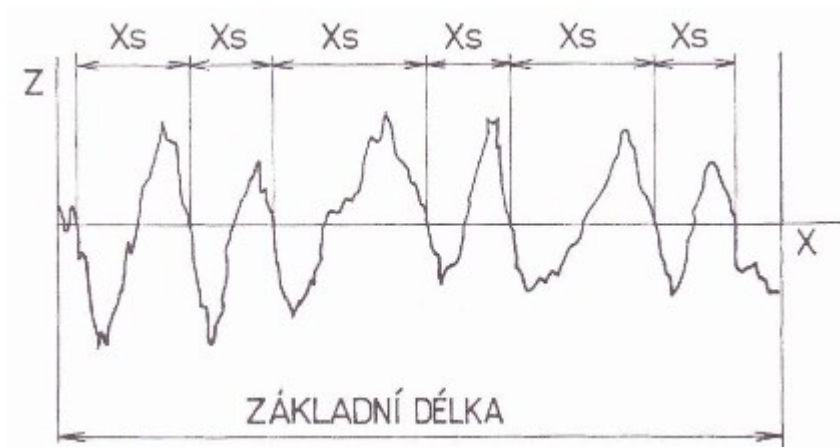
Obr. 31. Největší výška profilu [23].

- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $R_a$  – výškový parametr udávající aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic na základní délce [25].



Obr. 32. Průměrná aritmetická úchylka [25].

- Průměrná šířka prvků profilu  $RSm$  – aritmetický průměr šířek  $x_s$  prvků profilu na základní délce [25].



Obr. 33. Průměrná šířka prvků profilu  $RSm$  [25].



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

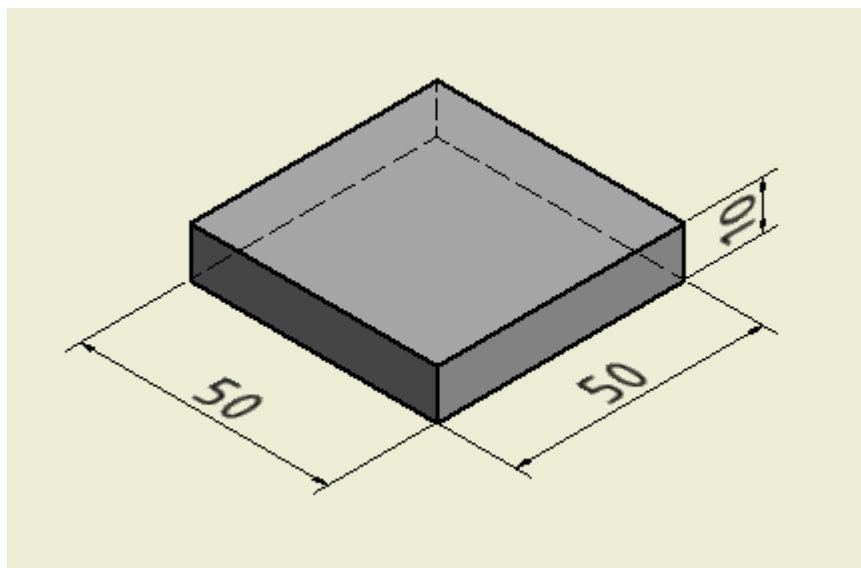
## 6 EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ LASEREM

### 6.1 Cíle praktické části

1. Výroba vzorků na vláknovém laseru Trumpf
2. Vyhodnocení povrchu řezné plochy
3. Porovnání strukturních změn na základě zkoušek mikrotvrdosti
4. Porovnání TOO pomocí softwaru COSMOS/M

### 6.2 Laserové řezání

Pro dané měření bylo nutno zhotovit vzorky metodou laserového řezání. Při řezání byly proměřovány parametry řezného výkonu a posuvové rychlosti. Rozměry daných tělísek byly 50x50x10 mm. Pro materiál z oceli třídy 11 byla taktéž vyřezána destička o tloušťce 20 mm.

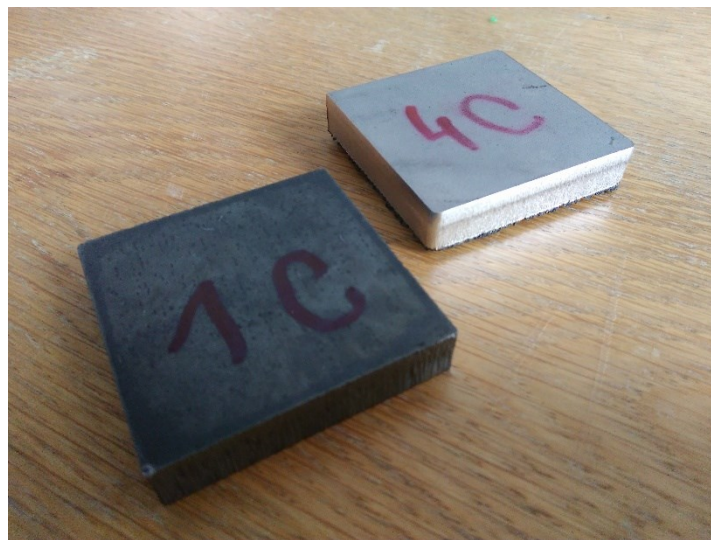


Obr. 34. Zkušební tělíska.

Tab. 11. Označení vzorků.

Značení vzorků	Materiál	Asistenční plyn	Posuvová rychlost [m/min]	Výkon [W]
1A	11 375	O <sub>2</sub>	1	3000
1B	11 375	O <sub>2</sub>	0,75	3000
1C	11 375	O <sub>2</sub>	0,5	3000

Značení vzorků	Materiál	Asistenční plyn	Posuvová rychlost [m/min]	Výkon [W]
2A	11 375	O <sub>2</sub>	1	3000
2B	11 375	O <sub>2</sub>	1	2000
2C	11 375	O <sub>2</sub>	1	1000
3A	17 240	N <sub>2</sub>	0,65	3000
3B	17 240	N <sub>2</sub>	0,45	3000
3C	17 240	N <sub>2</sub>	0,2	3000
4A	17 240	N <sub>2</sub>	0,65	3000
4B	17 240	N <sub>2</sub>	0,65	3500
4C	17 240	N <sub>2</sub>	0,65	4000
5A	11 375	O <sub>2</sub>	1	3000



Obr. 35. Testované materiály.

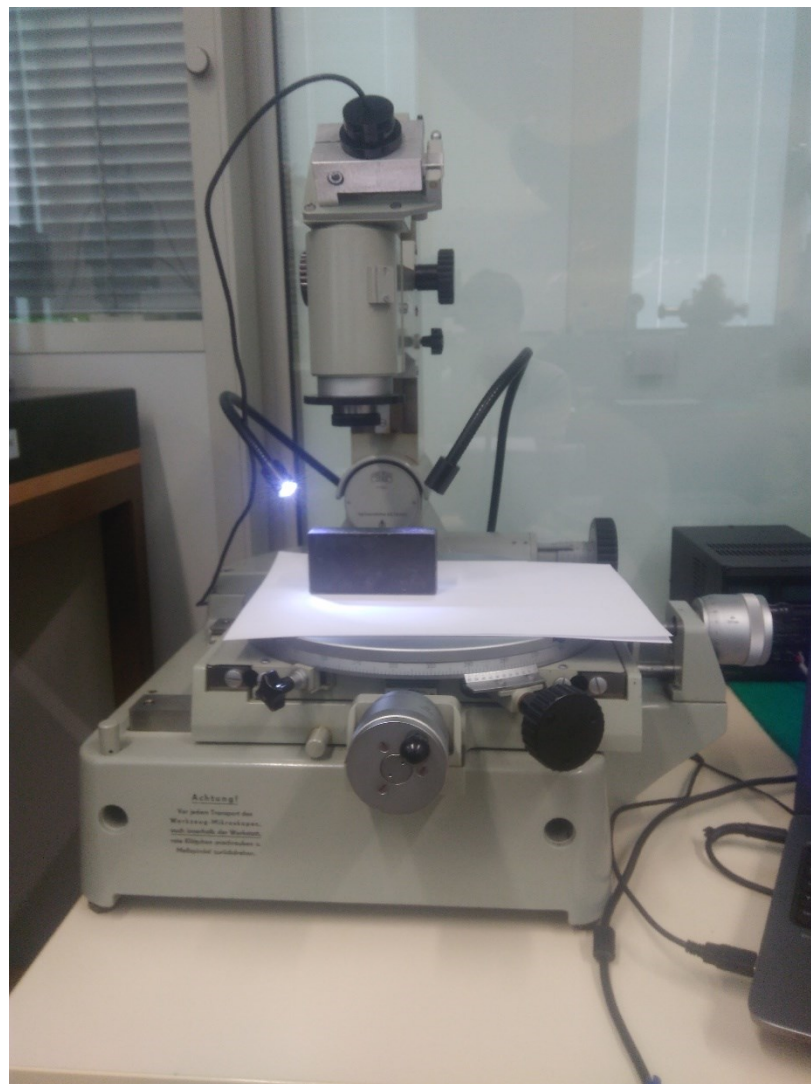
### 6.3 Laserové odpařování

Pro vytvoření drážek ve vybraných materiálech byla neúspěšně použita metoda odpařování. Materiál po roztavení nebyl plynem odstraňován z místa řezu, ale vracel se zpátky do řezné škáry a následné měření by nebylo možné.

## 7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 7.1 Vzhled řezné plochy

Pro vytvoření snímků řezných ploch byl použit mikroskop Carl Zeiss Jena, jako světelný zdroj je zde využita externí diodová lampa. Mikroskop je vybaven posuvným otočným stolem řízeným posuvným šroubem s přesností 0,01 mm. K mikroskopu je pomocí přípravku připevněna externí kamera propojená s PC. Pro vytvoření snímků bylo využito zvětšení 50x a 200x.



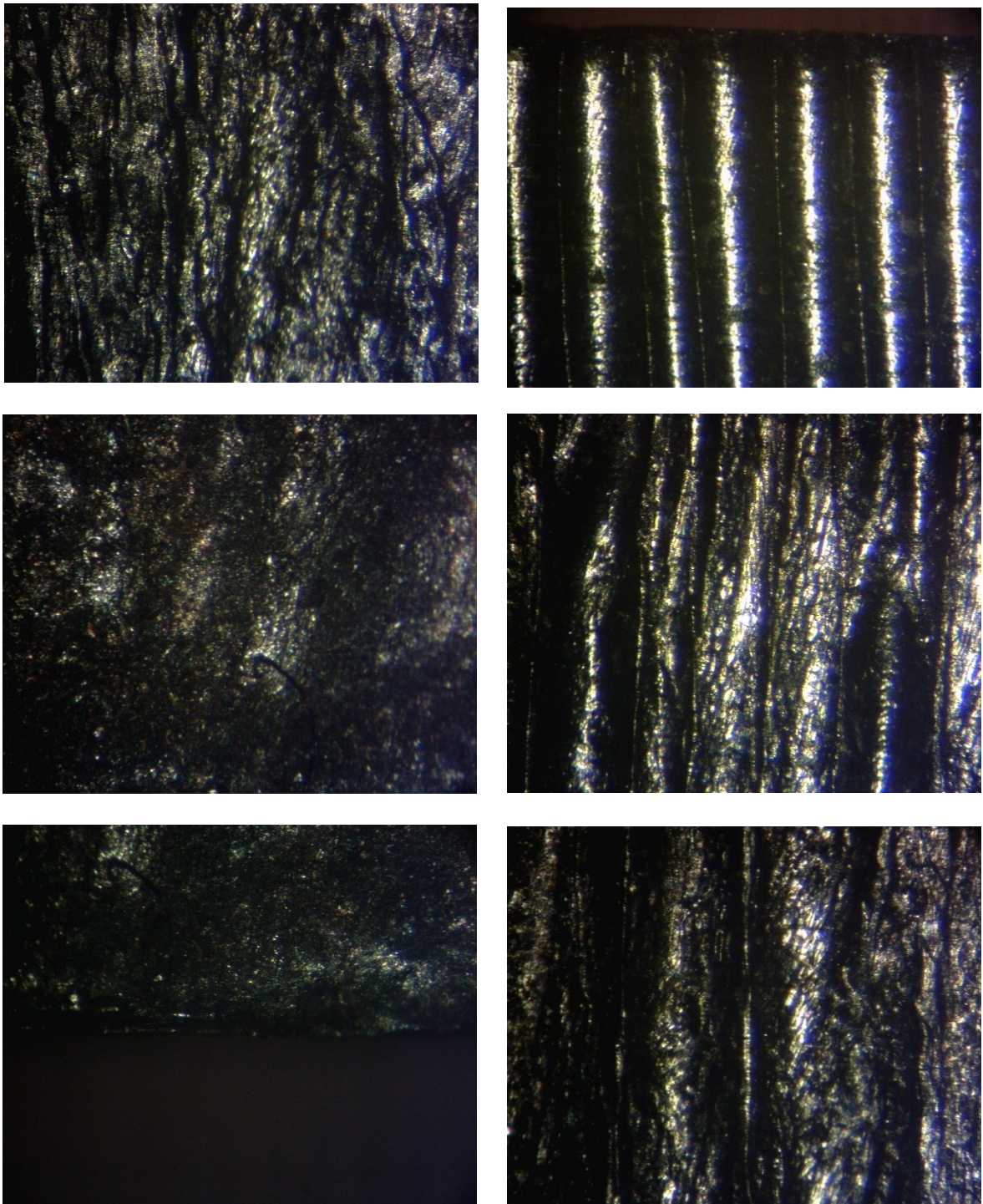
*Obr. 36. Mikroskop Carl Zeiss Jena.*



### 7.1.1 Vyhodnocení

Jakost řezné plochy vykazuje s rostoucí tloušťkou vizuální změnu.

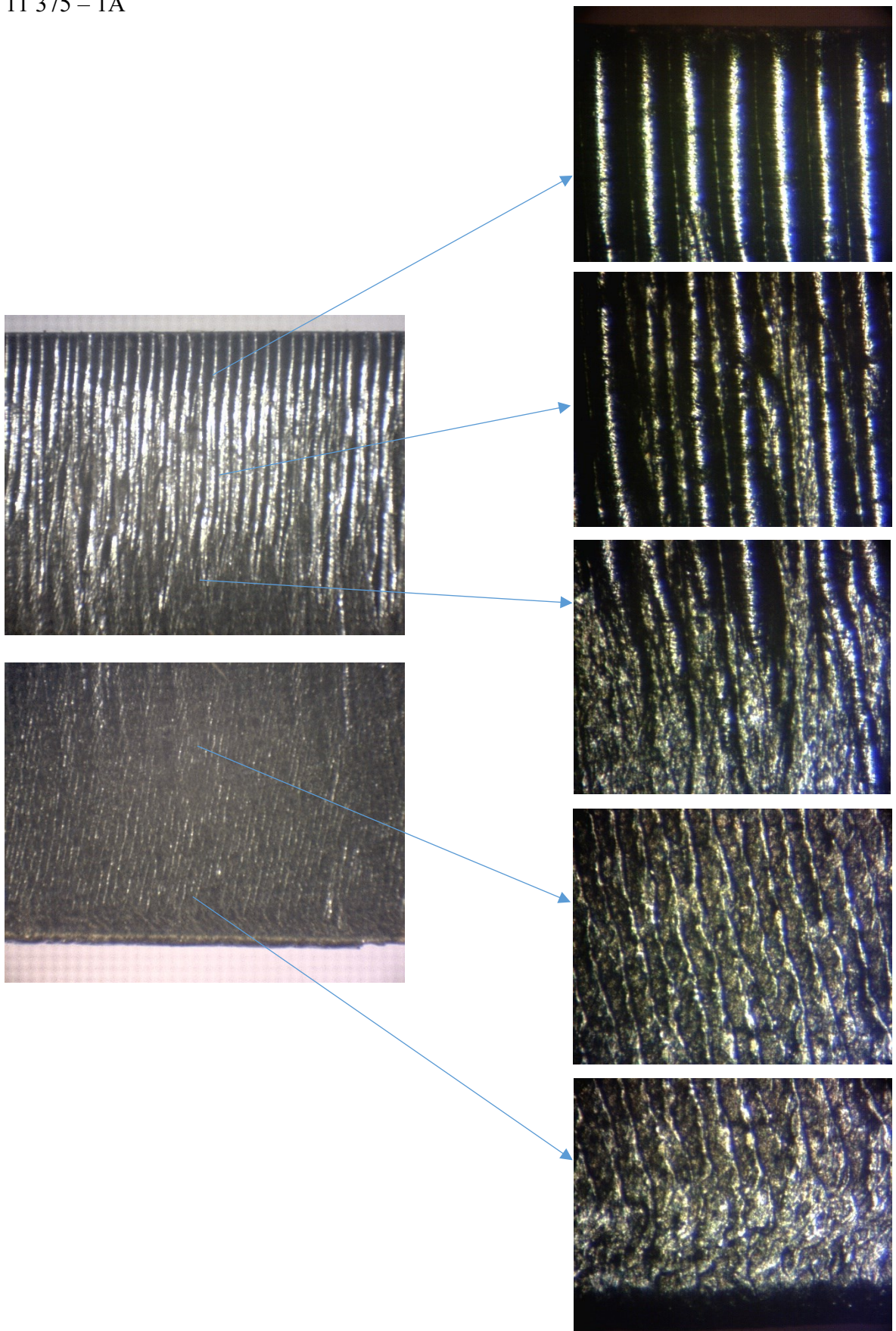
11 375 – 5A



*Obr. 37. Plocha řezu – vzorek 5A.*



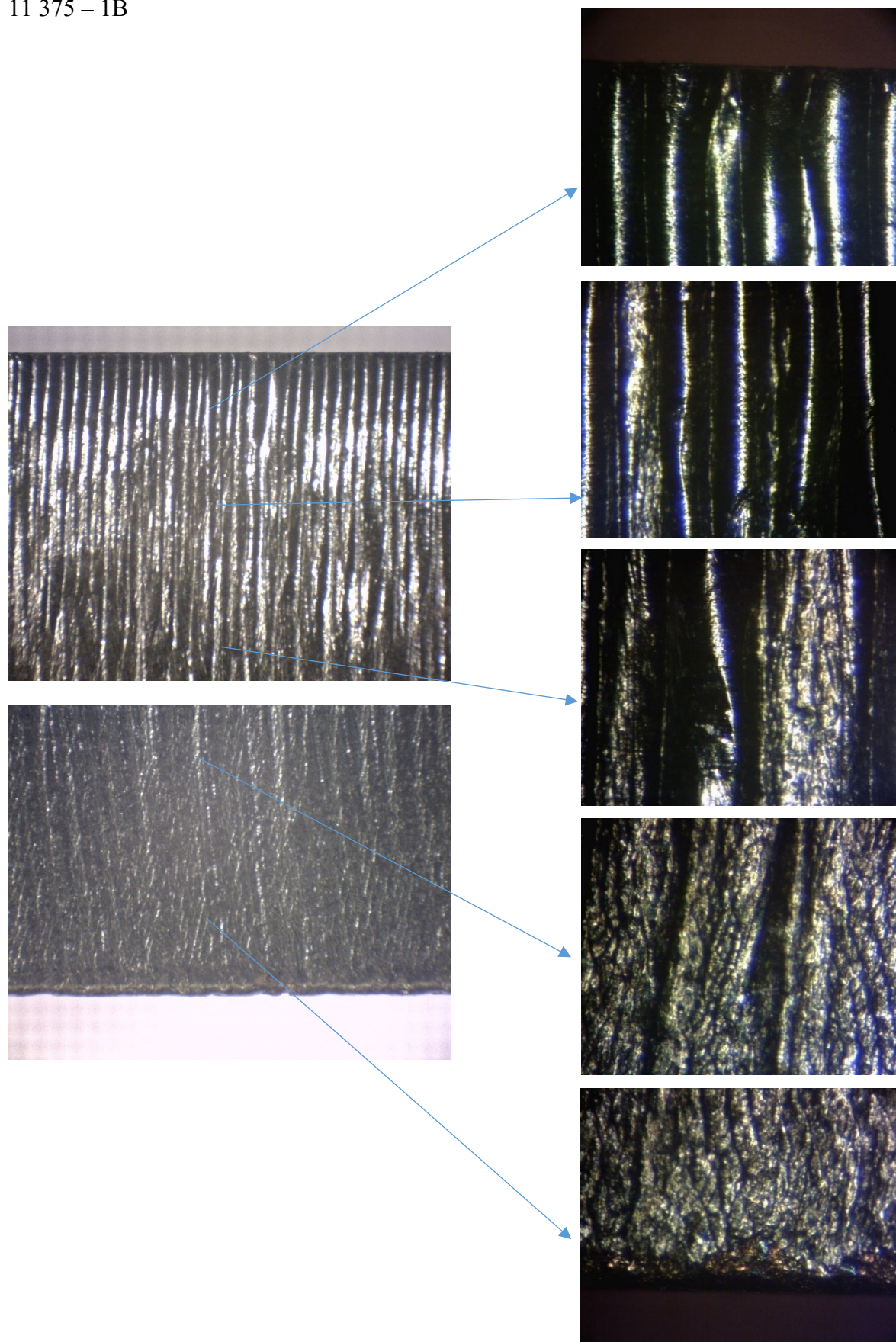
11 375 – 1A



Obr. 38. Plocha řezu – vzorek 1A.

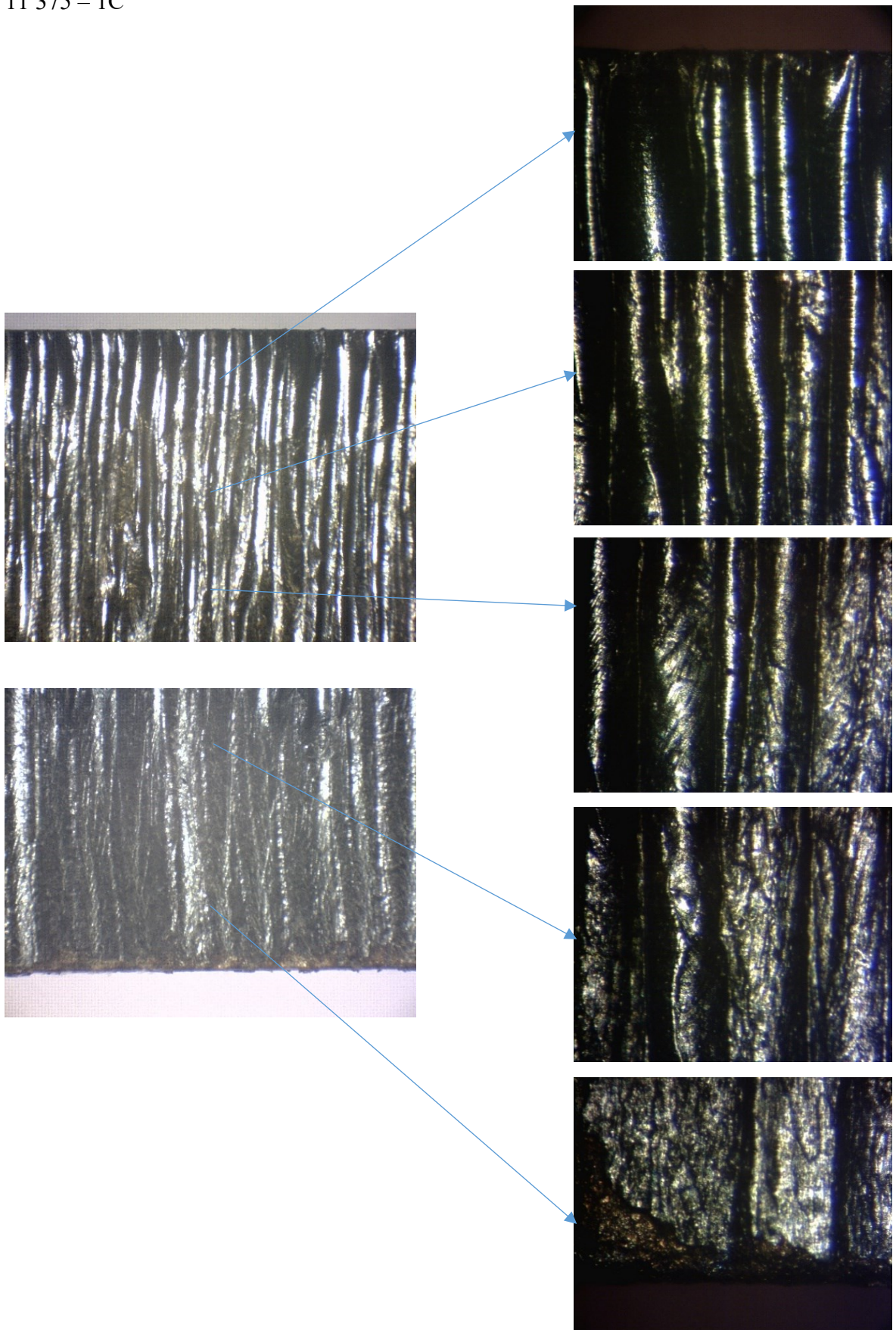


11 375 – 1B



Obr. 39. Plocha řezu – vzorek 1B.

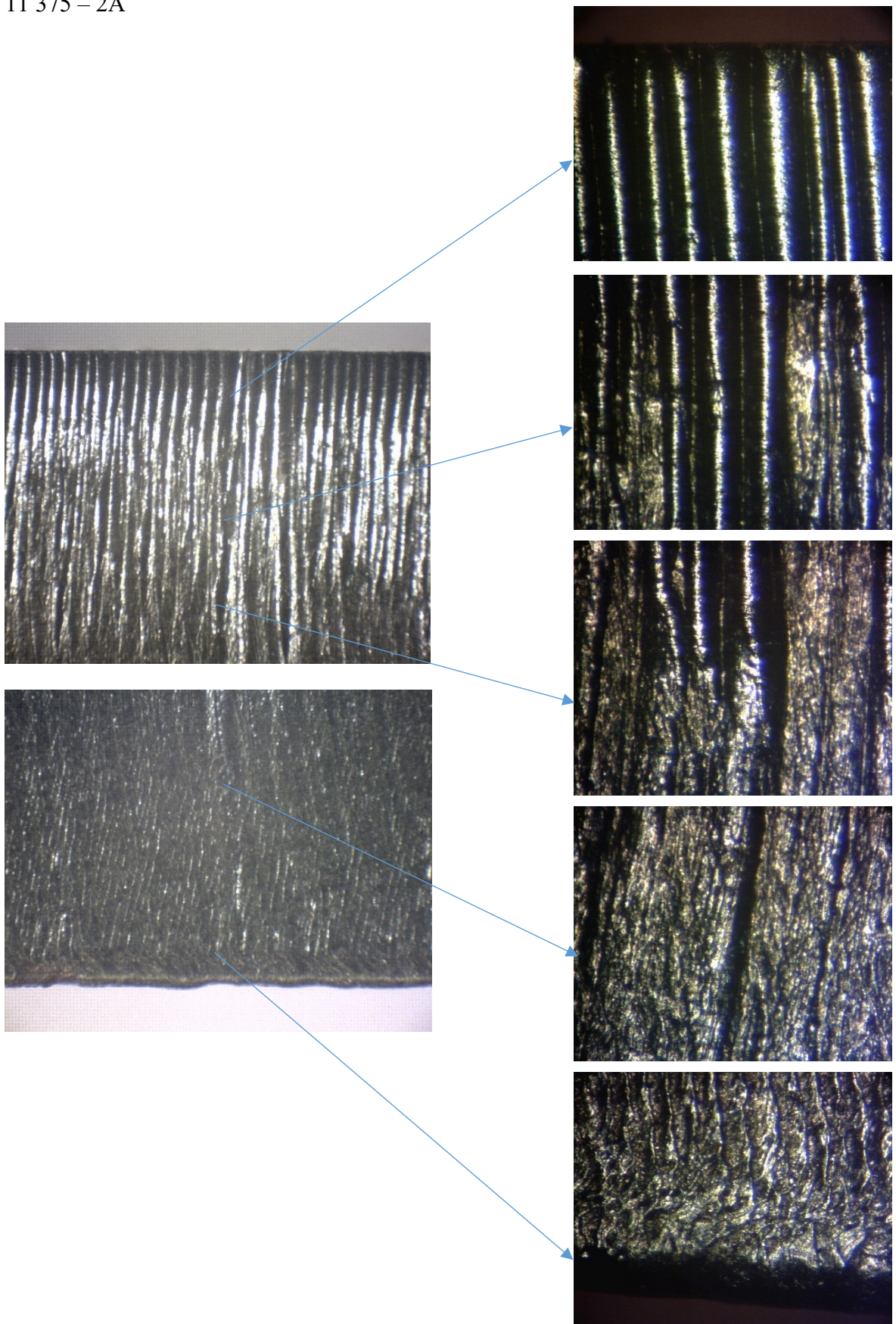
11 375 – 1C



Obr. 40. Plocha řezu – vzorek 1C.



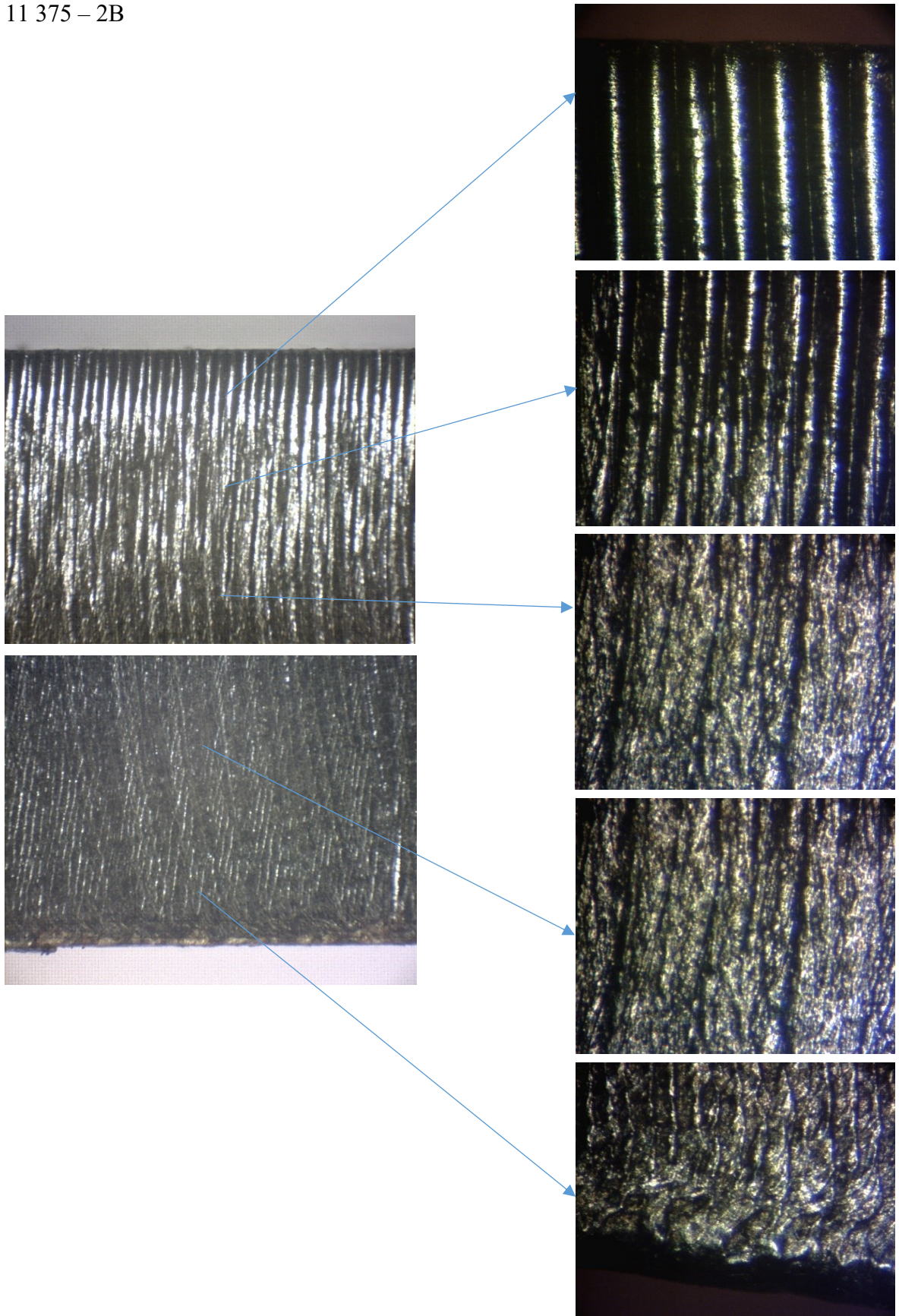
11 375 – 2A



Obr. 41. Plocha řezu – vzorek 2A.



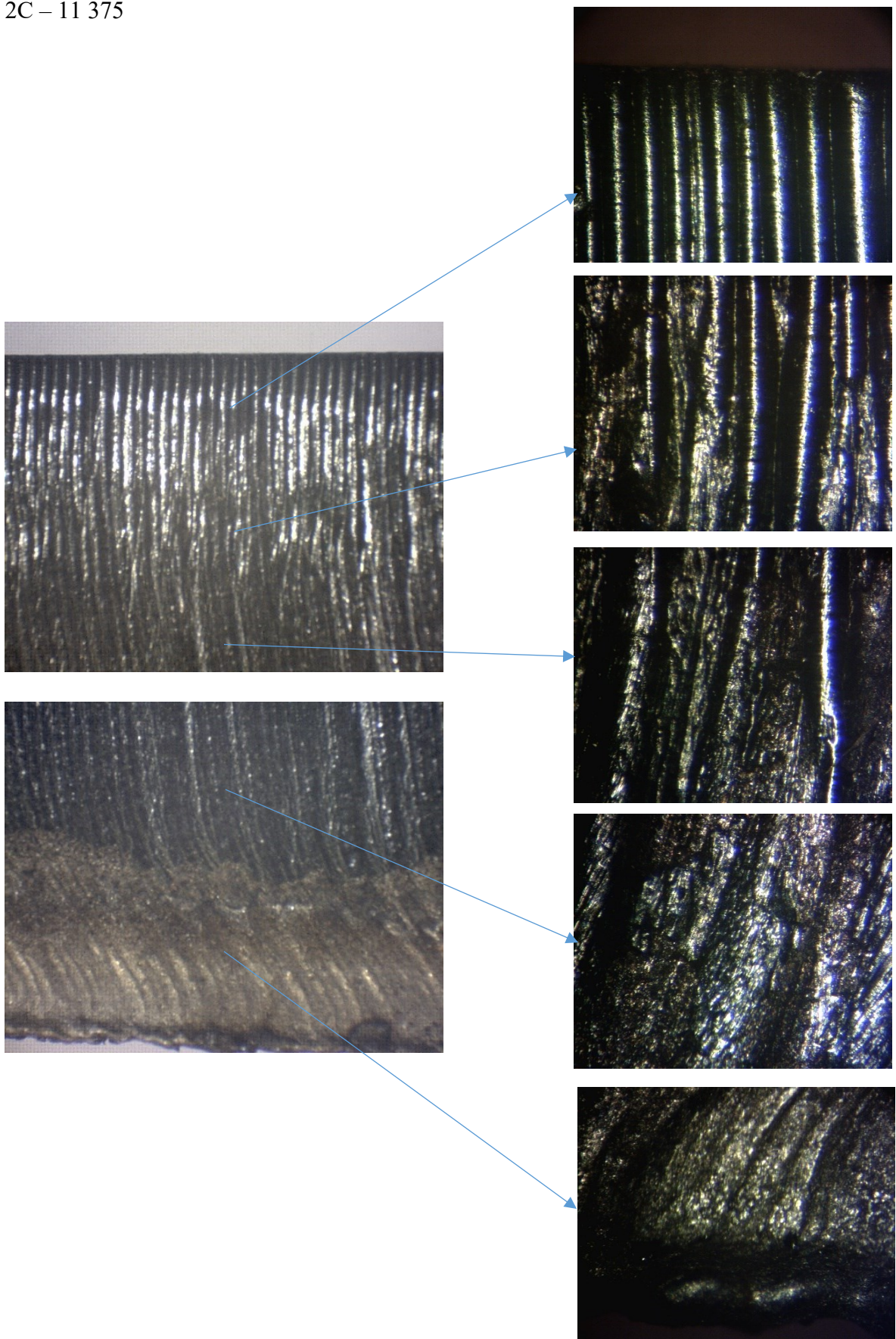
11 375 – 2B



Obr. 42. Plocha řezu – vzorek 2B.



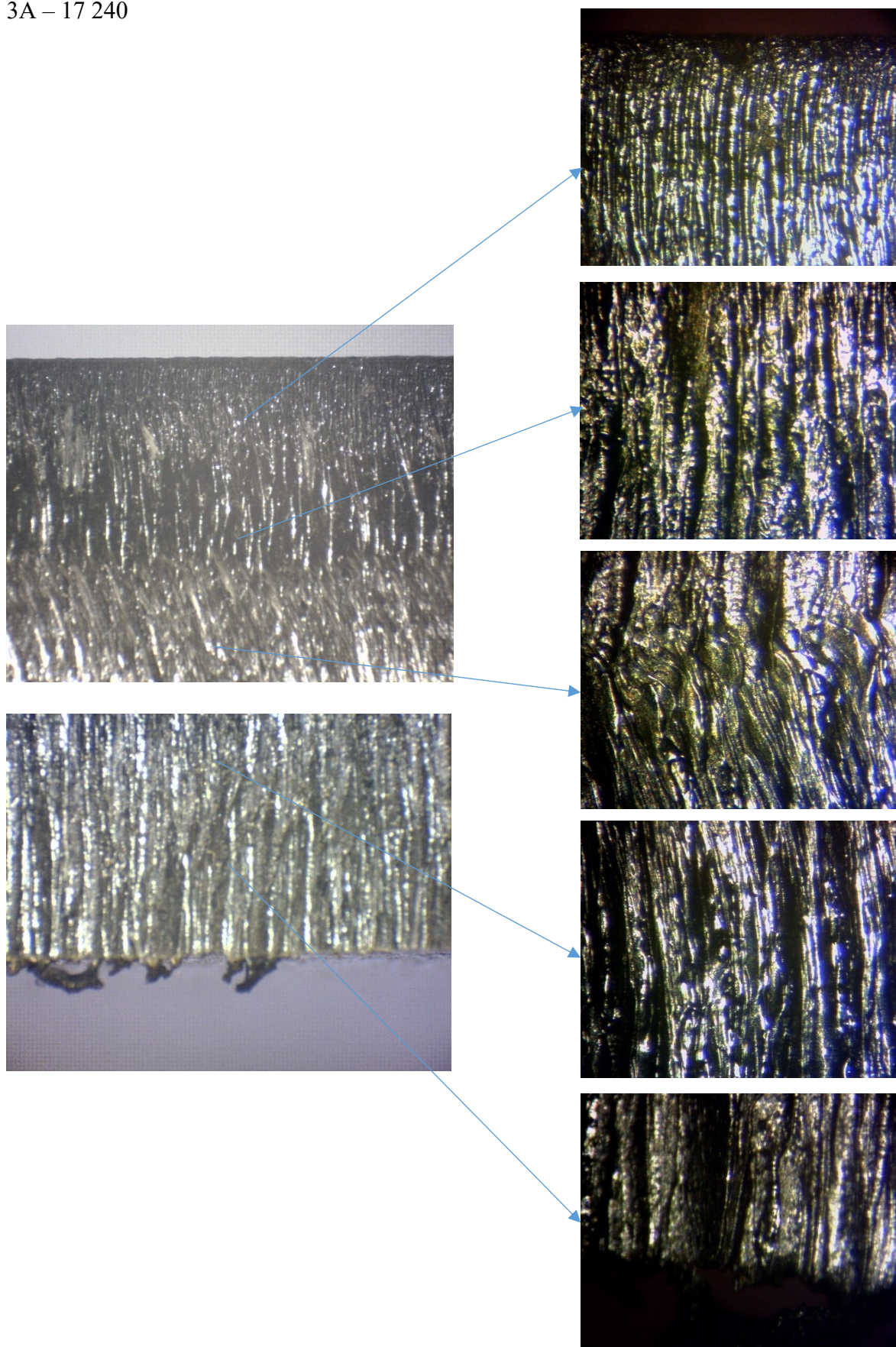
2C – 11 375



Obr. 43. Plocha řezu – vzorek 2C.



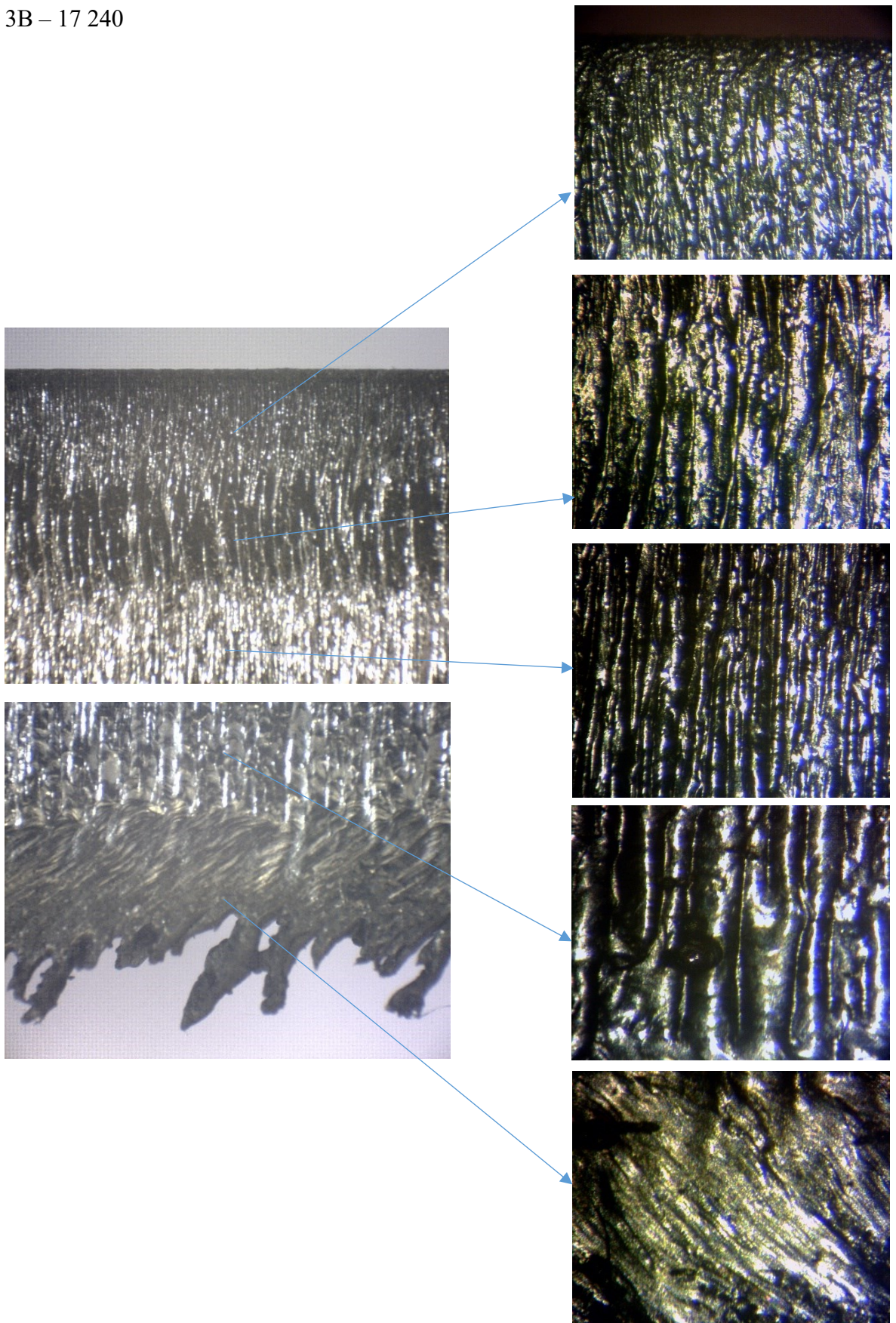
3A – 17 240



Obr. 44. Plocha řezu – vzorek 3A.



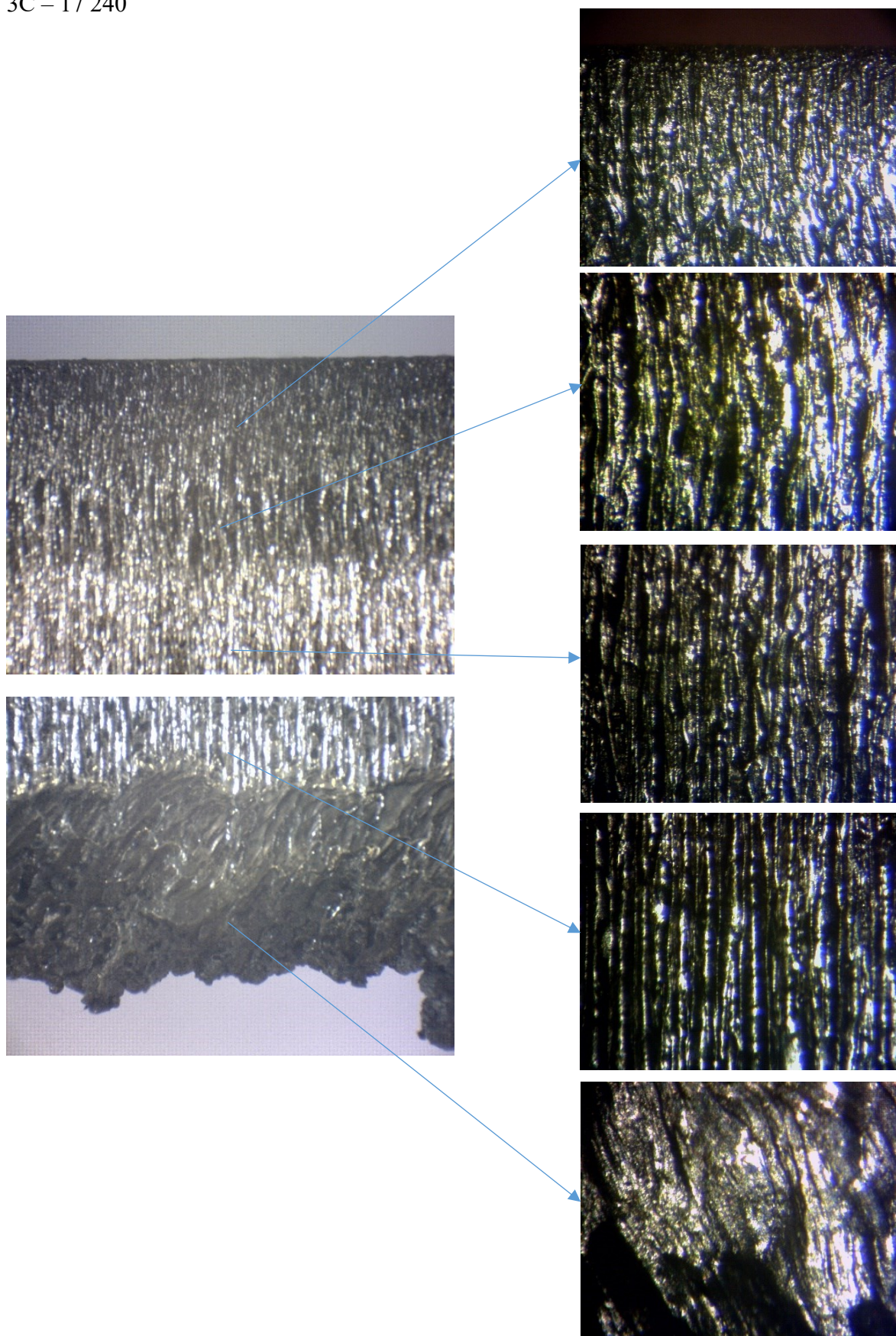
3B – 17 240



Obr. 45. Plocha řezu – vzorek 3B.



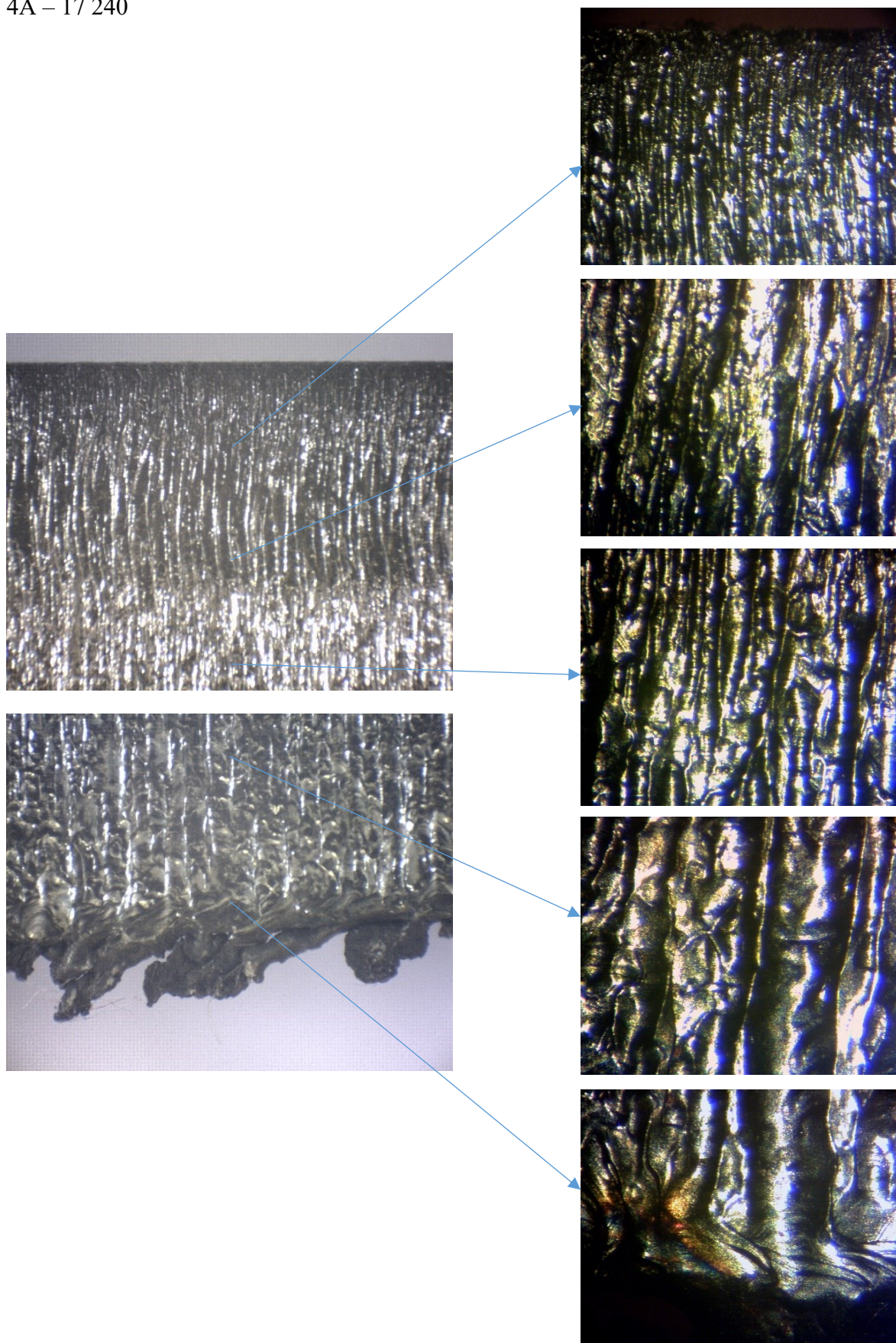
3C – 17 240



Obr. 46. Plocha řezu – vzorek 3C.



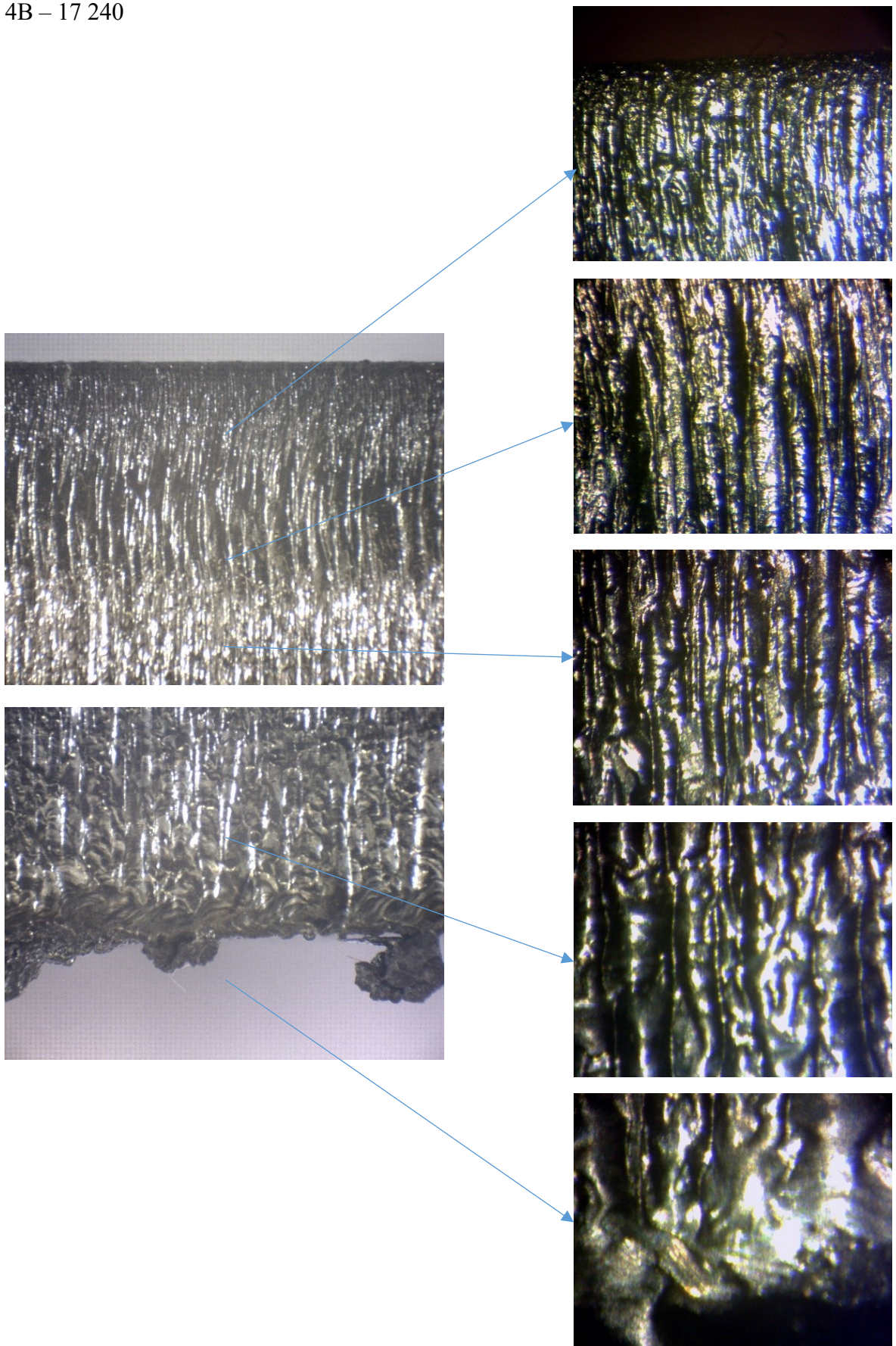
4A – 17 240



Obr. 47. Plocha řezu – vzorek 4A.



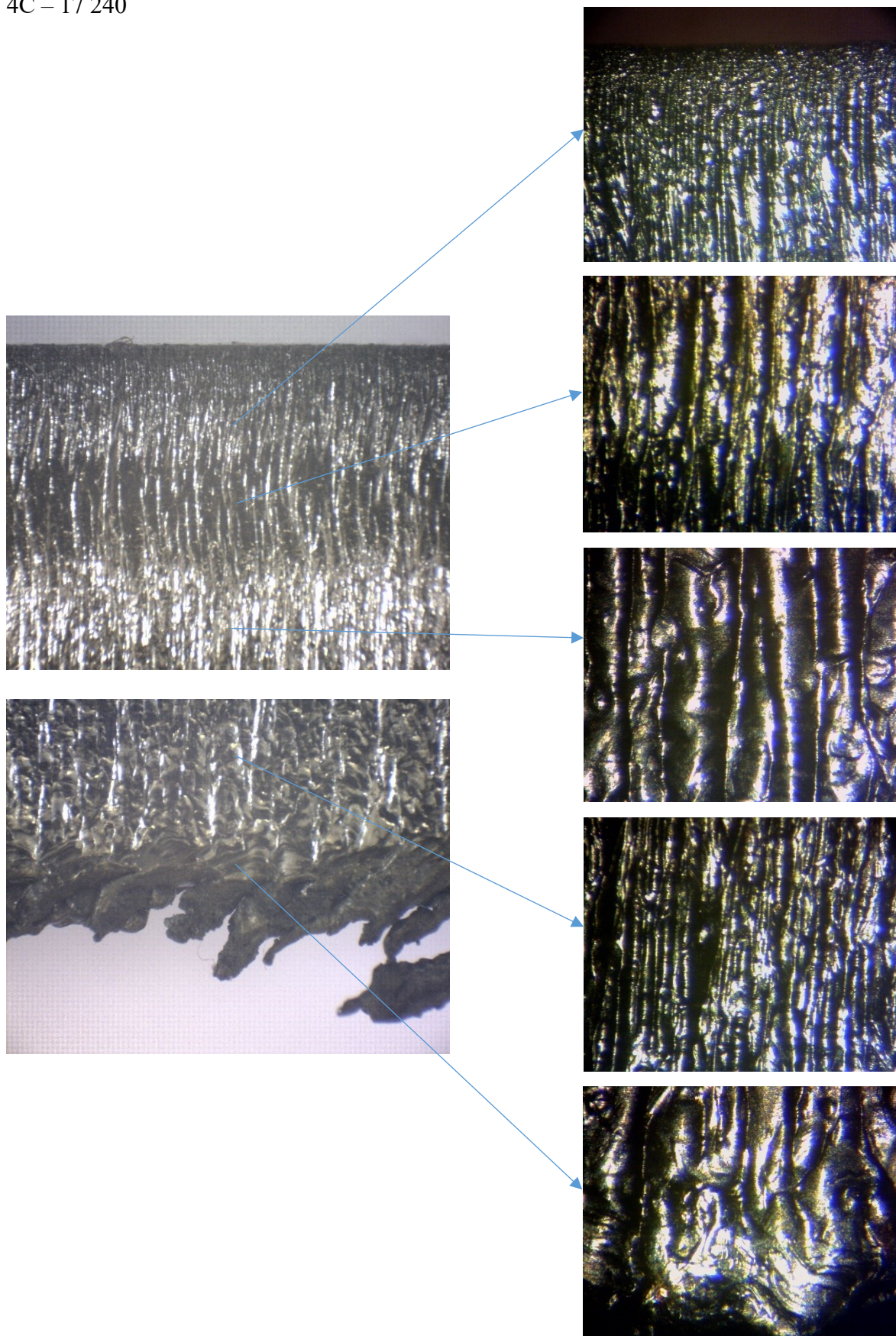
4B – 17 240



Obr. 48. Plocha řezu – vzorek 4B.



4C – 17 240



Obr. 49. Plocha řezu – vzorek 4C.

Na snímcích korozivzdorné oceli jsou ve všech případech pozorovány otřepy na spodní hraně vzorku. Tento jev je způsoben nevhodným nastavením výšky ohniska společně se špatným nastavením tlaku řezného plynu. U nelegované uhlíkové oceli vykazoval vzorek 2C už pohledově vyšší hodnotu skluzu. Toto bylo způsobeno nastavením nižšího řezného výkonu.

## 7.2 Měření kuželovitosti

Mimo technologické aspekty má vliv na kuželovitost řezné plochy také tloušťka obráběného materiálu a délka laserového paprsku, při tření povrchu paprsku a materiálu dochází k oslabování paprsku a jeho následnému odklonu od vlastní osy. Interpretovány byly výsledky získané při měření hran totožně orientovaných. Měření bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřítka Festa s rozsahem měření 0 – 150 mm, rozlišitelností 0,01 mm [26].



Obr. 50. Posuvné měřítko Festa [26].

Kuželovitost byla vypočtena dle vztahu:

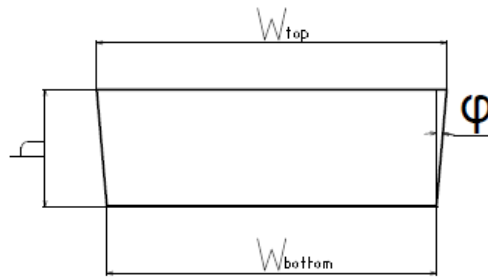
$$\varphi = \frac{\left( \tan^{-1} \cdot \frac{W_{top} - W_{bottom}}{h} \right)}{2} \quad (16)$$

Kde:  $\varphi$  – kuželovitost řezné spáry [°],

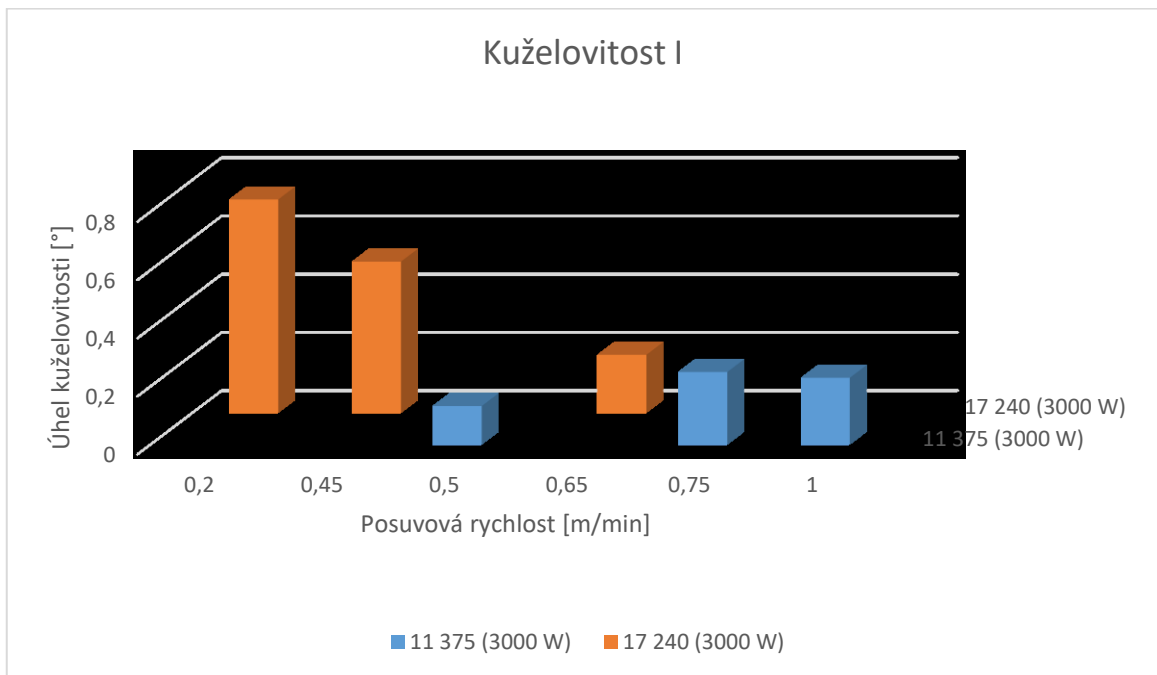
$W_{top}$  – délka vstupní řezné hrany [mm],

$W_{bottom}$  – délka výstupní řezné hrany [mm],

$h$  – vzdálenost mezi vstupní a výstupní plochou [mm].



Obr. 51. Kuželovitost vzorku.

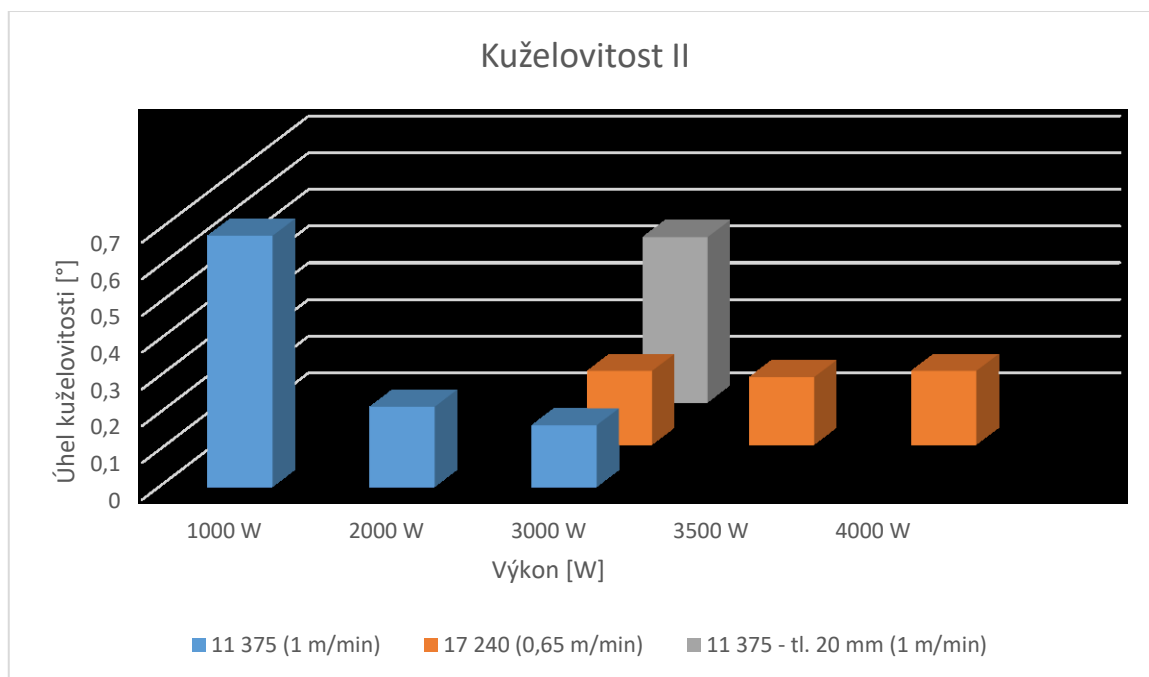


Obr. 52. Závislost kuželovitosti na posuvové rychlosti.

Z výsledků je vidno, že posuvová rychlost má velký vliv na kuželovitost řezné spáry. Při řezání korozivzdorné oceli nižšími posuvovými rychlostmi je kuželovitost znatelně vyšší, což může být způsobeno delší dobou interakce paprsek – obrobek. S rostoucí posuvovou rychlostí kuželovitost postupně klesá. Při řezání nelegované uhlíkové konstrukční oceli při různých posuvových rychlostech se naměřené hodnoty výrazně nelišily.

Tab. 12. Změna posuvové rychlosti.

Vzorek	Posuvová rychlost [m/min]	Délka vstupní hrany [mm]	Sm. odchylka [mm]	Délka výstupní hrany [mm]	Sm. odchylka [mm]	Úhel kuželovitosti [°]
1A	1	49,94	0,015	49,86	0,020	0° 14'
1B	0,75	49,90	0,012	49,81	0,016	0° 15'
1C	0,5	49,86	0,010	49,81	0,016	0° 8'
3A	0,65	49,82	0,033	49,75	0,017	0° 12'
3B	0,45	49,90	0,031	49,72	0,051	0° 31'
3C	0,2	49,96	0,034	49,72	0,044	0° 43'
5A	1	49,89	0,032	49,57	0,028	0° 27'



Obr. 53. Kuželovitost v závislosti na změně výkonu.

Výsledky měření kuželovitosti u daných materiálu při řezání různými výkony zařízení dokazují změnu kuželovitosti v závislosti na této hodnotě. U nelegované konstrukční uhlíkové oceli dochází k poklesu kuželovitosti se zvyšujícím se výkonem laserového zařízení. U ma-

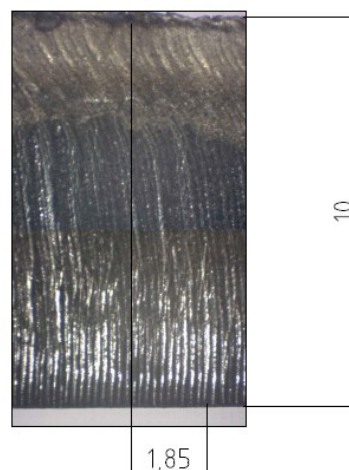
teriiálu dvojnásobné tloušťky byla dosažena přibližně dvojnásobná kuželovitost řezné plochy. U oceli korozivzdorné nebyl prokázán zvýšený vliv výkonu na kuželovitost. Vzhledem k používaným výkonům pro danou tloušťku materiálu v praxi, to tento fakt potvrzuje.

Tab. 13. Změna výkonu.

Vzorek	Výkon [W]	Délka vstupní hrany [mm]	Sm. odchylka [mm]	Délka výstupní hrany [mm]	Sm. odchylka [mm]	Úhel kuželovitosti [°]
2A	3000	49,84	0,015	49,78	0,010	0° 10'
2B	2000	49,87	0,009	49,79	0,012	0° 13'
2C	1000	49,98	0,023	49,74	0,037	0° 41'
4A	3000	49,83	0,033	49,75	0,017	0° 12'
4B	3500	49,82	0,032	49,75	0,025	0° 11'
4C	4000	49,85	0,018	49,77	0,010	0° 12'

### 7.3 Měření skluzu

Pro určení hodnot skluzu byly vybrány vzorky se značným rýhováním na řezné ploše. Pro vyhodnocení byl využit software AutoCAD 2017.



Obr. 54. 2C.





*Obr. 55. 5A.*



*Obr. 56. 3A.*

Tab. 14. Skluz.

Vzorek	Skluz [mm]
11 375 – 2C	1,85
17 240 – 3A	0,32
11 375 – 5A	0,61

Výsledky predikují zvýšenou hodnotu skluzu při řezání materiálu nižšími výkony zařízení. Toto je způsobeno odchylováním paprsku od své osy. Parametr skluzu je částečně parametrem kontrolním, jedná se sice o parametr druhořadý, avšak značná velikost skluzu poukazuje na nevhodně nastavené procesní podmínky. Vzhledem k nespojitému rýhování na řezných plochách zbylých vzorků, nebylo možné hodnoty skluzu porovnat mezi vzorky dělenými podobnými řeznými podmínkami.

#### 7.4 Měření mikrotvrdomosti

Pro měření mikrotvrdomosti byl využit fotomikroskop Neophot. Měření bylo provedeno na ploše kolmé k řezné ploše, vzdálenost vpichů byla odečítána pomocí posuvného stolu. Použité zařízení je certifikováno pro všechny ocelové materiály. Pro samotné měření tvrdosti materiálu s rostoucí vzdáleností od řezné spáry bylo nutno zjistit tvrdost tepelně neovlivněného materiálu. Vzhledem k předpokládanému rychlejšímu poklesu tvrdosti materiálu s rostoucí vzdáleností od řezné spáry, byl zvýšen počet vpichů ve vzdálenosti do 0,3 mm od řezné hrany, největší měřená vzdálenost od řezné spáry byla 6,6 mm. Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 14577-1.

Parametry měření:

Maximální zatížení – 1 N,

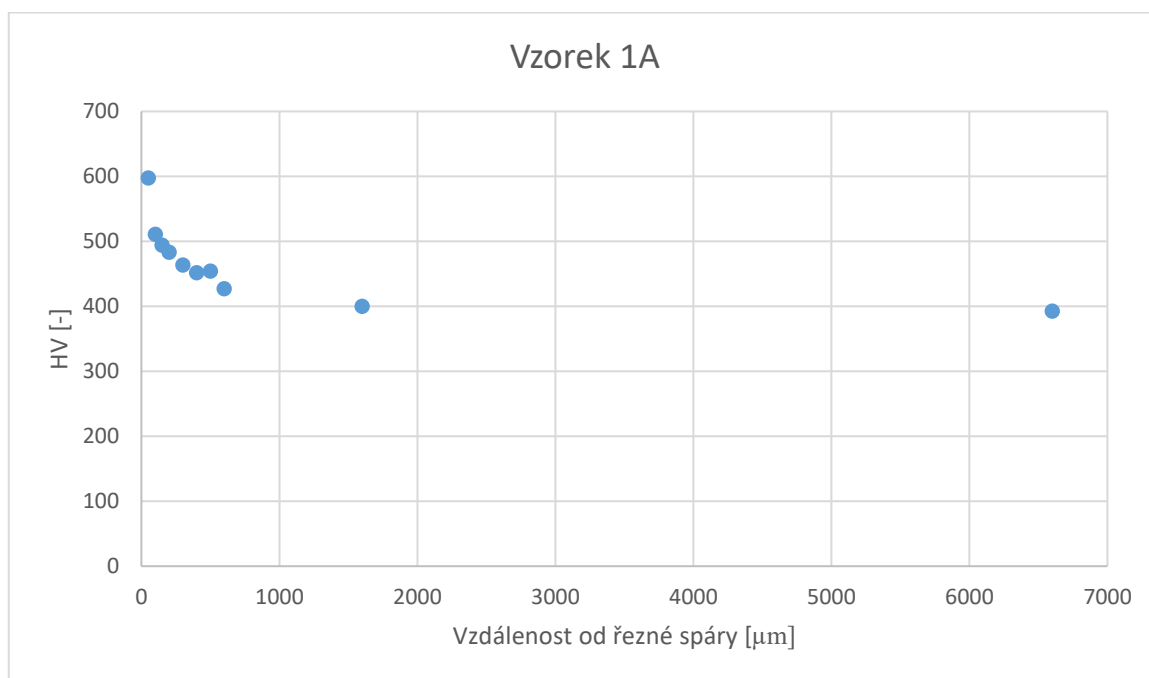
Rychlost zatížení – 2 N/min,

Rychlost odlehčení – 2 N/min,

Prodleva mezi měřeními – 10 s.

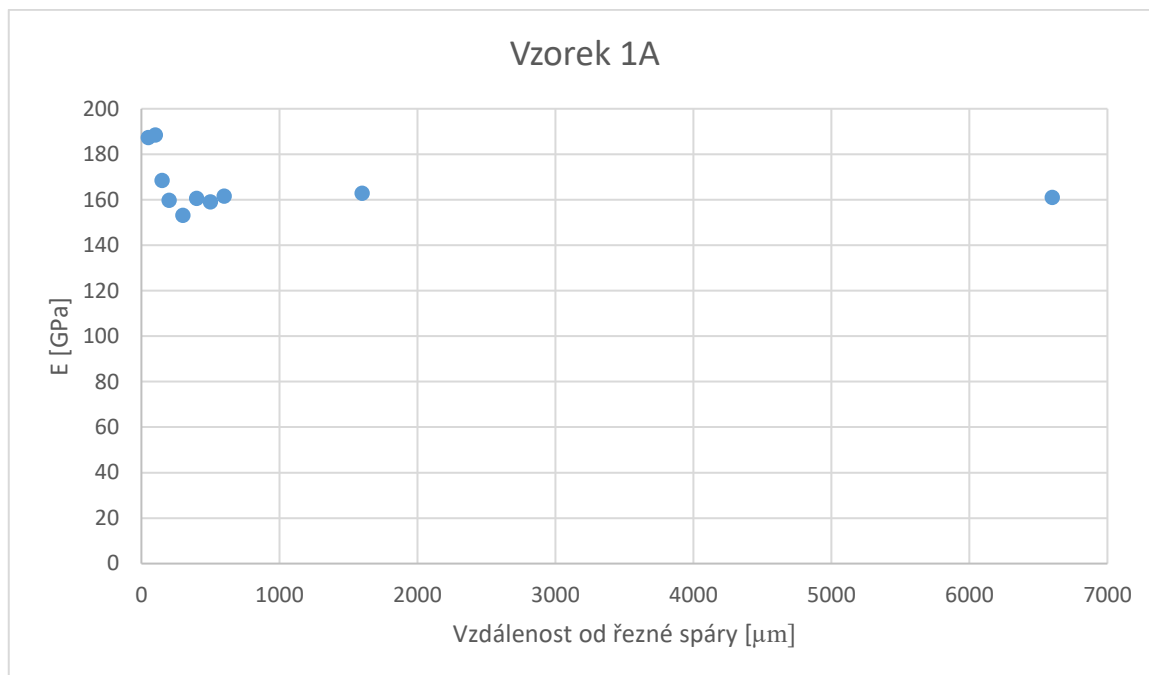


Obr. 57. Fotomikroskop Neophot.

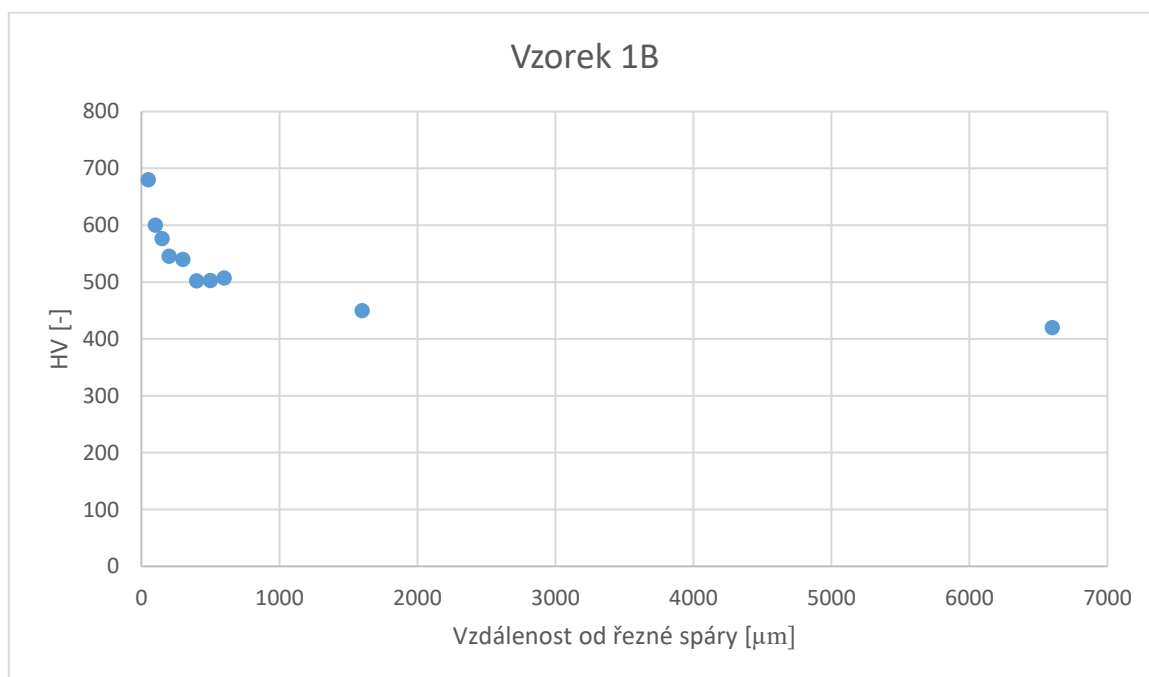


Obr. 58. Vzorek 1A – HV.

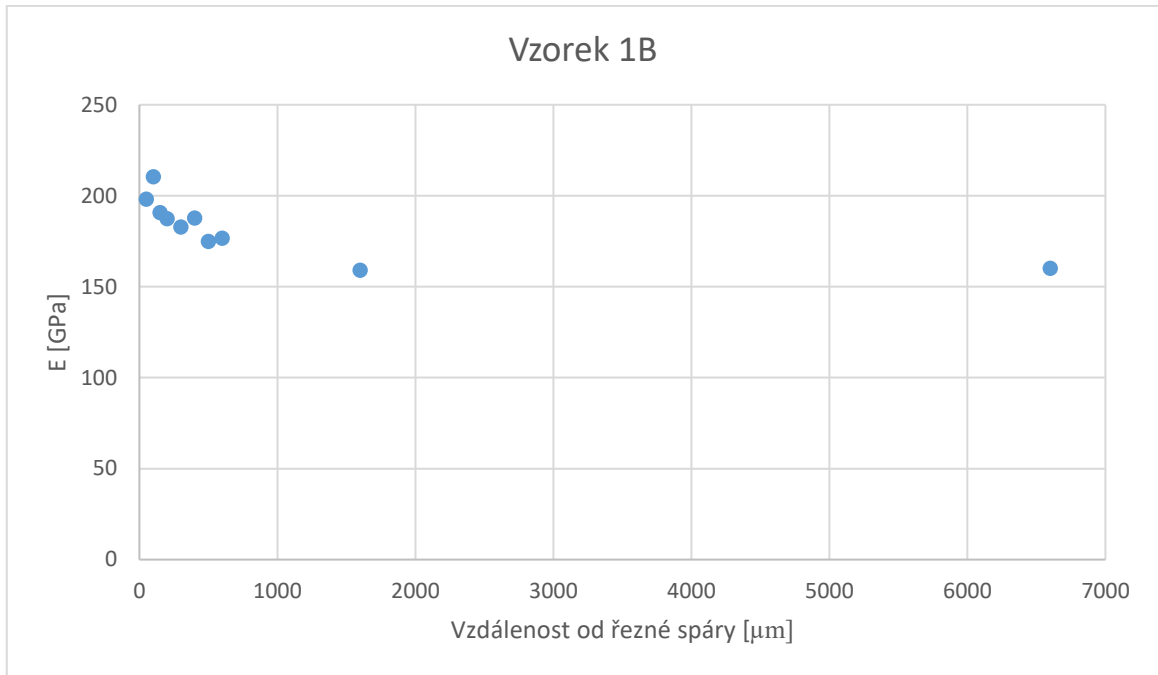




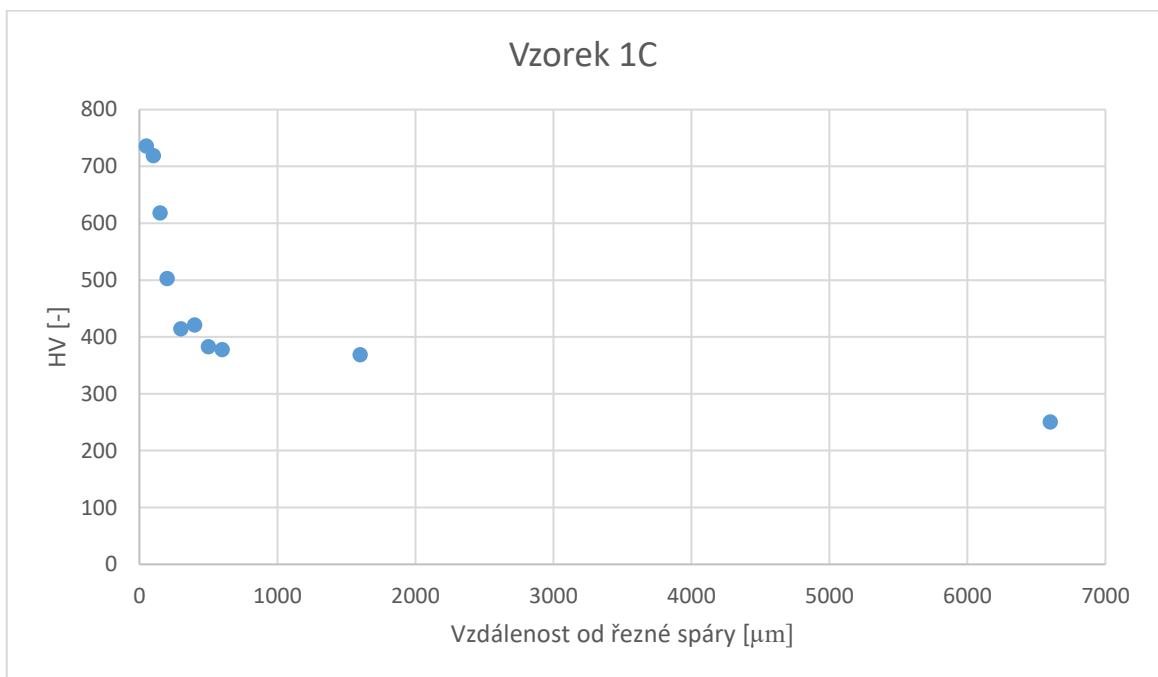
Obr. 59. Vzorek 1A – E.



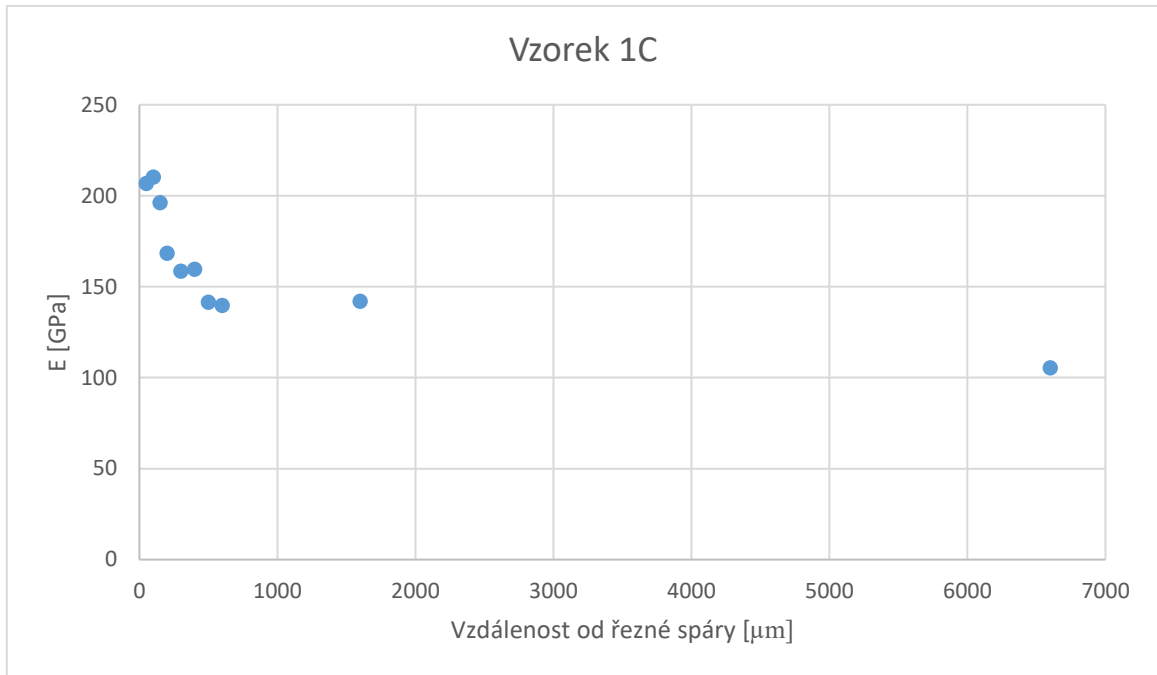
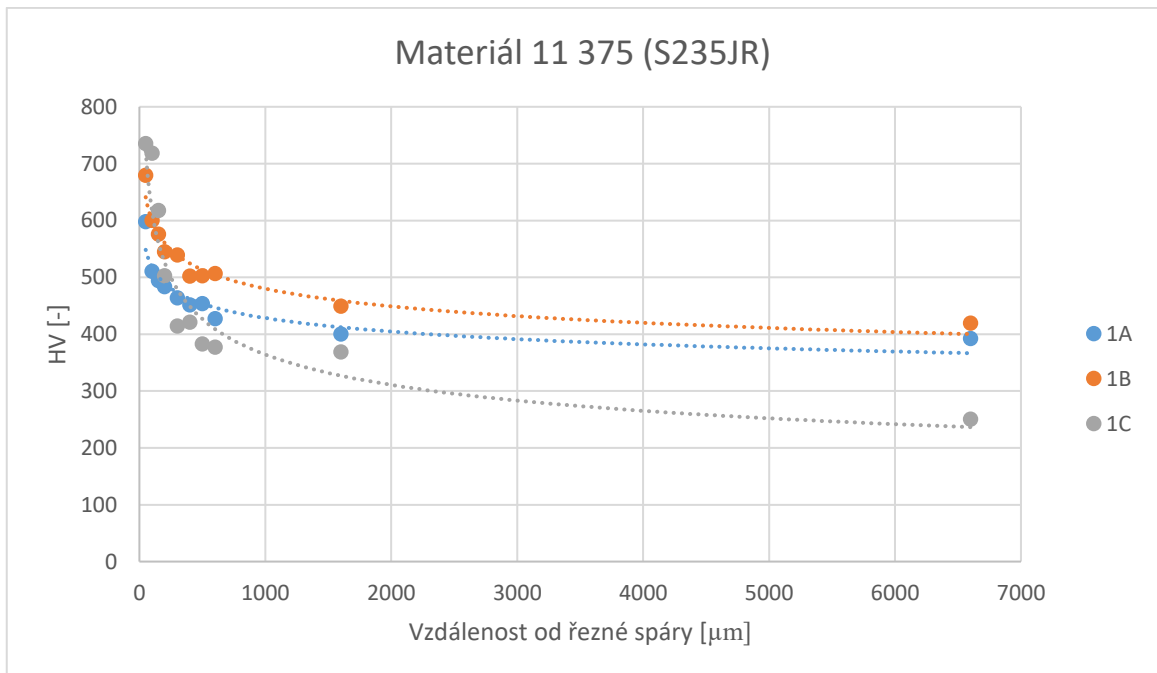
Obr. 60. Vzorek 1B – HV.



Obr. 61. Vzorek 1B – E.

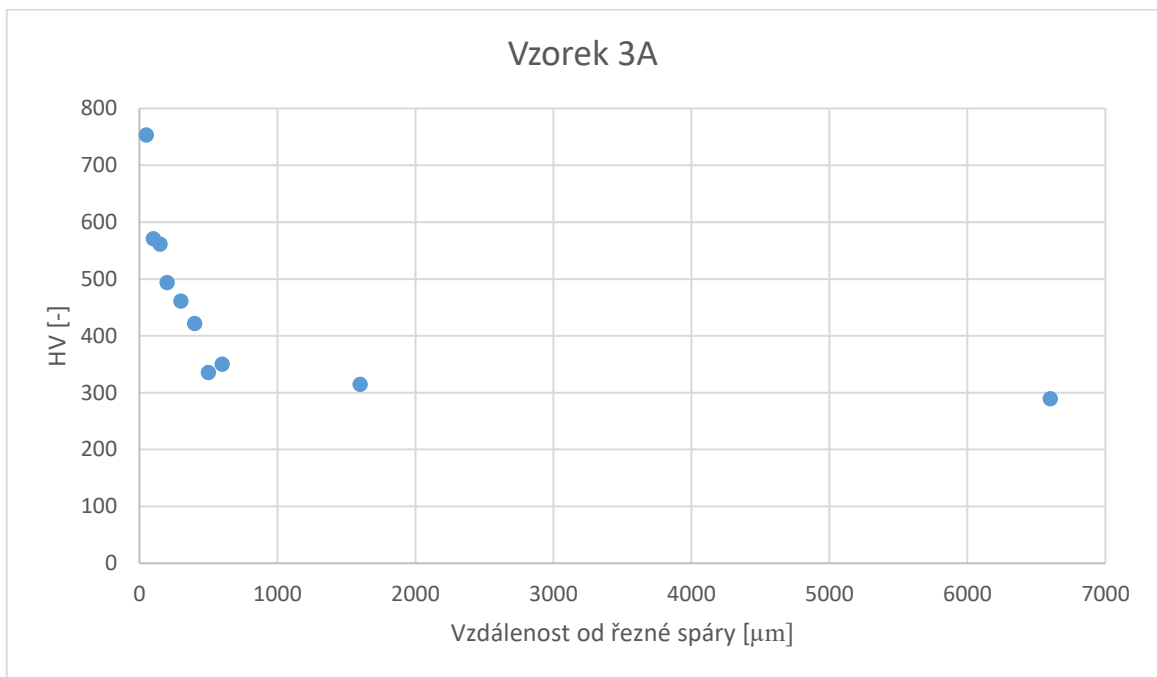


Obr. 62. Vzorek 1C – HV.

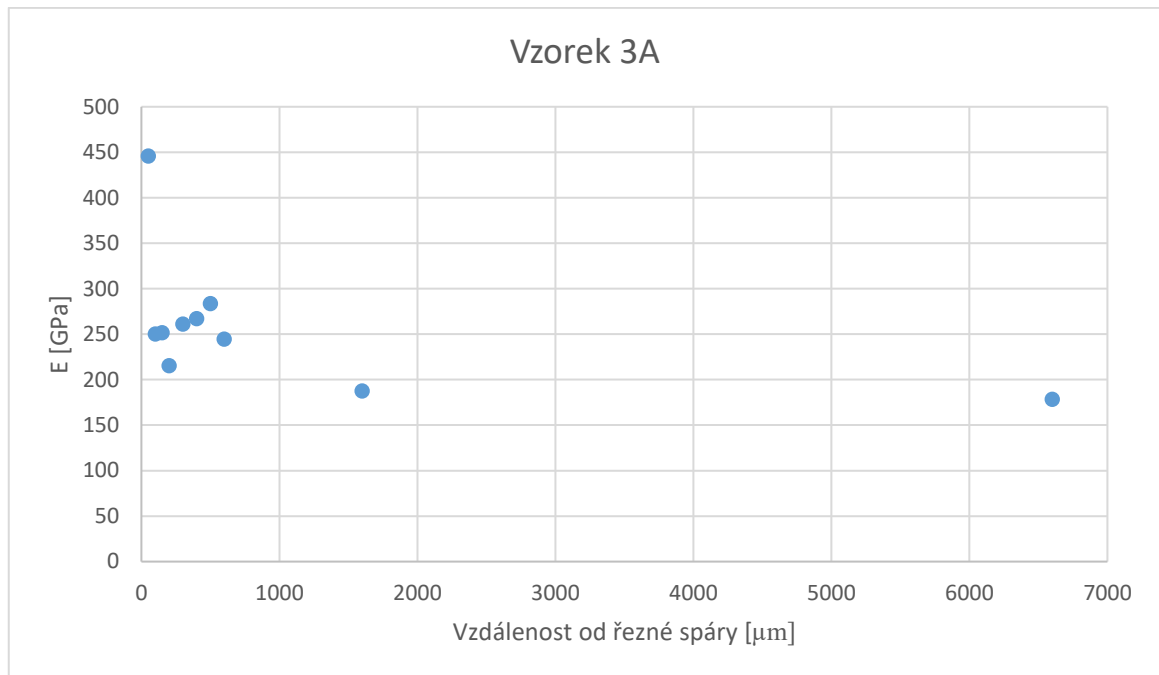
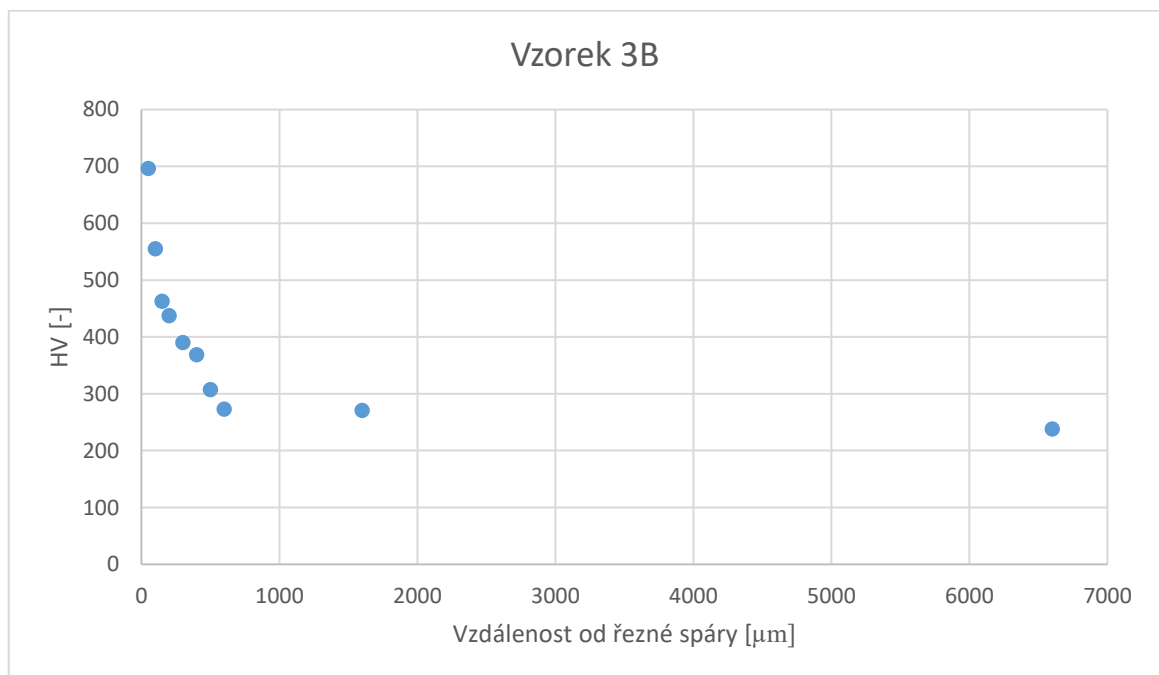
*Obr. 63. Vzorek 1C – E.**Obr. 64. 11 375 – HV.*

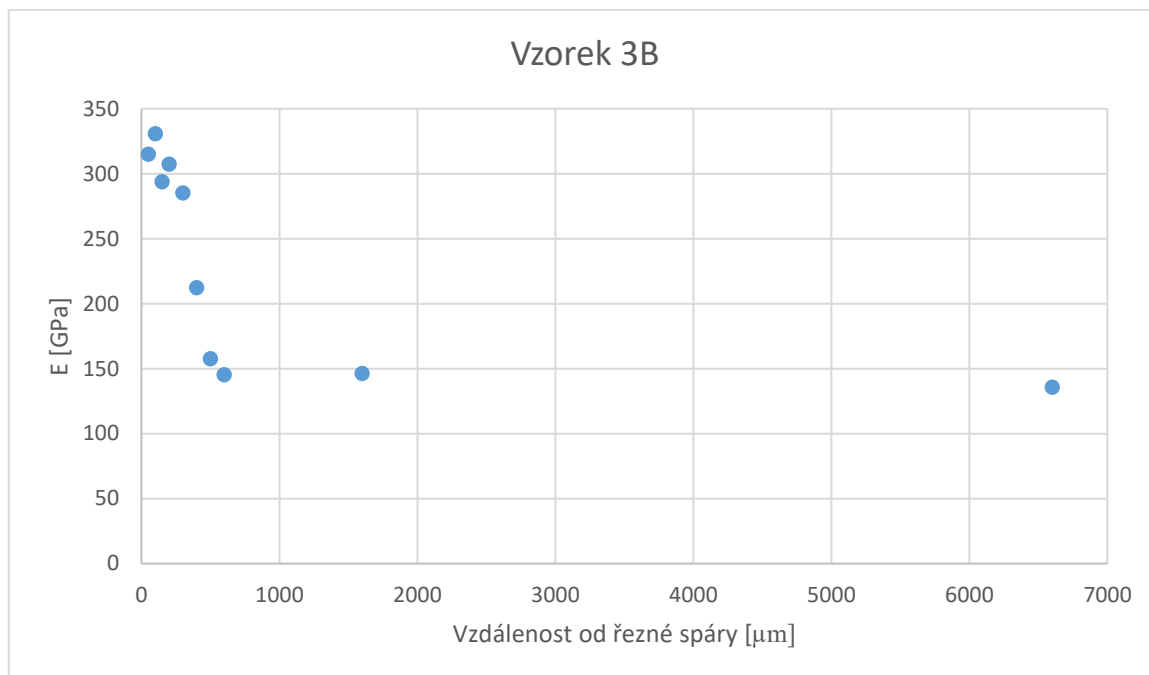
Dané měření prokázalo měnící se vlastnosti materiálu způsobené tepelným ovlivněním při absorpci energie laserového paprsku. U všech vzorků byl trend podobný – zpočátku strmý pokles s následným zvolněním. Tepelně ovlivněná oblast dosahuje vzdálenosti 1,6 mm od řezné spáry. Po zjištění průběhu teplotního pole (kap. 7.5) byla tato vzdálenost potvrzena. U

nelegované uhlíkové konstrukční oceli byla naměřena téměř dvojnásobná hodnota tvrdosti HV oproti tvrdosti neovlivněného materiálu. Nejvyšší tvrdost materiálu byla naměřena u vzorku s nejnižší použitou posuvovou rychlostí, kdy byla nejdelší doba interakce paprsek – obrobek. Tato hodnota 735,6 HV odpovídá přibližně 60 HRc. U tohoto vzorku byl také pozorován nejrychlejší pokles tvrdosti se vzdáleností od řezné spáry, tepelná energie přenášená principem vedení v materiálu byla ve spojitosti s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti akumulována v materiálu a tímto bylo zabráněno rychlejšímu ochlazení materiálu z vyšší teploty, což se uskutečnilo pouze v blízkosti řezné spáry.

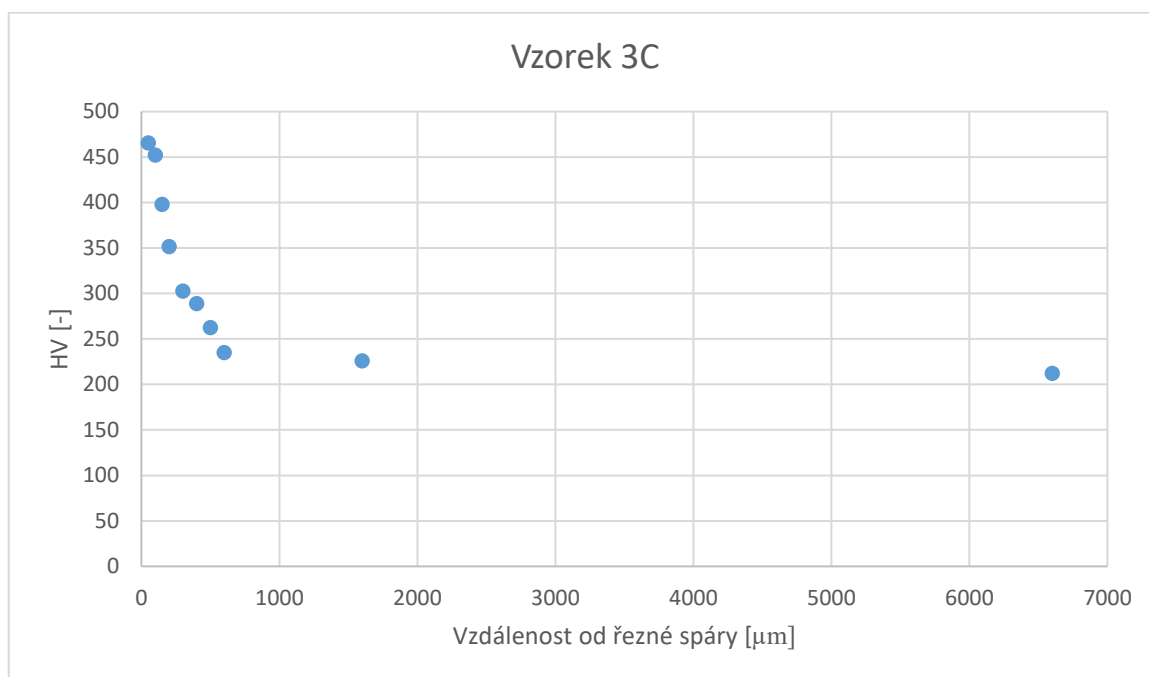


Obr. 65. Vzorek 3A – HV.

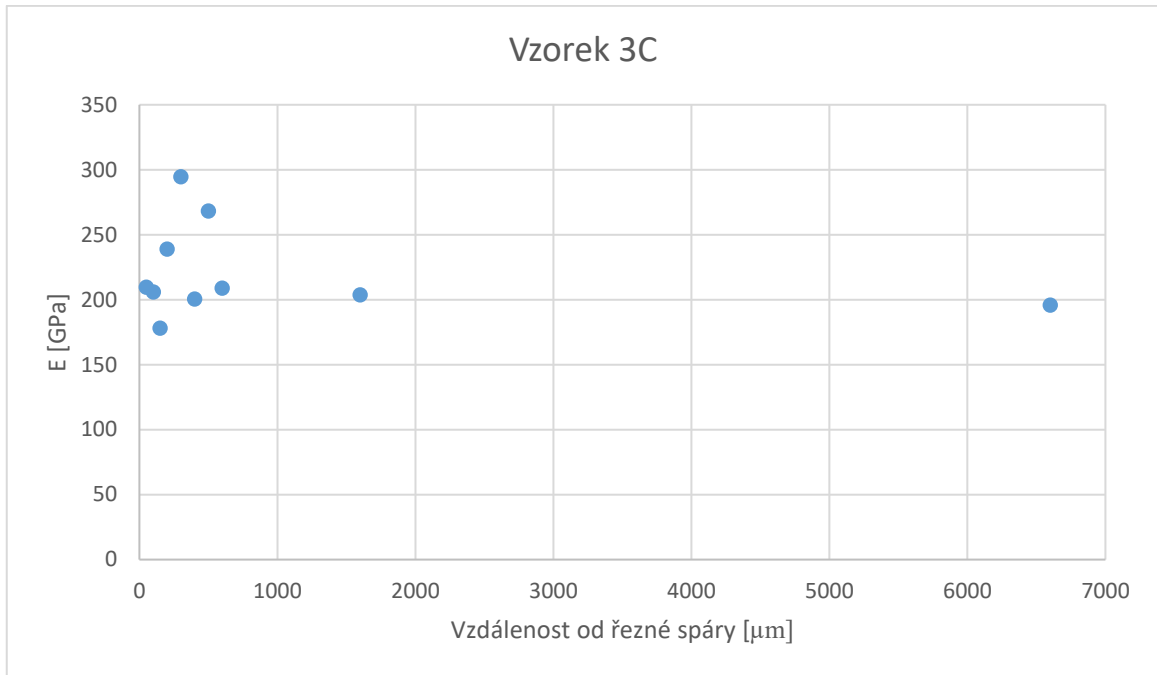
*Obr. 66. Vzorek 3A – E.**Obr. 67. Vzorek 3B – HV.*



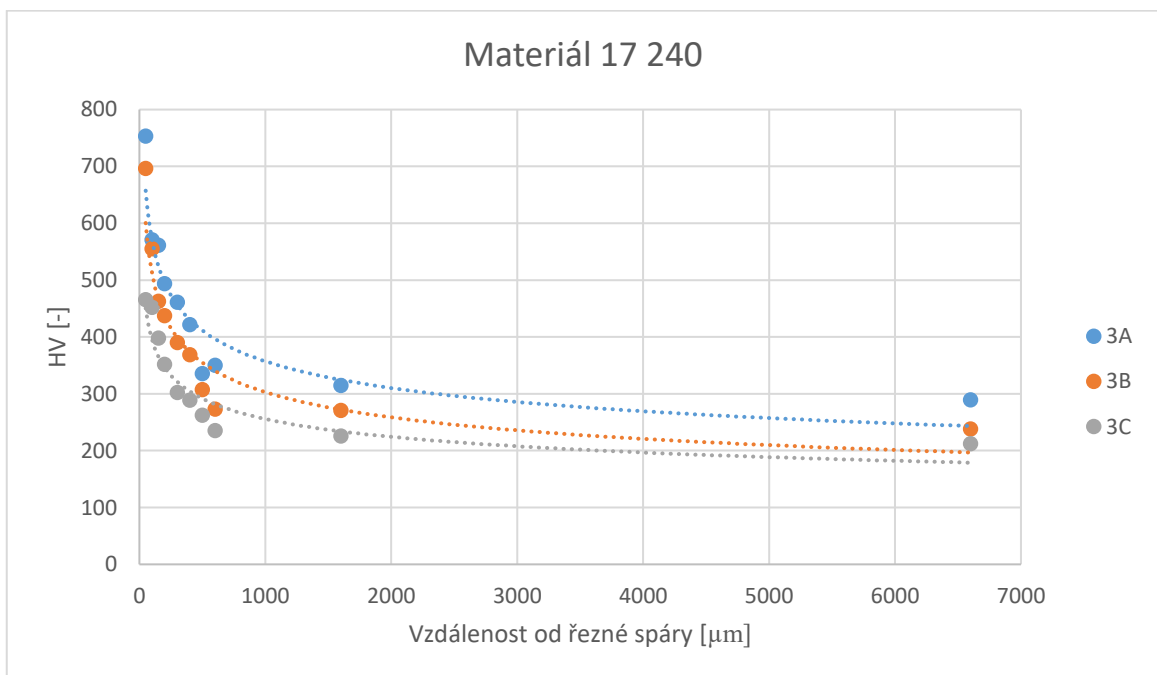
Obr. 68. Vzorek 3B –  $E$ .



Obr. 69. Vzorek 3C – HV.



Obr. 70. Vzorek 3C – E.



Obr. 71. 17 240 – HV.

Dané měření prokázalo měnící se vlastnosti materiálu způsobené tepelným ovlivněním při absorpci energie laserového paprsku. Teplota materiálu v blízkosti řezné spáry přesáhla teplotu austenitizace ( $A_{c3}$ ) a následně byla snížena. Nejvyšší teploty dosahovala oblast nejbližší řezné spáry, proto také následným ochlazením došlo k nejzřetelnějším strukturním změnám, s možným vznikem struktury martenzitické, bainitické nebo perlitické. Toto by bylo vhodné

prokázat pomocí mikroskopie na metalografickém výbrusu. Tepelně ovlivněná oblast dosahuje vzdálenosti 0,6 mm od řezné spáry. U korozivzdorné oceli byla naměřena až 2,5 násobná hodnota tvrdosti HV oproti tvrdosti neovlivněného materiálu. Maximální naměřená tvrdost 753 HV odpovídá přibližně 62 HRc. Hodnoty modulu pružnosti s rostoucí vzdáleností od řezné spáry mají klesající tendenci. Nejvyšší tvrdost byla naměřena u vzorku s nejvyšší použitou řeznou rychlostí. Tento fakt lze zdůvodnit nižší tepelnou vodivostí materiálu, kdy byla prudce zvýšena teplota materiálu v oblasti řezné spáry, ale vzhledem k chování materiálu, jež popisuje nižší součinitel tepelné vodivosti, nebylo teplo vedeno materiálem vyšší rychlostí do větší vzdálenosti a došlo ke strukturálním změnám v těsné blízkosti řezné spáry. Oproti materiálu 11 375 je vidět zmenšení velikosti TOO. Vzhledem k aspektům jako je výsledná tvrdost ovlivněného materiálu, obsah uhlíku, rychlost ochlazování, které bylo provedeno na vzduchu, je možné uvažovat, že oceli vykazují převážně perlitickou strukturu s malým množstvím martenzitu, který se objevuje v těsné oblasti místa řezu.

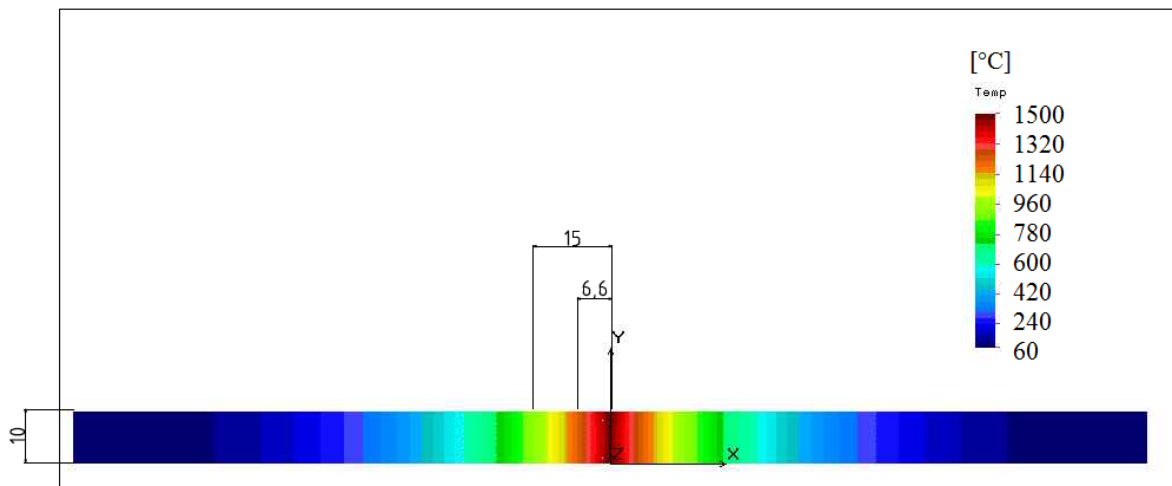
## 7.5 Teplotní pole

Pro potvrzení velikosti oblasti tepelného ovlivnění byl využit software COSMOS/M. Teplotní pole utváří obraz, kdy každému bodu je v daném okamžiku přiřazena určitá teplota. Pokud je teplota jednotlivých bodů závislá na čase, hovoříme o teplotním poli nestacionárním, v opačném případě jde o teplotní pole stacionární. Výsledek simulace teplotního pole úzce souvisí s předcházejícími výsledky měření mikrotvrdosti, jelikož v materiálu dochází ohřevem a následným ochlazením ke strukturálním změnám. Pro tuto simulaci byl využit matematický model sestavený na základě diplomové práce řešené v minulosti [30]. Tyto výsledky mohou také sloužit k porovnání, do jaké míry je možné uvažovat model teplotního pole vytvořený v konečněprvkovém softwaru za blízký reálnému stavu. Pro danou simulaci byly zadávány konstantní parametry uvedené v tab. 15 a tab. 16 [27].

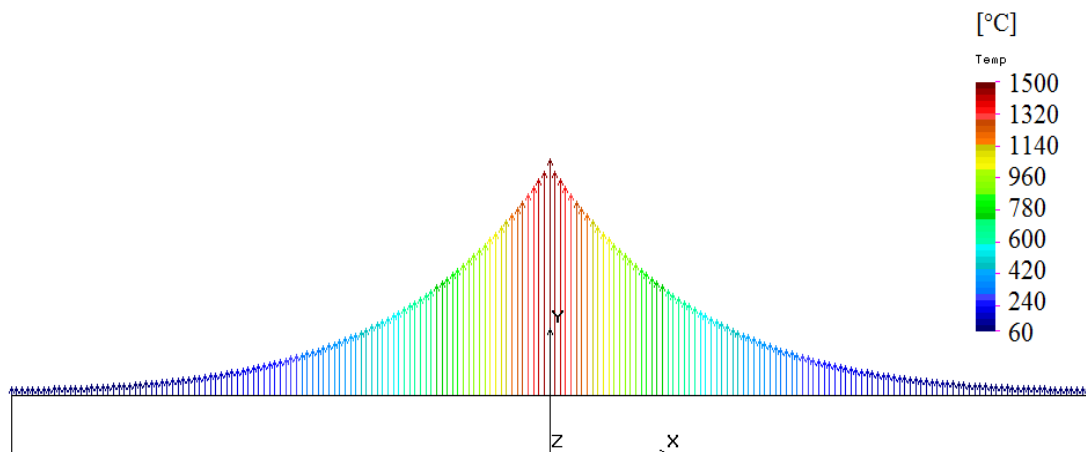
Tab. 15. Vlastnosti vzorku oceli 11 375 [15].

Veličina	Hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	55 W/m·K
Měrná tepelná kapacita	60 J/kg·K
Hustota materiálu	7850 kg/m <sup>3</sup>
Teplota tání	1490 °C





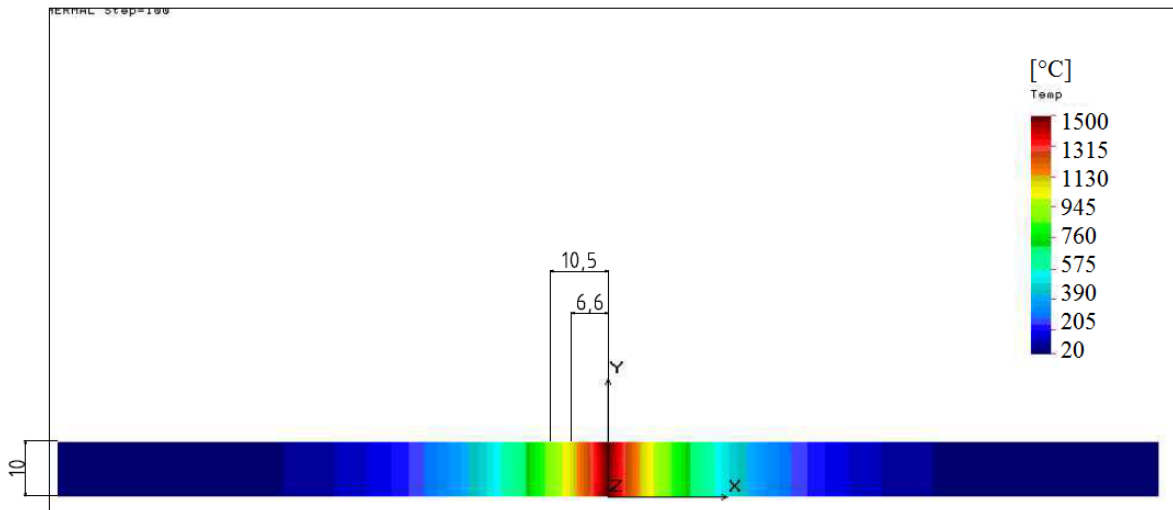
Obr. 72. Teplotní pole v průřezu vzorku oceli 11 375.



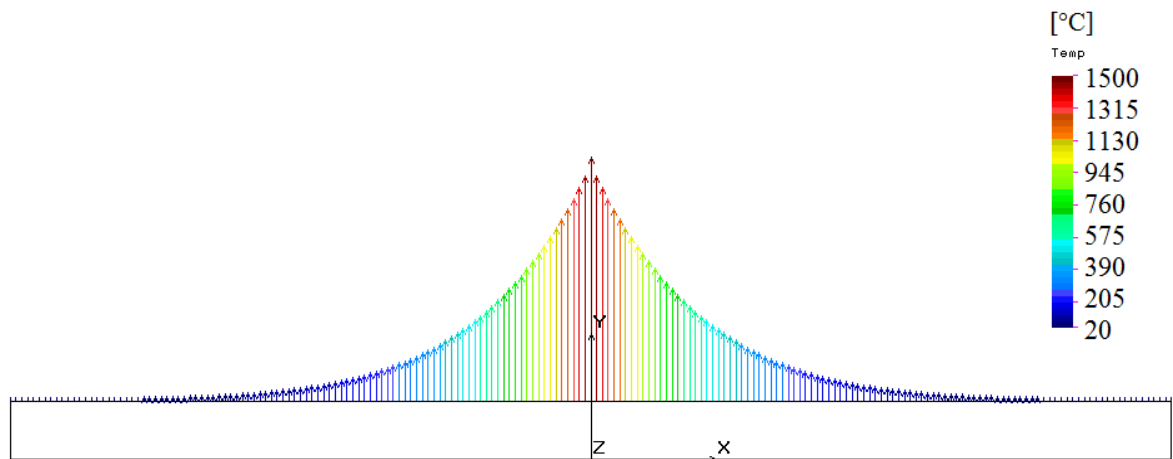
Obr. 73. Grafické zobrazení teplot – ocel 11 375.

Tab. 16. Vlastnosti vzorku oceli 17 240 [15].

Veličina	Hodnota
Součinitel tepelné vodivosti	25 W/m·K
Měrná tepelná kapacita	460 J/kg·K
Hustota materiálu	7900 kg/m <sup>3</sup>
Teplota tání	1510 °C



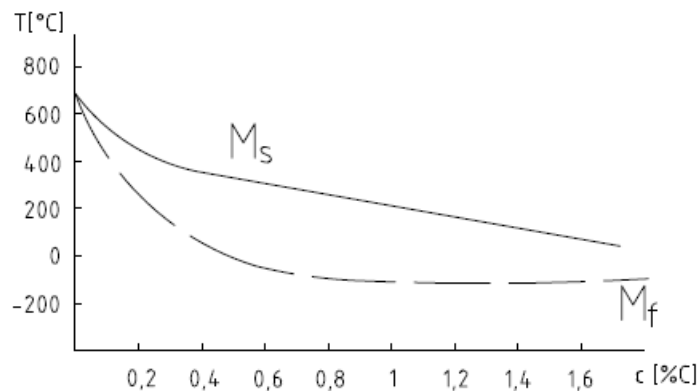
Obr. 74. Teplotní pole v průřezu vzorku oceli 17 240.



Obr. 75. Grafické zobrazení teplot – ocel 17 240.

Dle výsledku simulace teplotního pole při průchodu laserového paprsku materiálem je možné tvrdit, že k překročení teploty  $A_{c3}$  nutné pro strukturní přeměnu bylo dosaženo ve vzdálenosti 15 mm od řezné spáry u vzorku oceli 11 375, ve vzdálenosti 10,5 mm u vzorku oceli 17 240. Teplota austenitizace použitých materiálů se pohybuje nad hodnotou přibližně 900 °C. S ohledem na diagram Fe – Fe<sub>3</sub>C je za minimální teplotu přeměny možné uvažovat i teplotu  $A_{c1}$ , nicméně by došlo pouze k přeměně vzniklého austenitu, zbylý ferit by si zachoval svou původní měkkou strukturu. Pro dosažení co možná nejtvrďší struktury by bylo nutné dosáhnout teploty  $M_s$  až  $M_f$  (250 až 350 °C) v nejkratším možném čase, aby nebylo možné dopustit vznik struktur vykazujících nižší tvrdost. Nicméně hodnoty teplot počátku a konce martenzitické přeměny jsou pohyblivé v závislosti na materiálu. Na výsledném modelu lze také pozorovat vliv rozdílného součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ , průběh poklesu teploty se vzdáleností od řezné spáry je u korozivzdorné oceli výrazně strmější. Při srovnání se

získanými výsledky měření mikrotvrdoosti je možné uvažovat nízkou rychlost ochlazování, a proto vyšší hodnoty tvrdosti související se strukturálními změnami nezasahovaly do větších vzdáleností od řezné spáry. Taktéž eventuální mechanismus vzniku martenzitické substruktury se u různých druhů ocelí může lišit. Korozivzdorná ocel obsahující méně než 0,1 % C vykazuje substrukturu martenzitu, jako tzv. dislokační martenzit, kdy dochází k deformaci mřížky skluzem. Při rostoucím obsahu uhlíku vzniká tzv. dvojčatový martenzit, kdy dochází k deformaci dvojčatěním.



Obr. 76. Teplota martenzitické přeměny [13].

## 7.6 Měření drsnosti povrchu

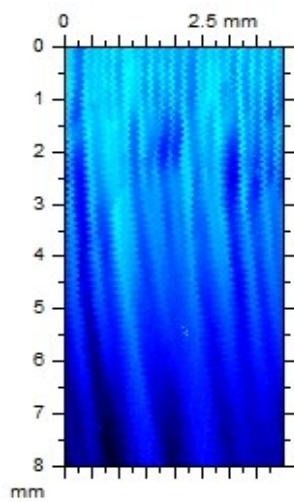
Pro měření jakosti povrchu bylo využito zařízení Taylor Hobson Talysurf CLI 500. Tento přístroj je vhodný pro všechny typy povrchů a materiálů. Povrch zaznamenává konfokální hlava s CLA sondou. Tento přístroj je přizpůsoben pro 3D měření. S dodávaným softwarem toto zařízení vytváří barevně odlišenou strukturu povrchu. Tento přístroj je vhodný pro provoz výroby vyrábějící méně rozměrné součásti [29].



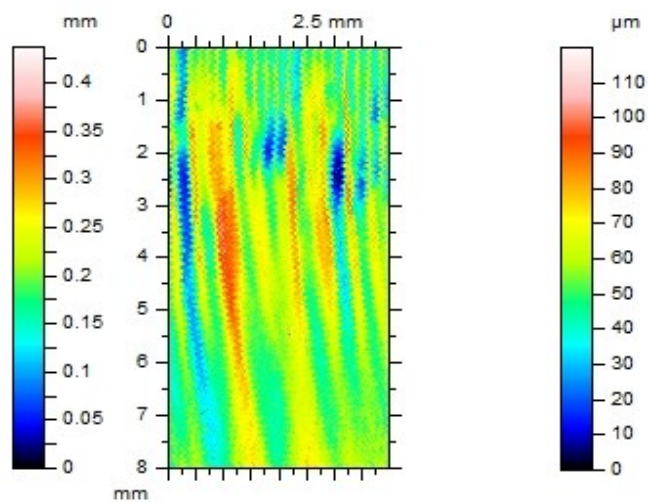
Obr. 77. Talysurf CLI 500 [28].

Tab. 17. Parametry přístroje [29].

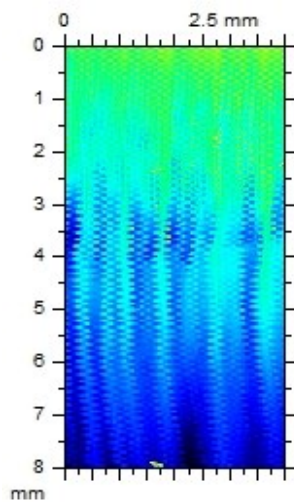
Pracovní prostor	50 x 50 x 50 mm
Osové rozlišení	0,5 $\mu\text{m}$
Nosnost pracovního stolu	10 kg
Celkové rozměry	500 x 310 x 450 mm
Rychlost měření	0,5; 1; 5; 10; 15; 30 mm/s



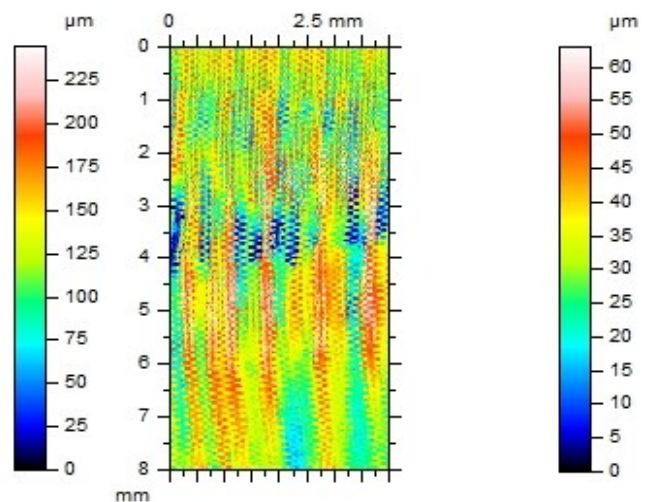
Obr. 78. Povrch 1A.



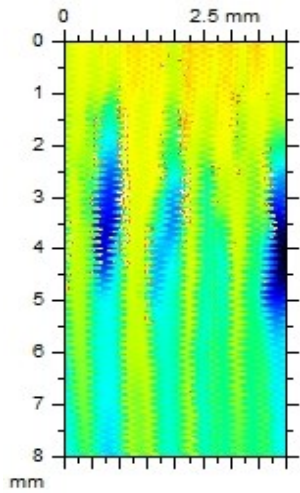
Obr. 79. Povrch 1A – drsnost + vlnitost.



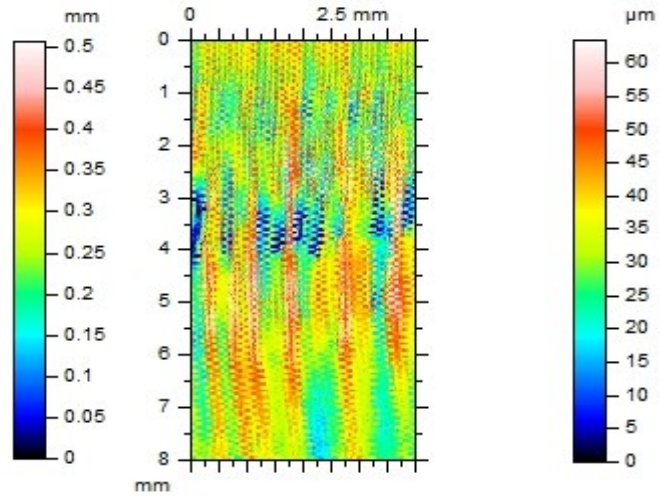
Obr. 80. Povrch 1B.



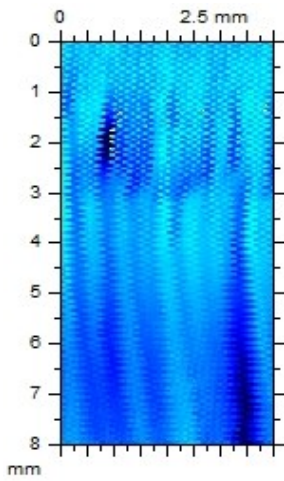
Obr. 81. Povrch 1B – drsnost + vlnitost.



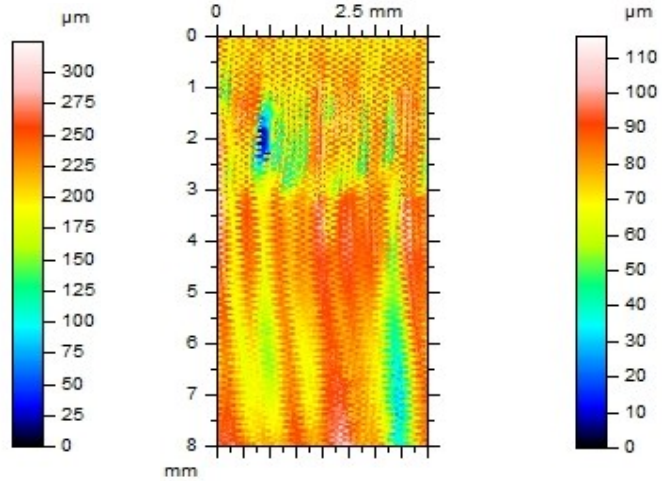
Obr. 82. Povrch 1C.



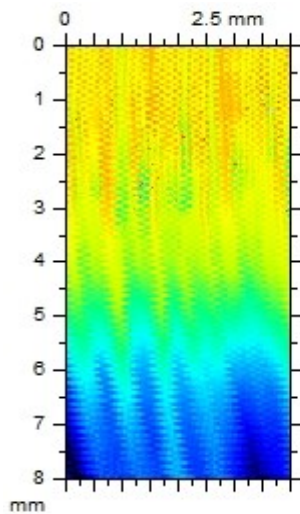
Obr. 83. Povrch 1C – drsnost + vlnitost.



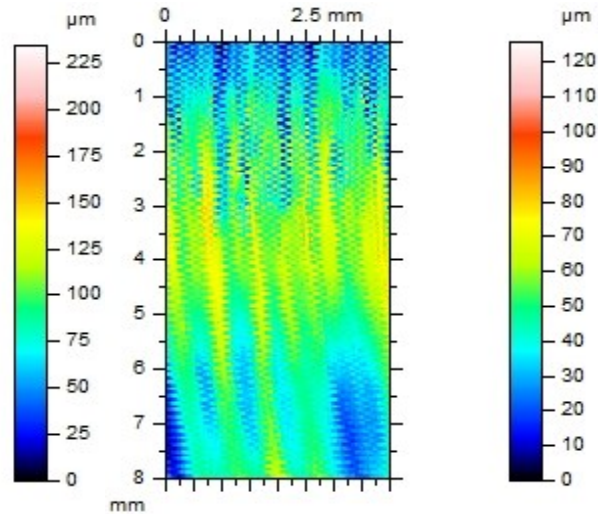
Obr. 84. Povrch 2A.



Obr. 85. Povrch 2A – drsnost + vlnitost.

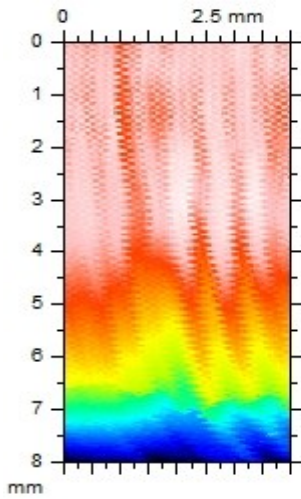


Obr. 86. Povrch 2B.

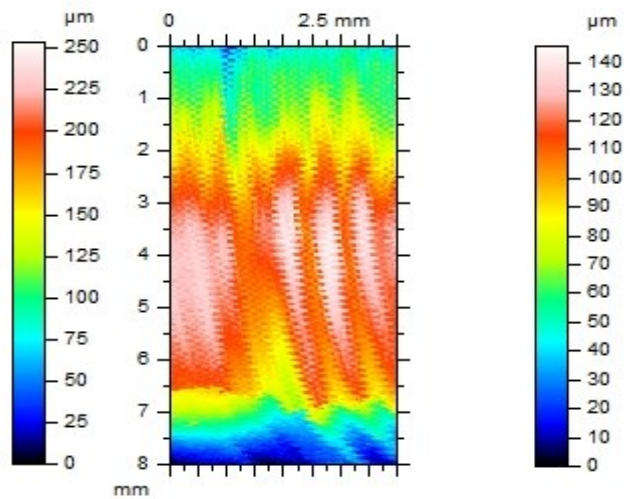


Obr. 87. Povrch 2B – drsnost + vlnitost.

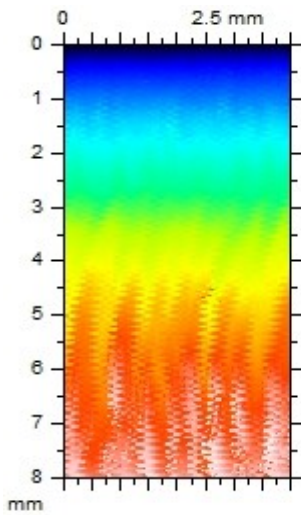




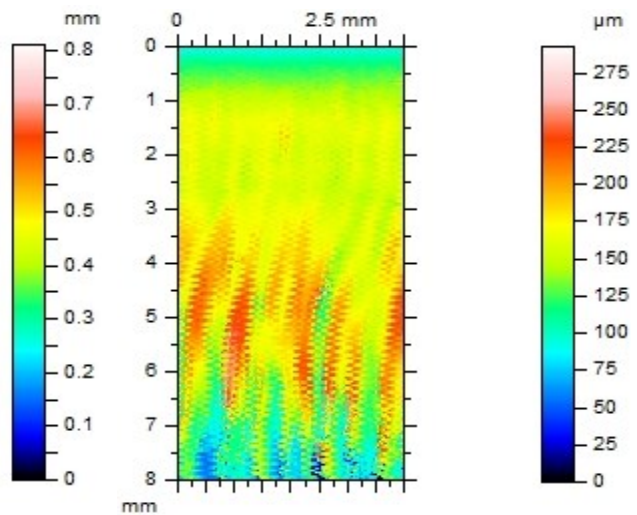
Obr. 88. Povrch 2C.



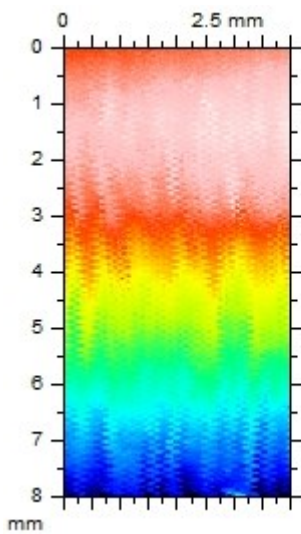
Obr. 89. Povrch 2C – drsnost + vlnitost



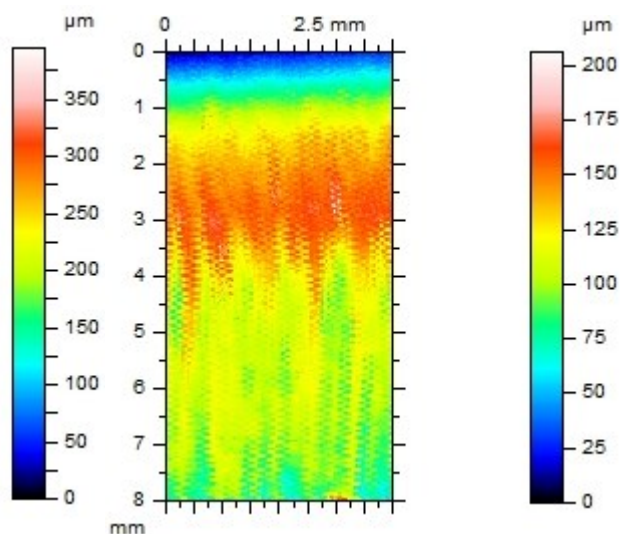
Obr. 90. Povrch 3A.



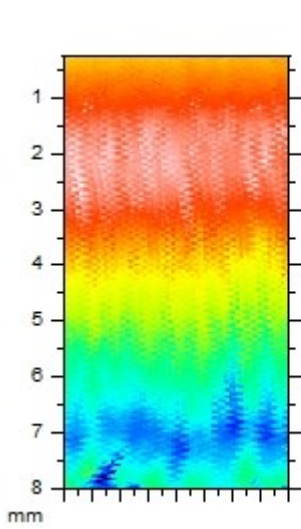
Obr. 91. Povrch 3A – drsnost + vlnitost.



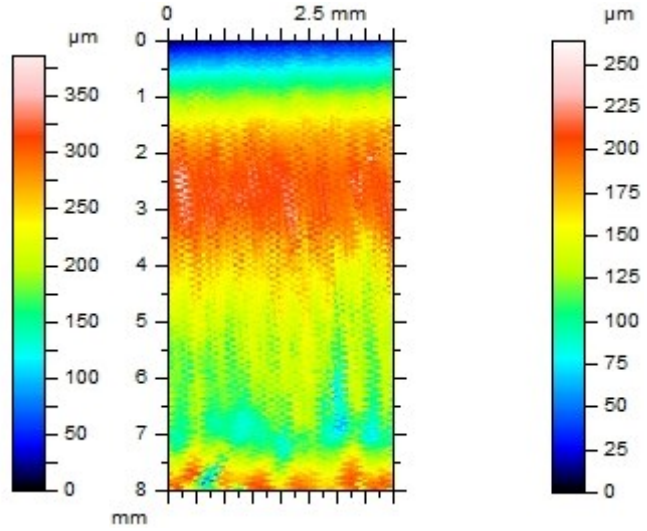
Obr. 92. Povrch 3B.



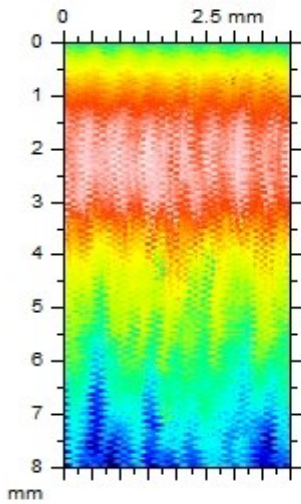
Obr. 93. Povrch 3B – drsnost + vlnitost.



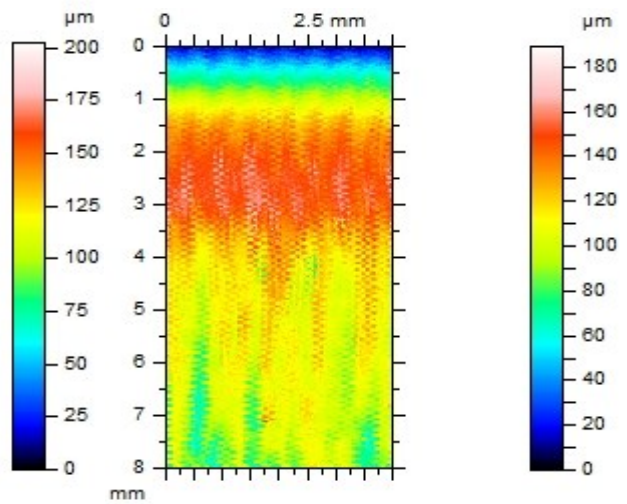
Obr. 94. Povrch 3C.



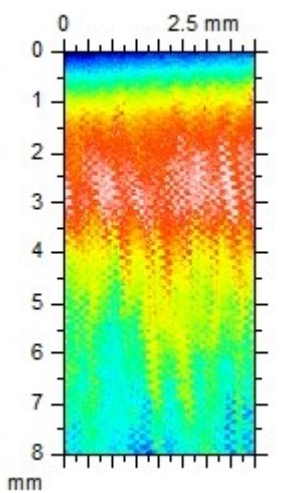
Obr. 95. Povrch 3C – drsnost + vlnitost.



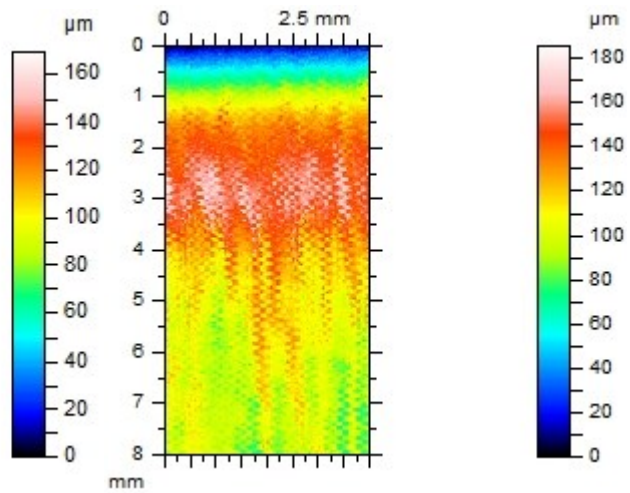
Obr. 96. Povrch 4A.



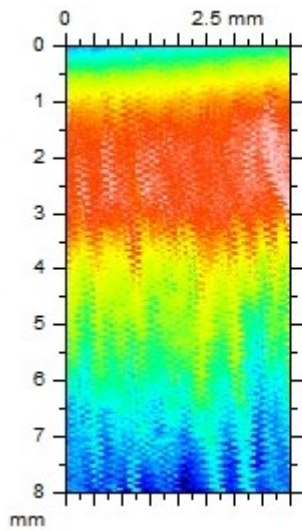
Obr. 97. Povrch 4A – drsnost + vlnitost.



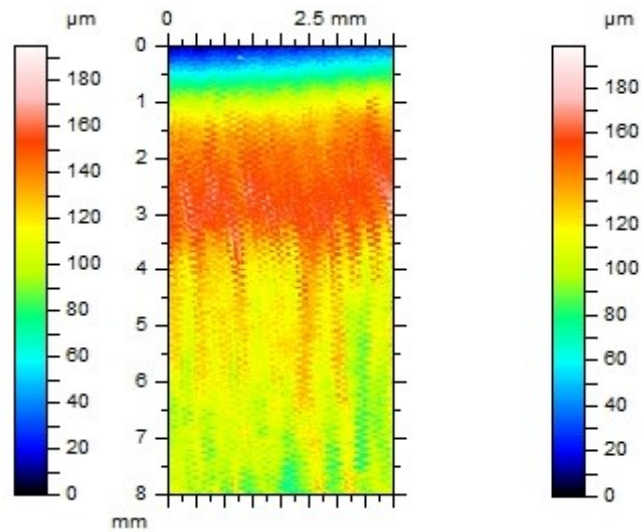
Obr. 98. Povrch 4B.



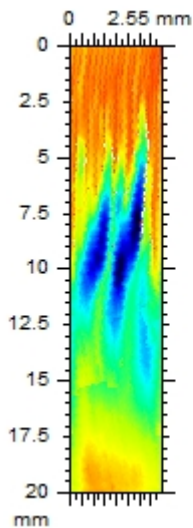
Obr. 99. Povrch 4B – drsnost + vlnitost.



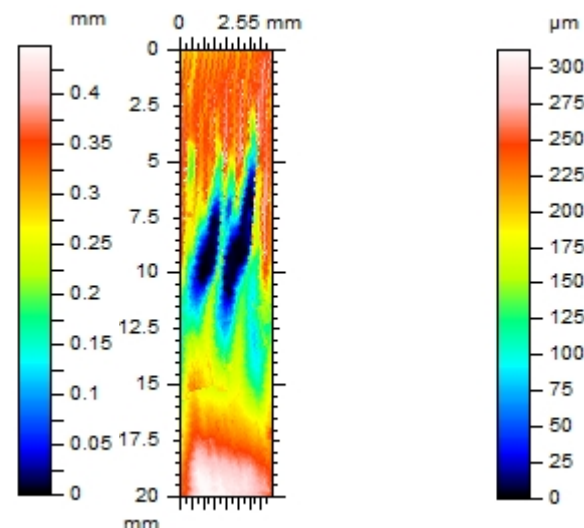
Obr. 100. Povrch 4C.



Obr. 101. Povrch 4C – drsnost + vlnitost.



Obr. 102. Povrch 5A.

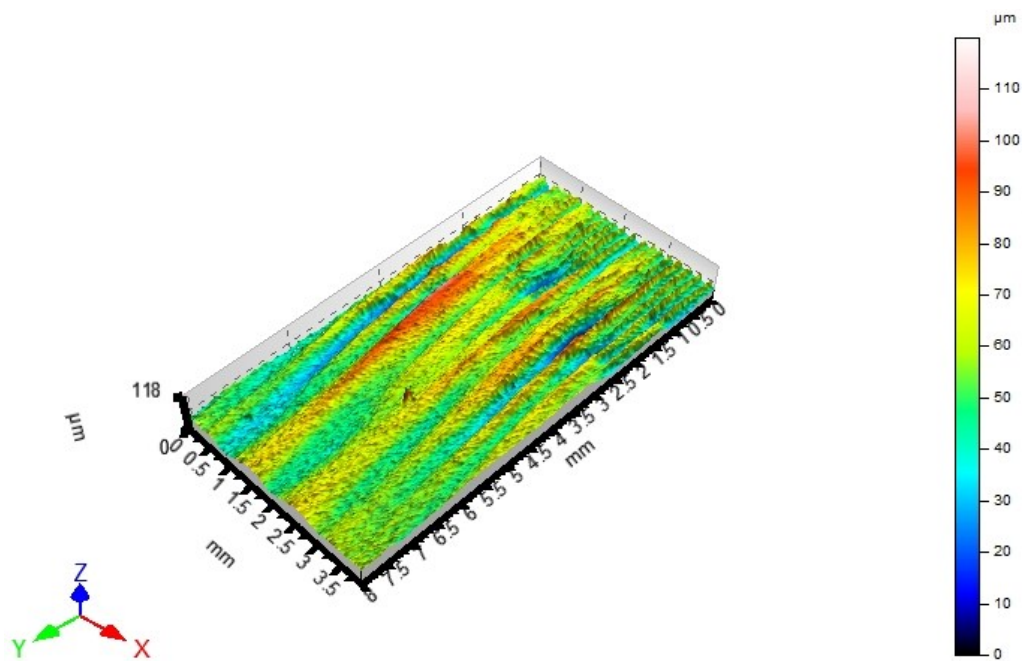


Obr. 103. Povrch 5A – drsnost + vlnitost.

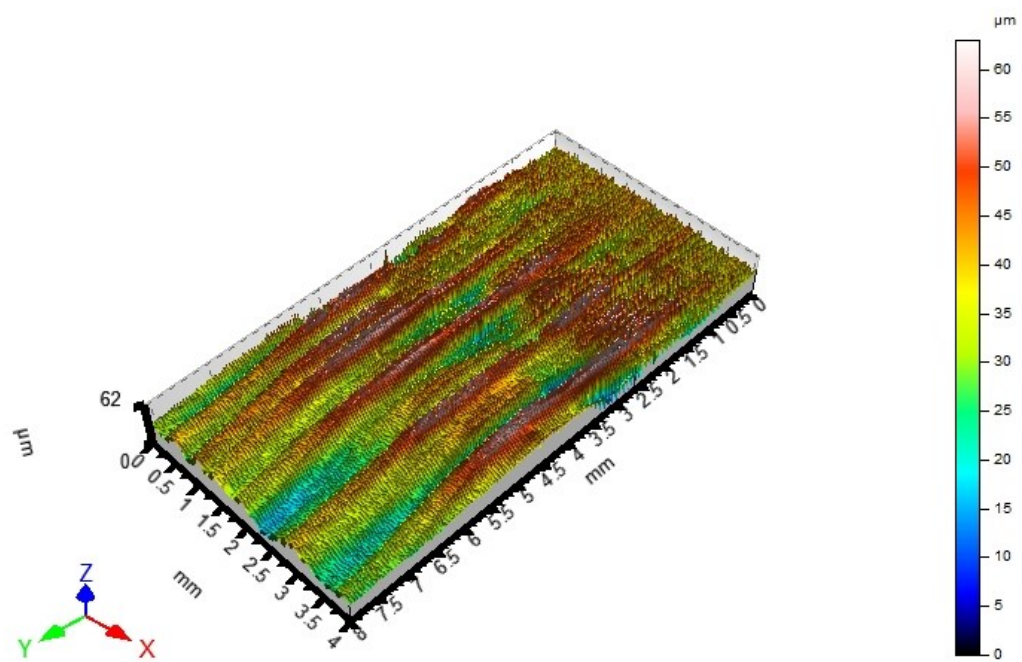
### 7.6.1 Prostorové zobrazení skenovaných povrchů

Cílem daného měření bylo potvrzení hypotézy, která poukazuje na tři stádia vznikající na řezné ploše vzorků. Tyto stádia jsou závislá na ztrátě energie paprsku během průchodu daným materiálem. Stádium vstupní, přechodové a výstupní, které se liší rýhováním na řezné ploše a objevuje se u všech paprskových metod dělení.

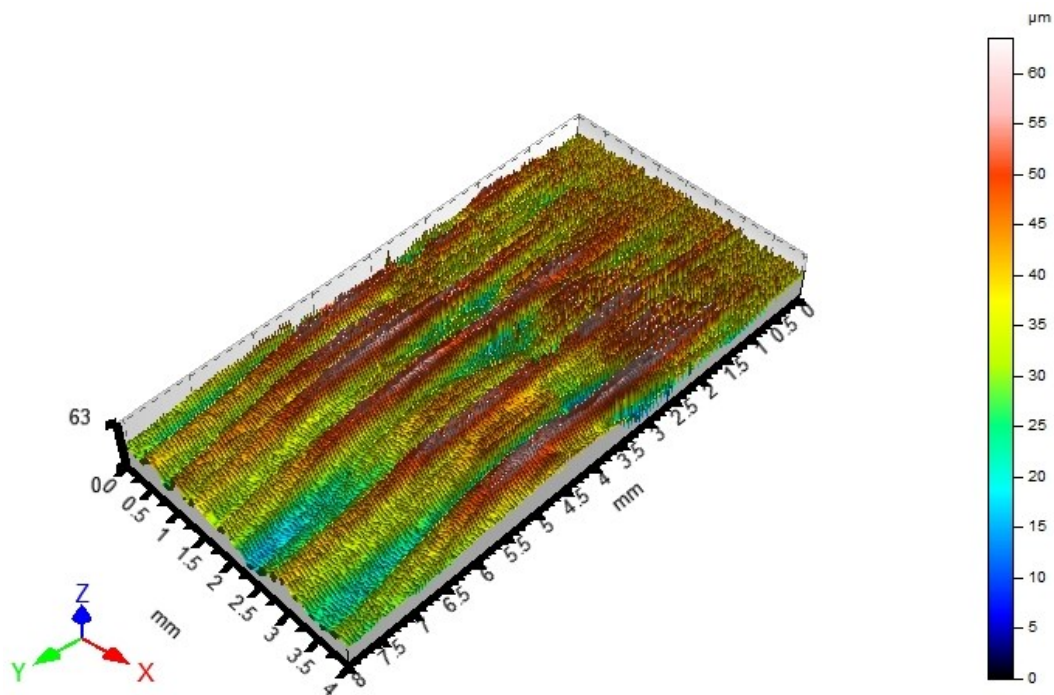




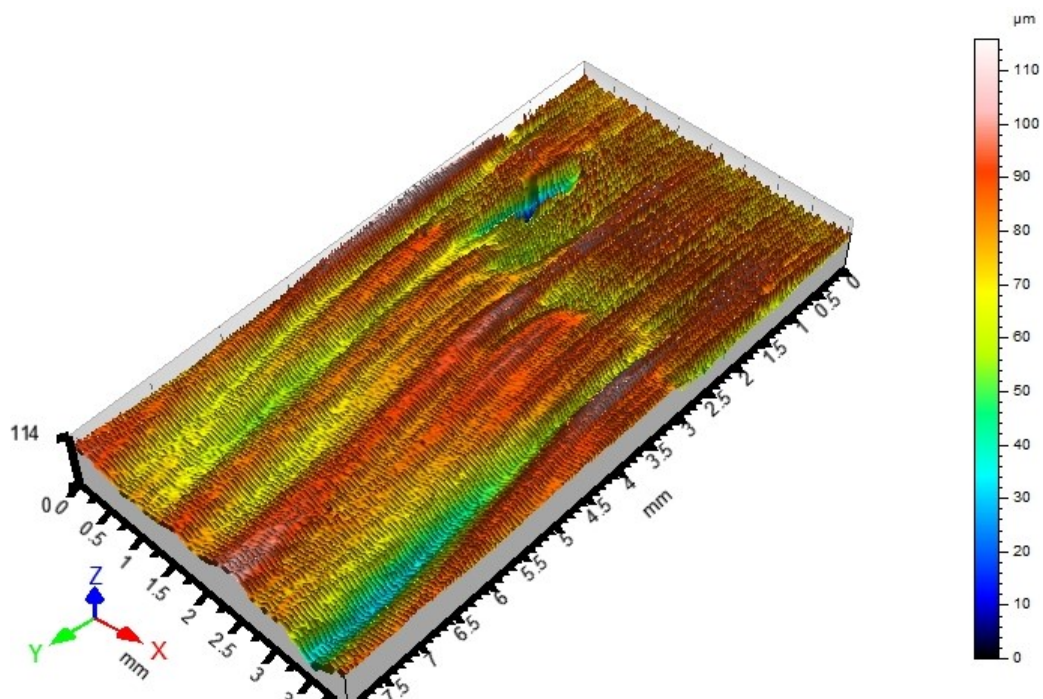
Obr. 104. Prostorový scan povrchu – vzorek 1A.



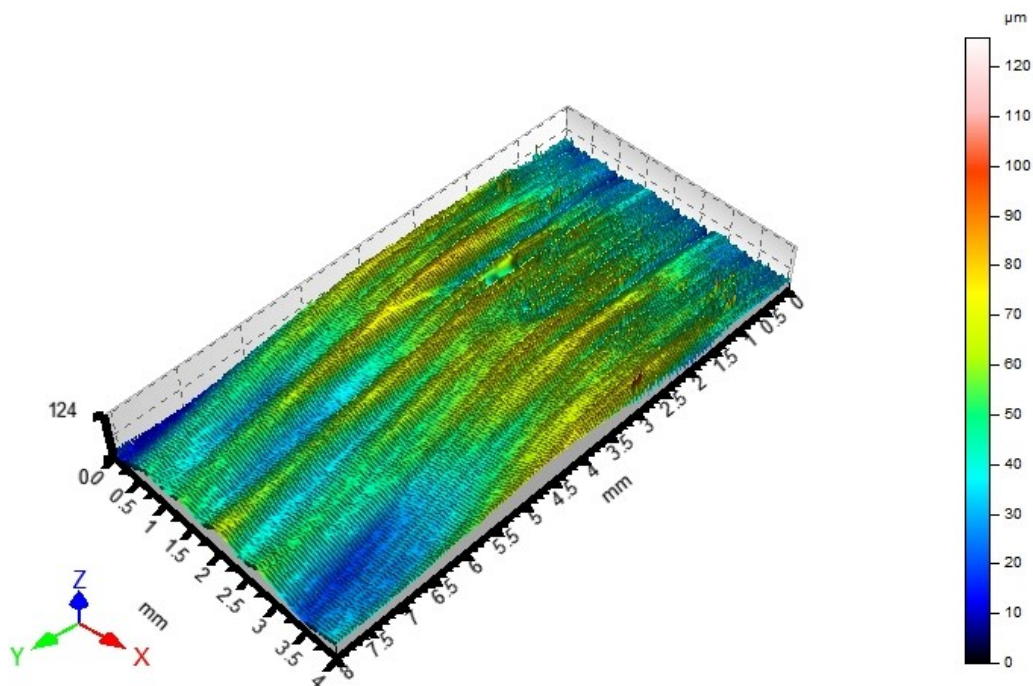
Obr. 105. Prostorový scan povrchu – vzorek 1B.



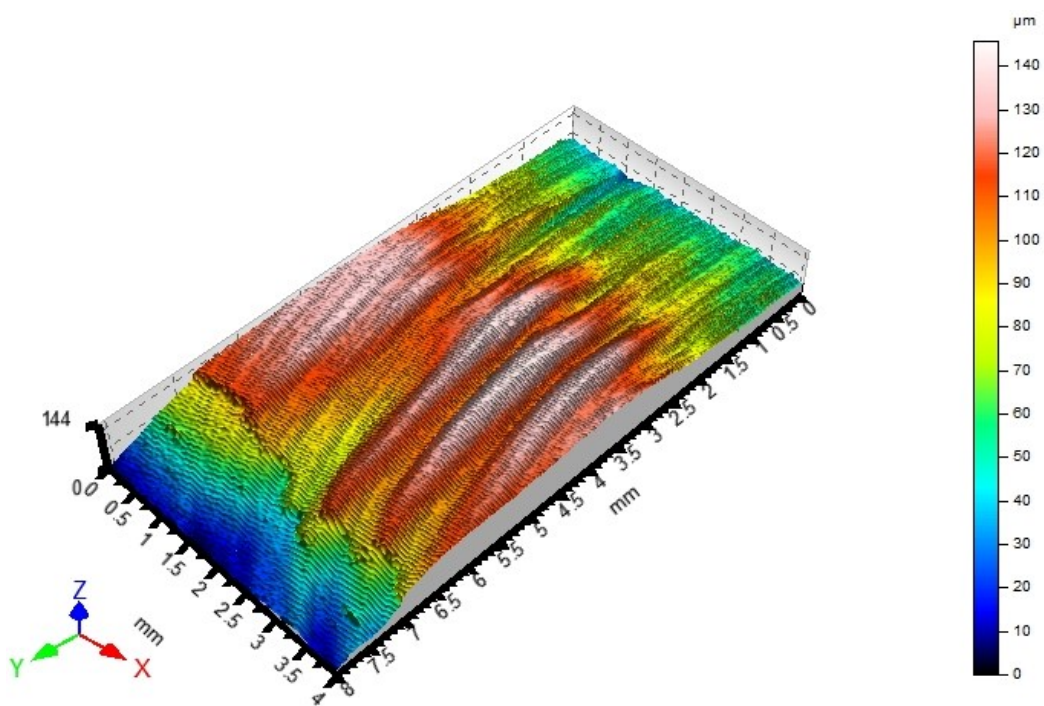
Obr. 106. Prostorový scan povrchu – vzorek 1C.



Obr. 107. Prostorový scan povrchu – vzorek 2A.

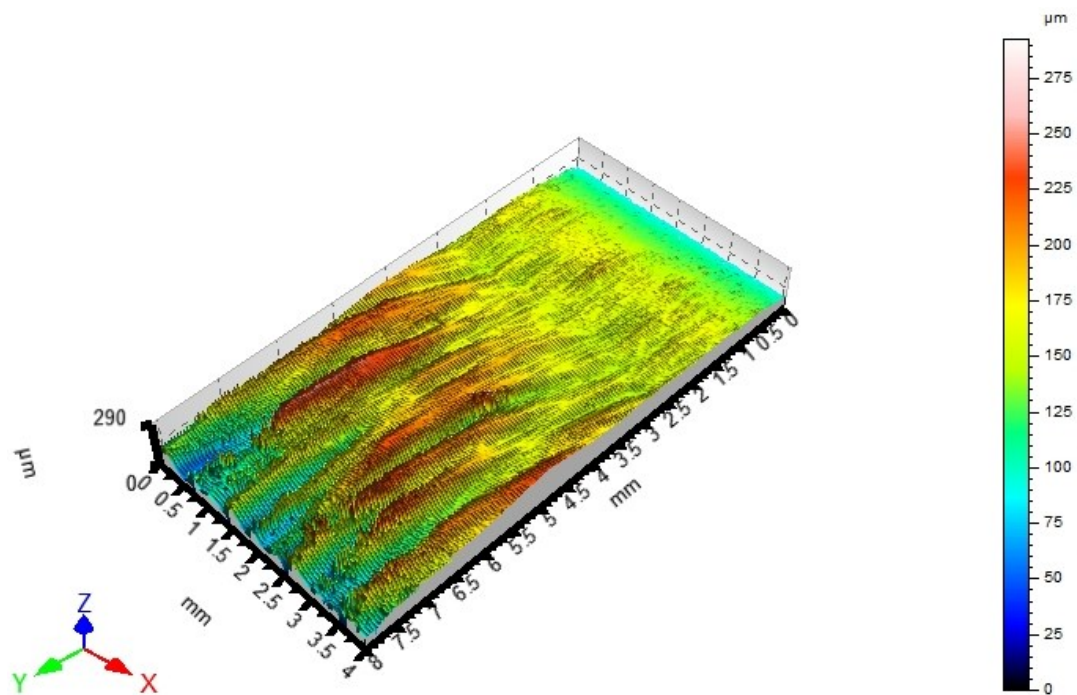


Obr. 108. Prostorový scan povrchu – vzorek 2B.

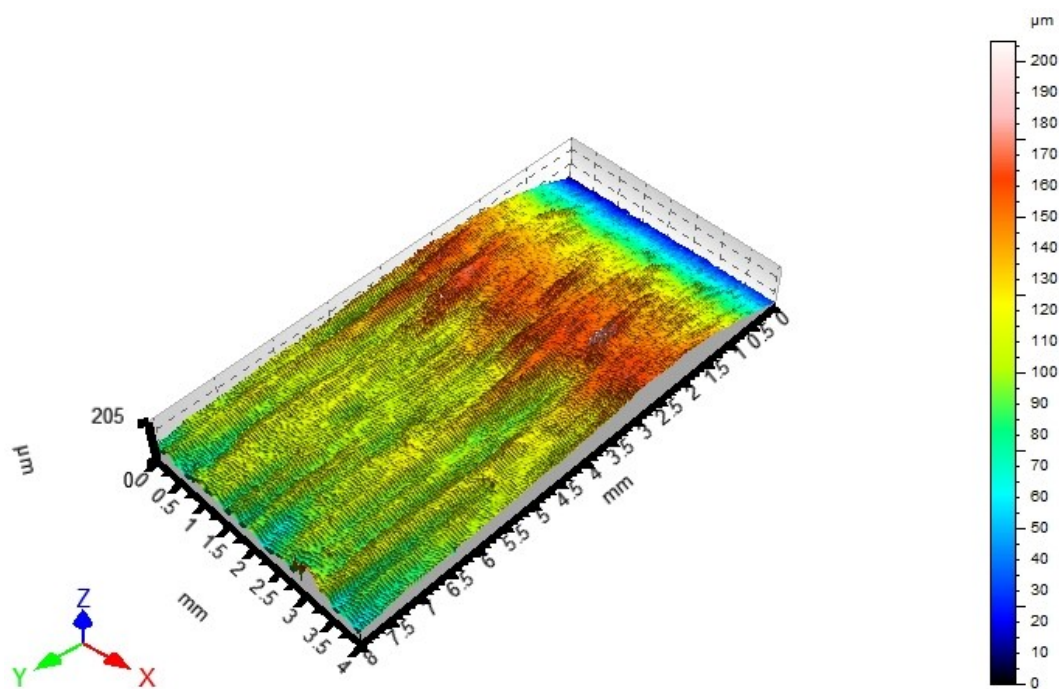


Obr. 109. Prostorový scan povrchu – vzorek 2C.

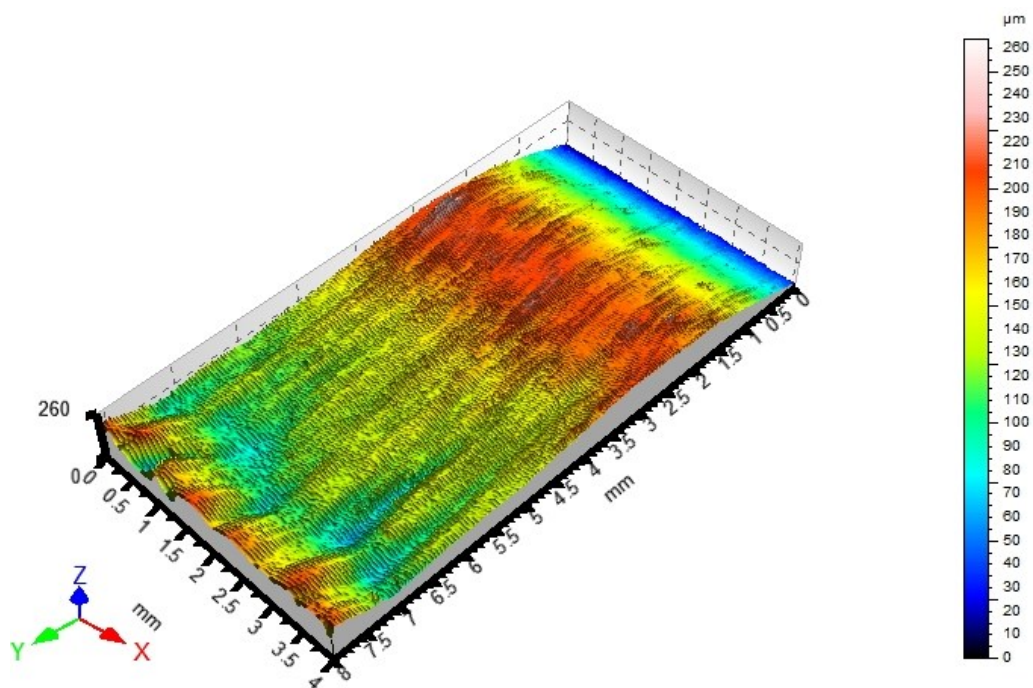




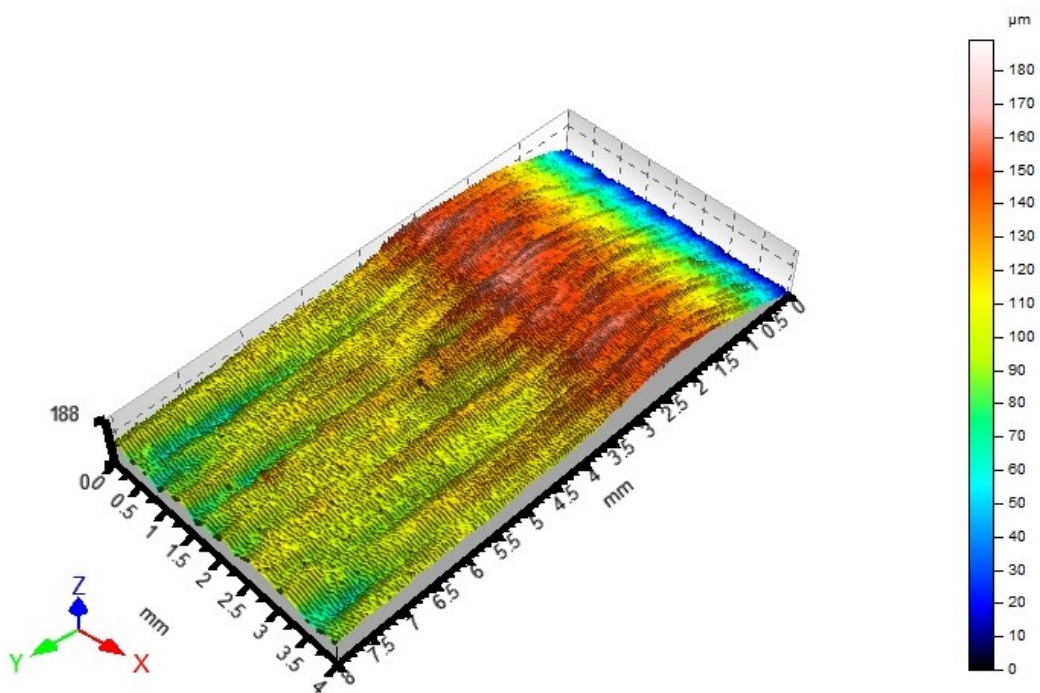
Obr. 110. Prostorový scan povrchu – vzorek 3A.



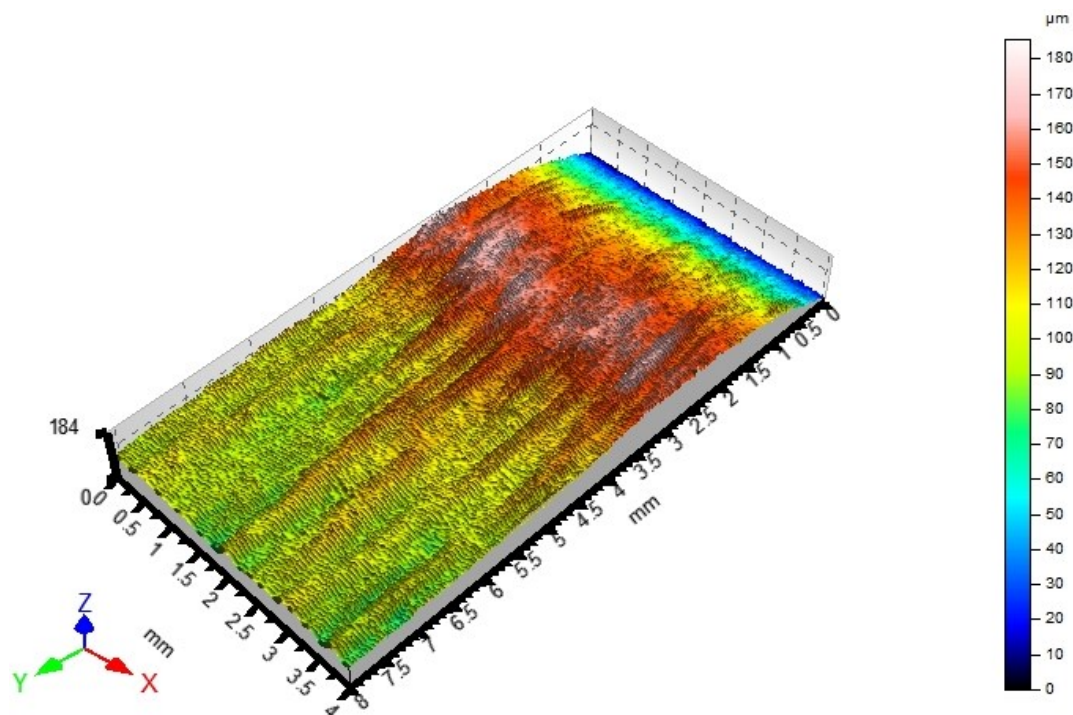
Obr. 111. Prostorový scan povrchu – vzorek 3B.



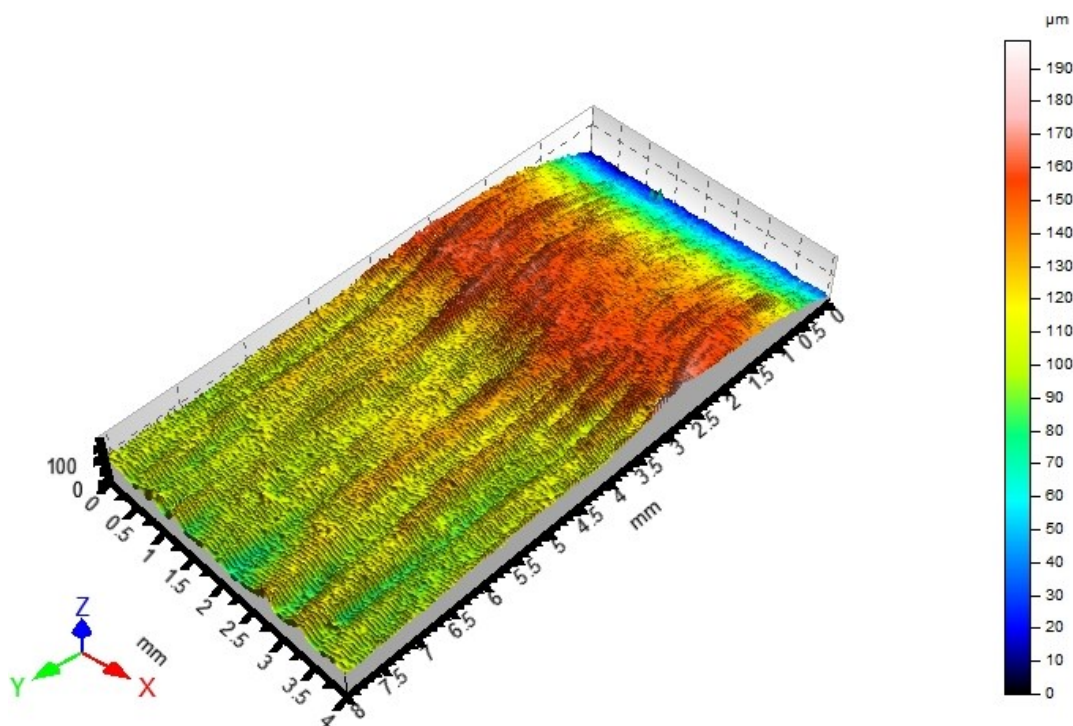
Obr. 112. Prostorový scan povrchu – vzorek 3C.



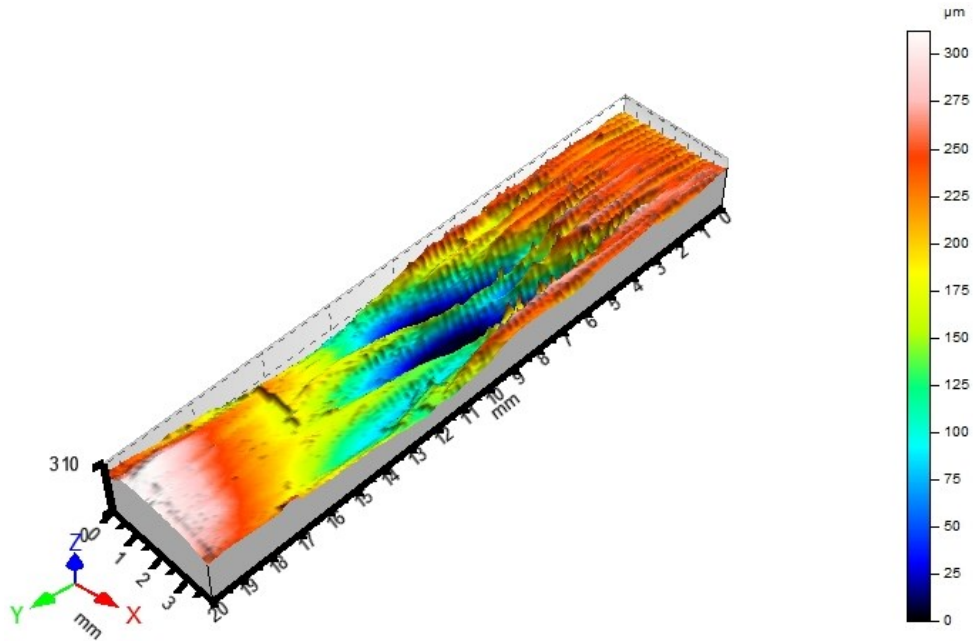
Obr. 113. Prostorový scan povrchu – vzorek 4A.



Obr. 114. Prostorový scan povrchu – vzorek 4B.



Obr. 115. Prostorový scan povrchu – vzorek 4C.



Obr. 116. Prostorový scan povrchu – vzorek 5A.

Tab. 18. Měřené parametry drsnosti povrchu.

Vzorek	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka	Maximální hodnota	Minimální hodnota
1A	Rz	µm	30,19	8,856	45,709	14,389
	Ra	µm	6,50	1,978	10,102	3,168
	RSm	µm	0,34	0,119	0,570	0,157
1B	Rz	µm	27,77	8,753	45,898	12,827
	Ra	µm	6,80	2,197	12,050	3,209
	RSm	µm	0,31	0,079	0,479	0,207
1C	Rz	µm	27,73	8,749	45,693	11,987
	Ra	µm	6,78	2,194	11,903	2,904
	RSm	µm	0,31	0,078	0,467	0,202
2A	Rz	µm	24,66	12,655	55,943	11,379
	Ra	µm	5,93	3,064	13,165	2,754
	RSm	µm	0,36	0,103	0,656	0,214



Vzorek	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka	Maximální hodnota	Minimální hodnota
2B	Rz	μm	26,97	10,758	49,458	12,79
	Ra	μm	6,54	2,587	12,388	3,026
	RSm	μm	0,38	0,129	0,700	0,201
2C	Rz	μm	17,83	5,543	32,555	5,859
	Ra	μm	4,12	1,177	7,079	1,263
	RSm	μm	0,40	0,123	0,675	0,202
3A	Rz	μm	52,68	39,669	139,866	4,547
	Ra	μm	11,77	8,843	29,036	0,940
	RSm	μm	0,34	0,089	0,606	0,144
3B	Rz	μm	24,70	8,528	47,629	7,369
	Ra	μm	5,14	1,963	9,311	1,432
	RSm	μm	0,28	0,056	0,479	0,128
3C	Rz	μm	27,49	10,109	58,280	4,877
	Ra	μm	5,70	2,273	12,761	1,049
	RSm	μm	0,28	0,080	0,694	0,159
4A	Rz	μm	24,39	7,566	39,158	10,135
	Ra	μm	5,21	1,590	7,860	2,127
	RSm	μm	0,30	0,048	0,479	0,176
4B	Rz	μm	24,49	7,972	47,695	7,529
	Ra	μm	4,97	1,618	9,007	1,542
	RSm	μm	0,27	0,047	0,411	0,142
4C	Rz	μm	23,24	7,777	42,469	7,580
	Ra	μm	4,65	1,527	8,777	1,393



Vzorek	Veličina	Jednotka	Průměr	Směrodatná odchylka	Maximální hodnota	Minimální hodnota
4C	RSm	μm	0,28	0,062	0,563	0,122
5A	Rz	μm	42,95	31,197	152,788	6,634
	Ra	μm	8,97	6,159	27,413	1,335
	RSm	μm	0,41	0,174	1,120	0,145

V rámci obecného trendu platí, že s rostoucí vzdáleností od vstupu paprsku do materiálu, se parametry jakosti povrchu zhoršují. Obecně platí, že s rostoucí posuvovou rychlostí se zlepšují také parametry jakosti řezné plochy, jelikož dochází k plynulejšímu kontaktu s materiálem, nicméně je nutné nalézt určitou správnou hodnotu, při vysokých posuvových rychlostech už tento fakt přestává platit. Předpokládaná hodnota parametru Ra pro metodu laserového dělení byla předpokládána v rozmezí 3,2 až 12,5 μm, což získané výsledky potvrzují. Z daných výsledků nevyplývá trend související s podmínkami řezu a drsností povrchu, je možné tvrdit, že pro každý materiál existují možné varianty podmínek, při kterých dosáhneme podobných vzhledů řezné plochy. Z hlediska výkyvů v parametrech taktéž vyplývá, že na jakost řezné plochy u korozivzdorných ocelí má změna posuvové rychlosti oproti změně výkonu značný vliv. Naopak u nelegované uhlíkové oceli nebyly zjištěny výraznější změny jakosti povrchu řezné plochy při změně posuvové rychlosti. Z hlediska jakosti povrchu řezné plochy byla vzhledově potvrzena hypotéza tří stádií postupující tloušťkou materiálu. Tato stádia vykazují rozdílné rýhování na řezné ploše.

## 7.7 Obecné shrnutí

- S klesajícími posuvovými rychlostmi, roste kuželovitost řezných ploch,
- S použitím nízkých řezných výkonů, roste kuželovitost řezných ploch,
- U vzorků byla naměřena tzv. reverzní odchylka kolmosti, kdy délka vstupní hrany vzorku je větší než délka výstupní hrany,
- S klesajícím výkonem roste skluz rýhování na řezné ploše,
- Byl potvrzen nárůst tvrdosti materiálu v TOO a rozsah TOO,
- TOO byla podložena modelem vytvořeném v konečněprvkovém softwaru,
- Byl potvrzen rozdíl v tepelných vodivostech materiálu,

- Byly potvrzeny 3 stádia vzhledu řezné plochy,
- Významnější vliv na jakost řezné plochy vykazoval parametr posuvové rychlosti.

## ZÁVĚR

Z hlediska vývoje byly laserové technologie vyvíjeny jako alternativa pro klasické obrábění, v dnešní době však už fungují jako samostatná technologie v oblasti dělení, obrábění nebo ohřevu materiálu. Hlavním důvodem zavádění laserových technologií je variabilita při obrábění různých druhů materiálu, rychlost a flexibilita. V této práci byly zkoumány vlivy technologických parametrů na obráběný materiál, v tomto případě na ocel. Z upravovaných parametrů byla vybrána posuvová rychlost a výkon, vše dle možností strojního vybavení a zkušeností obsluhy.

V teoretické části této práce byl rozebrán princip laserového zařízení včetně druhů laserů a jejich aplikací. Vzhledem k dostupnosti materiálů byly pro účely práce využity vybrané druhy ocelí o zmíněném chemickém složení, které byly obráběny na popsaném zařízení. Po této části byly vyhodnoceny vybrané parametry.

Parametr kuželovitosti řezné spáry je důležitý z hlediska funkčnosti vyřezaného dílu, jako pro ostatní parametry vyřezaného dílu, bývá nutné najít co nejvhodnější podmínky pro eliminaci dané chyby. V rámci měření kuželovitosti řezné spáry byl prokázán vliv na zvyšující se kuželovitost u vzorku, kde byl proveden řez nižší posuvovou rychlostí. Tento výsledek potvrzuje taktéž hlavní důvod, proč jsou používány vláknové lasery a to jejich rychlost. Naopak při změně řezného výkonu byla prokázána vyšší kuželovitost u vzorku řezaného nižším výkonem, což může být způsobeno ztrátou energie a odchýlením paprsku od své osy. Tento fakt je také spojen s parametrem skluzu rýhování na řezné ploše.

Z naměřených hodnot skluzu, které byly určeny pouze u vybraných vzorků je možno tvrdit, že nízký výkon zařízení má velký vliv na hodnotu skluzu. Při dělení oceli výkonem 1000 W je hodnota skluzu u vzorku tloušťky 10 mm trojnásobná oproti vzorku stejného materiálu tloušťky 20 mm řezaného výkonem 3000 W. Naopak u vzorku korozivzdorné oceli tloušťky 10 mm řezané výkonem 3000 W byla naměřená hodnota skluzu poloviční oproti vzorku nelegované uhlíkové oceli tloušťky 20 mm.

Tepelně ovlivněná oblast byla prověřena pomocí zkoušky mikrotvrdosti ve vzrůstající vzdálenosti od řezné spáry. Teplo, které materiál přijal z laserové paprsku způsobilo v materiálu strukturální změny, které měly za následek zvýšení tvrdosti materiálu. Tvrdost byla měřena po krocích o rozteči 50  $\mu\text{m}$  do vzdálenosti 300  $\mu\text{m}$ , následně byla rozteč zvětšována. Na zkoušených 6 vzorcích vykazoval největší nárůst tvrdosti vzorek korozivzdorné oceli při podmínkách –  $P = 3000 \text{ W}$ ,  $v_f = 0,65 \text{ m/min}$ . Základní tvrdost obou materiálů byla

blízká, jelikož korozivzdorné oceli se nevyznačují navzdory jiným vlastnostem značným rozdílem v tvrdosti oproti uhlíkovým ocelím. Pro potvrzení daného jevu byl vytvořen model teplotního pole pro danou situaci v programu COSMOS/M. Tento model potvrdil rozsah tepelně ovlivněné oblasti. Z tohoto modelu bylo možné přibližně odečíst v jaké vzdálenosti od řezné spáry byla v materiálu dosažena teplota austenitizace potřebná ke strukturním změnám, po jejím překročení teplota dále stoupala, po dosažení určité teploty byl materiál ochlazován, bylo dosaženo určité rychlosti ochlazování a s tím také dle ARA diagramu by bylo možné určit vznikající strukturu. Vzhledem k nižšímu obsahu uhlíku a pomalé rychlosti ochlazování nebylo dosaženo vyšších tvrdostí. Metoda chlazení na vzduchu je vhodná pouze pro vysokolegované samokalitelné oceli. Výsledná struktura může vykazovat perliticko – feritickou strukturu s malým množstvím martenzitu. Po zhodnocení výsledků zkoušek mikrotvrdosti a simulace teplotního pole byl potvrzen rozdíl v materiálové charakteristice popsané součinitelem tepelné vodivosti. Z hlediska přesného určení stavu struktury, by bylo vhodné zhotovit metalografické výbrusy pro mikroskopické prověření, nicméně rozměry vzorků toto nedovolovaly a k dispozici nebyla technologie dělení, která by opětovně neovlivnila strukturu materiálu.

Z výsledků měření jakosti povrchu vyplývá, že s klesající posuvovou rychlostí dosáhneme lepších výsledků, parametry drsnosti mírně klesly. Při změně výkonu byl trend u materiálů obrácený, zatímco nelegovaná uhlíková ocel vykazovala při snižování výkonu lepší jakostní parametry. U oceli korozivzdorné vykazoval vzorek řezaný nejvyšším výkonem nejlepší parametry jakosti povrchu.

Tato diplomová práce shrnuje data o chování oceli řezané laserovým paprskem. Bylo pozorováno více aspektů, které by měly nastínit projevy oceli pozorovatelné lidským okem nebo projevy v oblasti struktur.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [2] GELETA, Vojtech. *Progresívne technológie obrábania*. Bratislava: Nakladateľství STU, 2013. ISBN 978-80-227-3997-9.
- [3] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technológie v praxi*. 1. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
- [4] Jak funguje laser. ČEZ [online]. 2004 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap2.htm>
- [5] CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technológie v praxi II*. Olomouc, 2011. Přednáška. SLO UP a FZÚ AVČR Olomouc.
- [6] BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- [7] TURŇA, Milan a Pavel KOVAČÓCY. *Zváranie laserovým lúčom*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2003. ISBN 80-227-1921-8.
- [8] QUINTINO, L., A. COSTA, R. MIRANDA, D. YAPP, V. KUMAR a C.J. KONG. *Welding with high power fiber lasers – A preliminary study*. In: *Materials & Design*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007, 1231–1237. Dostupné z: [http://ac.elscdn.com/S0261306906000185/1-s2.0-S0261306906000185-main.pdf?\\_tid=21105606-bd8f11e289c300000aab0f01&acdnat=1368643502\\_73bc0014f4b04323955c597a99acde19](http://ac.elscdn.com/S0261306906000185/1-s2.0-S0261306906000185-main.pdf?_tid=21105606-bd8f11e289c300000aab0f01&acdnat=1368643502_73bc0014f4b04323955c597a99acde19)
- [9] Oblasti použití. *Trumpf* [online]. 2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti.html>
- [10] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. MM průmyslové spektrum*. 2008, **12**.(5), 68.
- [11] POLÁK, Marek. *Nasazení laseru při výrobě manipulační techniky*: Diplomová práce, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 65s., 5 příloh, Vedoucí práce Ing. Karel Osička

- [12] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. 4. Brno: AKADEMICKO NAKLADATELSTVÍ CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-751-2.
- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-720-4248-3.
- [14] *Přehled vlastností oceli S235JR* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: [http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10025/MOP\\_prehled\\_vlastnosti\\_S235JR.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf)
- [15] *Přehled vlastností oceli 1.4301* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [16] Principle of heat treating. *Sonic* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://blade.home.sonic.net/drupal/?q=node/13>
- [17] GRANGE, R.A., C.R. HRIBAL a L.F. PORTER. Hardness of tempered martensite in carbon and low-alloy steels. *Metallurgical transactions A*. 1977, **28**(8), 12.
- [18] *Lasery a laserová zařízení firmy TRUMPF* [online]. 2017 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/vyrobky.html>
- [19] *FIBER LASER TECHNOLOGIE (ŘEZÁNÍ LASEREM)* [online]. 2014 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.feicut.cz/fiber-laser-technologie-rezani-laserem/t1097>
- [20] *Laser processing: Technical information* [online]. Ditzingen: TRUMPH Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG. 2007-02 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z WWW: <http://www.trumpf.com>.
- [21] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. Praha : Český Normalizační Institut, 2003-10. 28 s.
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, xi, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.

- [23] GIANNAKOPOULOS, A. Elastic and viscoelastic indentation of flat surfaces by pyramid indentors. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* [online]. 2006, vol. 54, iss. 7, s. 1305-1332 [cit. 2017-3-24]. ISSN 00225096. OI:10.1016/j.jmps.2006.01.011. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022509606000214>
- [24] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.]
- [25] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNÍKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. 4. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 90-214-3070-2.
- [26] Posuvné měřidla. *Festa nářadí* [online]. 2016 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.festanaradi.cz/105-posuvne-meridla>
- [27] KOLOMAZNÍK, Karel. *Analýza dynamických systémů*. Brno: VUT, 1988, 213 s.
- [28] Ústav výrobního inženýrství FT UTB ve Zlíně. *Plastikářský klastr* [online]. [cit. 2017-04-10]. Dostupné z: <http://www.plastr.cz/uvi.php>
- [29] Talysurf CLI. Taylor-Hobson [online]. 2008 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: [http://www.tisecco.org/Product\\_PDF/TH/Non%20Contact%20Profiles/talysurf-cli-systems.pdf](http://www.tisecco.org/Product_PDF/TH/Non%20Contact%20Profiles/talysurf-cli-systems.pdf)
- [30] *Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály*. Zlín, 2007. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Libuše Sýkorová Ph.D.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\nabla$	Divergence gradientu teplotního pole
A	Absorpce záření
a	Referenční přímka
A(t)	Absorpční koeficient v závislosti na teplotě
Ag	Stříbro
Al	Hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
ARA	Anizotermický rozpad austenitu
Au	Zlato
b	Skluzová rýha
C	Velikost otřepů
c	Směr posuvu
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
c <sub>p</sub>	Měrná tepelná kapacita
f	Vzdálenost dvou bodů skluzových rýh
H	Vzdálenost mezi vstupní a výstupní hranou
He	Helium
IRA	Izotermický rozpad austenitu
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
LD	Laserová dioda
LED	Luminiscenční dioda
MASER	Microwave amplification by stimulated emission of radiation
M <sub>f</sub>	Konec martenzitické přeměny



---

Mo	Molybden
$M_s$	Počátek martenzitické přeměny
n	Vzdálenost dvou bodů skluzové rýhy
$N_2$	Dusík
R	Odraz záření
$R_a$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
$R_e(t)$	Elektrický odpor v závislosti na teplotě
$R_{Sm}$	Průměrná šířka prvků profilu
Rz	Největší výška profilu
S	Síra
t	Teplota
u	Měrná vnitřní energie
v	Měrný objem
$v_f$	Posuvová rychlost
W	Měrný výkon
$W_{bottom}$	Délka výstupní hrany
$W_{top}$	Délka vstupní hrany
$\lambda$	Vlnová délka
$\tau$	Čas
$\varphi$	Úhel kuželovitosti řezné spáry

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Schéma laserového zařízení [4].....	12
Obr. 2. Schéma pevnolátkového laseru [4].....	14
Obr. 3. Režimy laseru [1].....	18
Obr. 4. Technologie použití laseru [1].....	18
Obr. 5. Vliv úhlu dopadu paprsku [7].....	19
Obr. 6. Vliv vlnové délky [8].....	20
Obr. 7. Náklady na 1 m řezu [1]. ....	21
Obr. 8. Hluboké svařování [9].    Obr. 9. Kondukční svařování [9]. ....	22
Obr. 10. Laserové navařování [9]. ....	22
Obr. 11. Laserové soustružení [10].....	23
Obr. 12. Laserové frézování [10].....	24
Obr. 13. Laserové vrtání [9].....	25
Obr. 14. Spirálové vrtání [9].....	25
Obr. 15. Trepanační vrtání [9]. ....	26
Obr. 16. Aplikace laserového značení [9].....	26
Obr. 17. Značení dle ČSN 42 0002:78 [12].....	29
Obr. 18. Značení oceli dle ČSN EN 10027-2 [12].....	30
Obr. 19. Diagram Fe – Fe <sub>3</sub> C [13].....	33
Obr. 20. ARA diagram [13]. ....	34
Obr. 21. IRA diagram – podeutektoidní ocel [13].....	35
Obr. 22. Martenzitická struktura      Obr. 23 Struktura Ferit – Perlit.....	35
Obr. 24. Tvrdost v závislosti na obsahu C [17]. ....	36
Obr. 25. Trumpf TruLaser 5030 [18]. ....	38
Obr. 26. Vláknový laser [19]. ....	39
Obr. 27. Tvar řezu [20]. ....	40
Obr. 28. Skluz [21]. ....	41
Obr. 29. Druhy vnikacích těles [22]. ....	42
Obr. 30. Profil povrchu [25]. ....	46
Obr. 31. Největší výška profilu [23]. ....	46
Obr. 32. Průměrná aritmetická úchylka [25]. ....	47
Obr. 33. Průměrná šířka prvků profilu RSm [25]. ....	47
Obr. 34. Zkušební tělíska. ....	49

Obr. 35. Testované materiály.....	50
Obr. 36. Mikroskop Carl Zeiss Jena. ....	51
Obr. 37. Plocha řezu – vzorek 5A.....	52
Obr. 38. Plocha řezu – vzorek 1A.....	53
Obr. 39. Plocha řezu – vzorek 1B.....	54
Obr. 40. Plocha řezu – vzorek 1C.....	55
Obr. 41. Plocha řezu – vzorek 2A.....	56
Obr. 42. Plocha řezu – vzorek 2B. ....	57
Obr. 43. Plocha řezu – vzorek 2C.....	58
Obr. 44. Plocha řezu – vzorek 3A.....	59
Obr. 45. Plocha řezu – vzorek 3B.....	60
Obr. 46. Plocha řezu – vzorek 3C.....	61
Obr. 47. Plocha řezu – vzorek 4A.....	62
Obr. 48. Plocha řezu – vzorek 4B.....	63
Obr. 49. Plocha řezu – vzorek 4C.....	64
Obr. 50. Posuvné měřítko Festa [26]. ....	65
Obr. 51. Kuželovitost vzorku.....	66
Obr. 52. Závislost kuželovitosti na posuvové rychlosti.....	66
Obr. 53. Kuželovitost v závislosti na změně výkonu. ....	67
Obr. 54. 2C.....	68
Obr. 55. 5A. ....	69
Obr. 56. 3A. ....	69
Obr. 57. Fotomikroskop Neophot.....	71
Obr. 58. Vzorek 1A – HV.....	71
Obr. 59. Vzorek 1A – E.....	72
Obr. 60. Vzorek 1B – HV.....	72
Obr. 61. Vzorek 1B – E.....	73
Obr. 62. Vzorek 1C – HV.....	73
Obr. 63. Vzorek 1C – E.....	74
Obr. 64. 11 375 – HV.....	74
Obr. 65. Vzorek 3A – HV.....	75
Obr. 66. Vzorek 3A – E.....	76
Obr. 67. Vzorek 3B – HV.....	76

Obr. 68. Vzorek 3B – E. ....	77
Obr. 69. Vzorek 3C – HV. ....	77
Obr. 70. Vzorek 3C – E. ....	78
Obr. 71. 17 240 – HV. ....	78
Obr. 72. Teplotní pole v průřezu vzorku oceli 11 375. ....	80
Obr. 73. Grafické zobrazení teplot – ocel 11 375. ....	80
Obr. 74. Teplotní pole v průřezu vzorku oceli 17 240. ....	81
Obr. 75. Grafické zobrazení teplot – ocel 17 240. ....	81
Obr. 76. Teplota martenzitické přeměny [13]. ....	82
Obr. 77. Talysurf CLI 500 [28]. ....	82
Obr. 78. Povrch 1A. Obr. 79. Povrch 1A – drsnost + vlnitost. ....	83
Obr. 80. Povrch 1B. Obr. 81. Povrch 1B – drsnost + vlnitost. ....	83
Obr. 82. Povrch 1C. Obr. 83. Povrch 1C – drsnost + vlnitost. ....	84
Obr. 84. Povrch 2A. Obr. 85. Povrch 2A – drsnost + vlnitost. ....	84
Obr. 86. Povrch 2B. Obr. 87. Povrch 2B – drsnost + vlnitost. ....	84
Obr. 88. Povrch 2C. Obr. 89. Povrch 2C – drsnost + vlnitost. ....	85
Obr. 90. Povrch 3A. Obr. 91. Povrch 3A – drsnost + vlnitost. ....	85
Obr. 92. Povrch 3B. Obr. 93. Povrch 3B – drsnost + vlnitost. ....	85
Obr. 94. Povrch 3C. Obr. 95. Povrch 3C – drsnost + vlnitost. ....	86
Obr. 96. Povrch 4A. Obr. 97. Povrch 4A – drsnost + vlnitost. ....	86
Obr. 98. Povrch 4B. Obr. 99. Povrch 4B – drsnost + vlnitost. ....	86
Obr. 100. Povrch 4C. Obr. 101. Povrch 4C – drsnost + vlnitost. ....	87
Obr. 102. Povrch 5A. Obr. 103. Povrch 5A – drsnost + vlnitost. ....	87
Obr. 104. Prostorový scan povrchu – vzorek 1A. ....	88
Obr. 105. Prostorový scan povrchu – vzorek 1B. ....	88
Obr. 106. Prostorový scan povrchu – vzorek 1C. ....	89
Obr. 107. Prostorový scan povrchu – vzorek 2A. ....	89
Obr. 108. Prostorový scan povrchu – vzorek 2B. ....	90
Obr. 109. Prostorový scan povrchu – vzorek 2C. ....	90
Obr. 110. Prostorový scan povrchu – vzorek 3A. ....	91
Obr. 111. Prostorový scan povrchu – vzorek 3B. ....	91
Obr. 112. Prostorový scan povrchu – vzorek 3C. ....	92
Obr. 113. Prostorový scan povrchu – vzorek 4A. ....	92

---

Obr. 114. Prostorový scan povrchu – vzorek 4B.....	93
Obr. 115. Prostorový scan povrchu – vzorek 4C.....	93
Obr. 116. Prostorový scan povrchu – vzorek 5A.....	94

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Hustota energie [1]. .....	13
Tab. 2. Porovnání laserů [2]. .....	16
Tab. 3. Interakce s živou tkání [5]. .....	17
Tab. 4. Srovnání metod nekonvenčních technologií [1]. .....	23
Tab. 5. Vlastnosti oceli 11 375 [14]. .....	31
Tab. 6. Vlastnosti ocelových plechů materiálu 17 240 [15]. .....	32
Tab. 7. Parametry stroje [18]. .....	37
Tab. 8. Maximální řezná tloušťka [19]. .....	39
Tab. 9. Rozdělení metod dle Vickerse [24]. .....	42
Tab. 10. Složky tepelné energie .....	44
Tab. 11. Označení vzorků. ....	49
Tab. 12. Změna posuvové rychlosti. ....	67
Tab. 13. Změna výkonu. ....	68
Tab. 14. Skluz. ....	70
Tab. 15. Vlastnosti vzorku oceli 11 375 [15]. ....	79
Tab. 16. Vlastnosti vzorku oceli 17 240 [15]. ....	80
Tab. 17. Parametry přístroje [29]. .....	83
Tab. 18. Měřené parametry drsnosti povrchu. ....	94

## SEZNAM PŘÍLOH

P I – Výsledky měření kuželovitosti

P II – Profil povrchu

P III – Parametry drsnosti povrchu

## PŘÍLOHA P I: VÝSLEDKY MĚŘENÍ KUŽELOVITOSTI

ČERNÝ KOLMO	1A		ROVN	1B		ROVN	1B					
	VSTUP	VÝSTUP		VSTUP	VÝSTUP		VSTUP	VÝSTUP				
	1	49,95	49,84		49,92	49,84		49,9	49,83		49,89	49,8
	2	49,92	49,85		49,93	49,82		49,9	49,8		49,91	49,8
	3	49,97	49,84		49,91	49,8		49,88	49,78		49,89	49,81
	4	49,93	49,88		49,92	49,8		49,89	49,81		49,88	49,83
	5	49,93	49,84		49,93	49,82		49,91	49,83		49,93	49,83
	6	49,95	49,85		49,9	49,84		49,91	49,82		49,9	49,84
	7	49,92	49,89		49,91	49,84		49,9	49,83		49,9	49,82
	8	49,94	49,89		49,93	49,84		49,89	49,81		49,93	49,83
	9	49,94	49,85		49,92	49,82		49,92	49,82		49,89	49,8
	10	49,94	49,85		49,91	49,82		49,91	49,81		49,88	49,82
<b>Průměr</b>		<b>49,939</b>	<b>49,858</b>		<b>49,918</b>	<b>49,824</b>		<b>49,901</b>	<b>49,814</b>		<b>49,9</b>	<b>49,818</b>
Sm.												
Odch		0,015238839	0,02044		0,010328	0,015776		0,011972	0,015776		0,018257	0,014757
Úhel		0° 14'	0,233		0° 16'	0,267		0° 15'	0,25		0° 14'	0,233



1C						
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP	
	49,84	49,83		49,85	49,76	
	49,85	49,82		49,86	49,77	
	49,87	49,81		49,87	49,78	
	49,85	49,82		49,85	49,79	
	49,86	49,79		49,84	49,78	
	49,85	49,79		49,84	49,79	
	49,87	49,8		49,84	49,78	
	49,85	49,78		49,84	49,81	
	49,86	49,8		49,85	49,78	
	49,85	49,82		49,83	49,79	
Průměr	49,855	49,806		49,847	49,783	
Sm.						
Odch	0,009718	0,016465		0,011595	0,013375	
Úhel	0° 8'	0,133		0° 11'	0,183	

### Změna výkonu

ČERNÝ 2A					
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP
1	49,83	49,77		49,88	49,84
2	49,84	49,78		49,9	49,84
3	49,84	49,76		49,9	49,85
4	49,84	49,77		49,92	49,85
5	49,82	49,79		49,91	49,84
6	49,84	49,78		49,8	49,85
7	49,8	49,79		49,91	49,86
8	49,85	49,77		49,89	49,84
9	49,84	49,77		49,88	49,85
10	49,85	49,77		49,89	49,86
<b>Průměr</b>	<b>49,835</b>	<b>49,775</b>		<b>49,888</b>	<b>49,848</b>
Sm.					
Odch	0,015092309	0,009718		0,033599	0,007888
Úhel	0° 10'	0,167		0° 7'	0,117

2B					
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP
	49,86	49,82		49,96	49,95
	49,87	49,79		49,96	49,94
	49,87	49,8		49,98	49,93
	49,88	49,79		49,97	49,93
	49,86	49,78		49,96	49,93
	49,87	49,78		49,99	49,92
	49,86	49,79		49,97	49,93
	49,87	49,79		49,97	49,91
	49,85	49,79		49,99	49,94
	49,88	49,78		49,97	49,92
	<b>49,867</b>	<b>49,791</b>		<b>49,972</b>	<b>49,93</b>
	0,009487	0,011972		0,011353	0,011547
	0° 13'	0,217		0° 7'	0,117

2C					
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP
	49,96	49,7		50	49,75
	49,97	49,74		50,02	49,75
	50	49,75		50,02	49,78
	50	49,7		50,05	49,73
	49,96	49,76		50,02	49,79
	50	49,75		50,02	49,8
	49,94	49,8		50,04	49,76
	49,99	49,8		50,03	49,79
	50	49,71		50,03	49,78
	50	49,72		50,06	49,78
Průměr	49,982	49,743		50,029	49,771
Sm. odch	0,022509	0,036833		0,017288	0,022336
Úhel	0° 41'	0,683		0° 44'	0,733

NEREZ KOLMO	3A		Změna rychlosti			3B KOLMO	3B					
	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP		VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP	
	1	49,86	50,1		49,88	50,14		49,84	49,76		49,86	49,66
	2	49,85	50,14		49,92	50,18		49,88	49,69		49,88	49,75
	3	49,85	50,13		49,91	50,2		49,94	49,71		49,86	49,73
	4	49,88	50,08		49,9	50,25		49,93	49,73		49,9	49,77
	5	49,87	50,11		49,91	50,19		49,87	49,76		49,91	49,75
	6	49,85	50,17		49,88	50,19		49,9	49,74		49,9	49,8
	7	49,87	50,16		49,94	50,24		49,91	49,82		49,88	49,74
	8	49,88	50,1		49,9	50,26		49,92	49,69		49,9	49,83
	9	49,9	50,1		49,87	50,23		49,92	49,65		49,88	49,77
	10	49,88	50,17		49,93	50,23		49,92	49,67		49,89	49,83
Průměr		49,869	50,126		49,904	50,211		49,903	49,722		49,886	49,763
Sm. odch		0,0166333	0,032728		0,022706	0,037253		0,03093	0,050509		0,017127	0,050563
Úhel		0° 44'	0,733		0° 52'	0,867		0° 31'	0,517		0° 21'	0,35

3C					
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP
	49,98	49,8		49,91	49,76
	49,96	49,7		49,91	49,76
	49,93	49,75		49,95	49,85
	49,95	49,76		49,95	49,81
	49,98	49,64		49,94	49,76
	49,96	49,69		49,98	49,74
	50,01	49,7		49,96	49,75
	49,94	49,72		49,92	49,73
	49,91	49,72		49,98	49,71
	50,02	49,71		49,98	49,72

Průměr	49,964	49,719		49,948	49,759
Sm. Odch	0,034383	0,043576		0,027809	0,042282

Úhel	0° 43'	0,717	0° 32'	0,533
------	--------	-------	--------	-------

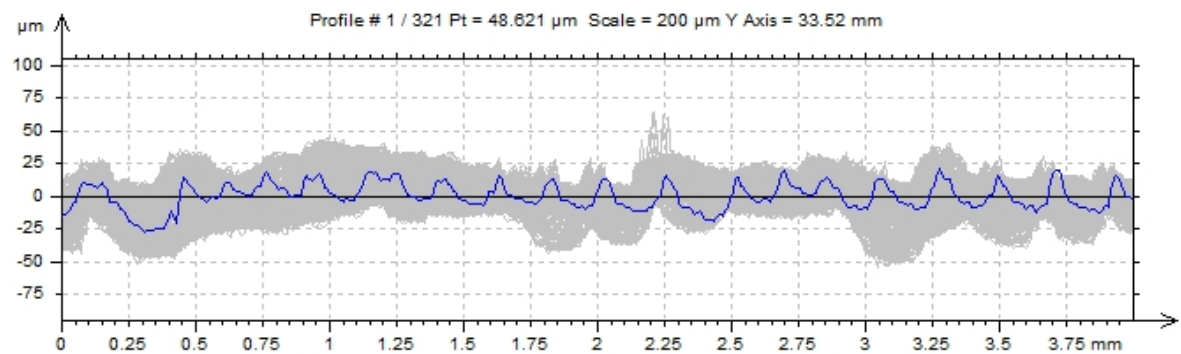
NEREZ 4A						4B					
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP	KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP
	49,81	49,73		49,9	49,77		49,84	49,75		49,9	49,73
	49,83	49,76		49,87	49,8		49,78	49,73		49,91	49,8
	49,83	49,76		49,87	49,78		49,78	49,72		49,87	49,78
	49,86	49,77		49,86	49,73		49,86	49,75		49,91	49,83
	49,88	49,74		49,9	49,79		49,86	49,79		49,93	49,78
	49,77	49,72		49,9	49,79		49,78	49,74		49,93	49,85
	49,81	49,77		49,9	49,83		49,83	49,78		49,92	49,77
	49,85	49,76		49,86	49,81		49,79	49,75		49,93	49,79
	49,8	49,75		49,92	49,75		49,82	49,79		49,92	49,76
	49,8	49,75		49,9	49,75		49,83	49,73		49,85	49,78
Průměr	49,824	49,751		49,888	49,78		49,817	49,753		49,907	49,787
Sm.odch	0,032727834	0,016633		0,020976	0,030551		0,032335	0,025408		0,027101	0,03401
Úhel	0° 12'	0,2		0° 18'	0,3		0° 11'	0,183		0° 20'	0,333



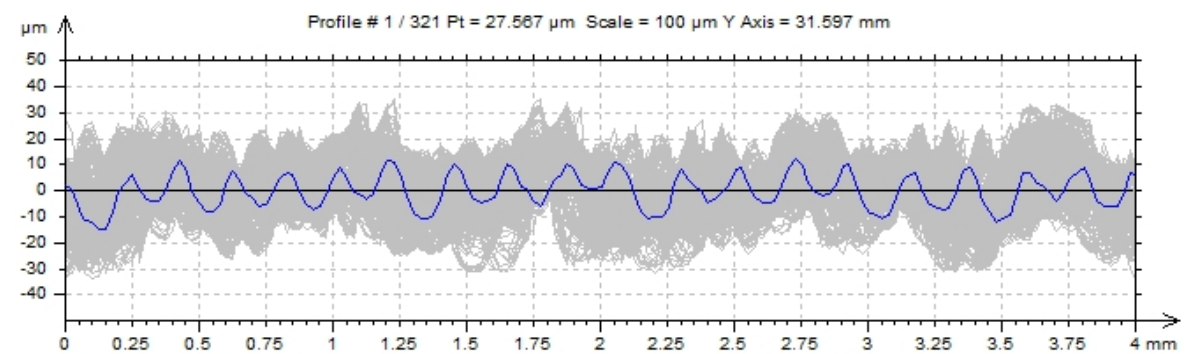
4C					
KOLMO	VSTUP	VÝSTUP	ROVN	VSTUP	VÝSTUP
	49,87	49,79		50	49,78
	49,83	49,78		50	49,83
	49,82	49,77		49,94	49,88
	49,84	49,78		49,98	49,93
	49,82	49,77		50	49,92
	49,86	49,76		49,95	49,77
	49,85	49,78		49,96	49,78
	49,84	49,77		49,97	49,81
	49,86	49,78		49,91	49,79
	49,86	49,76		49,93	49,88
Průměr	49,845	49,774		49,964	49,837
Sm.odch	0,017795	0,009661		0,031693	0,060745
Úhel	0° 12'	0,2		0° 21'	0,35

# PŘÍLOHA P II: PROFIL POVRCHU

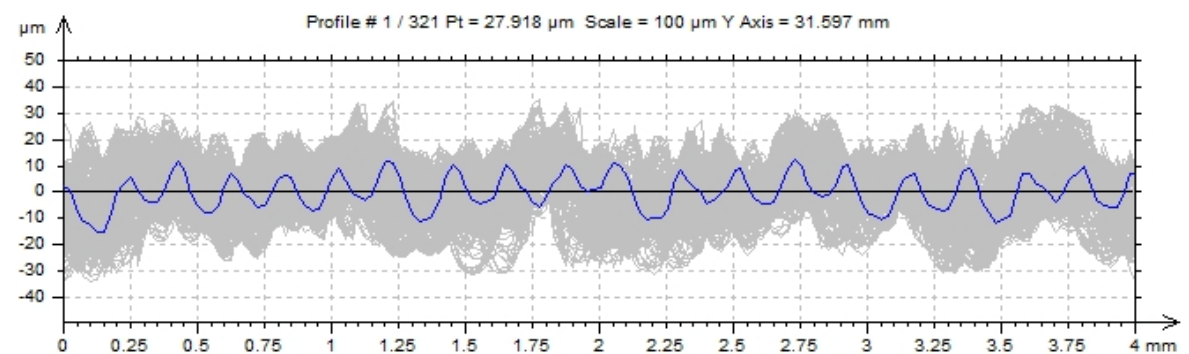
1A



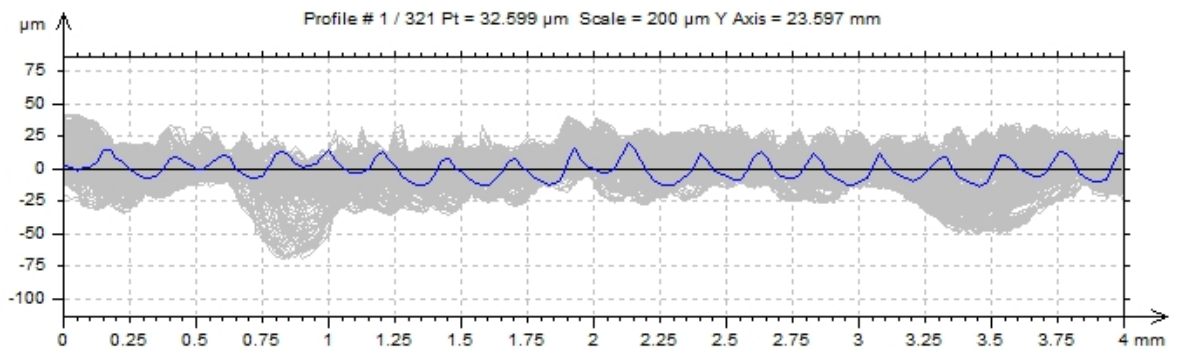
1B



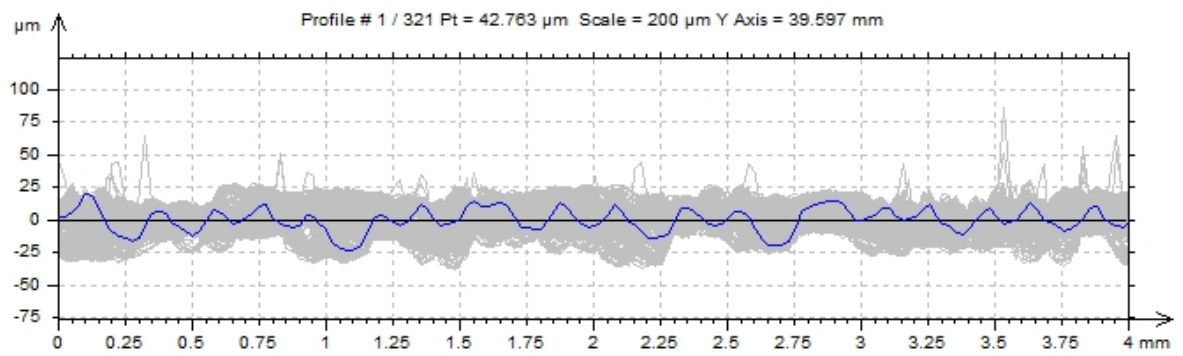
1C



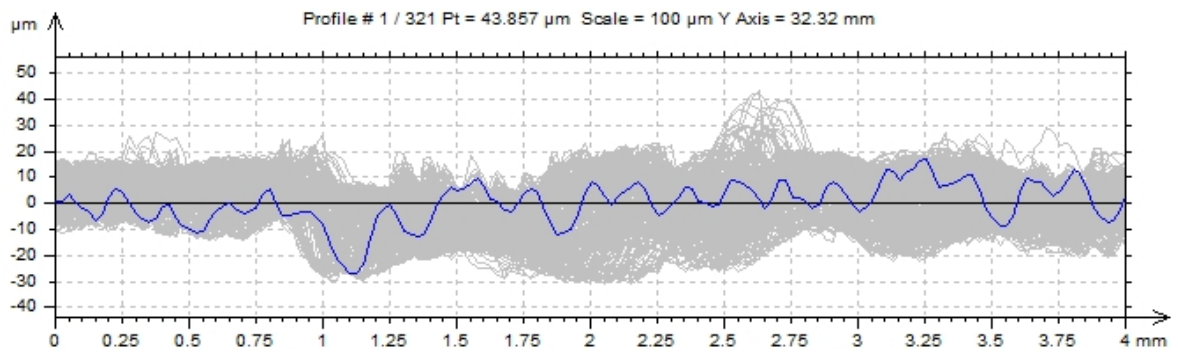
2A



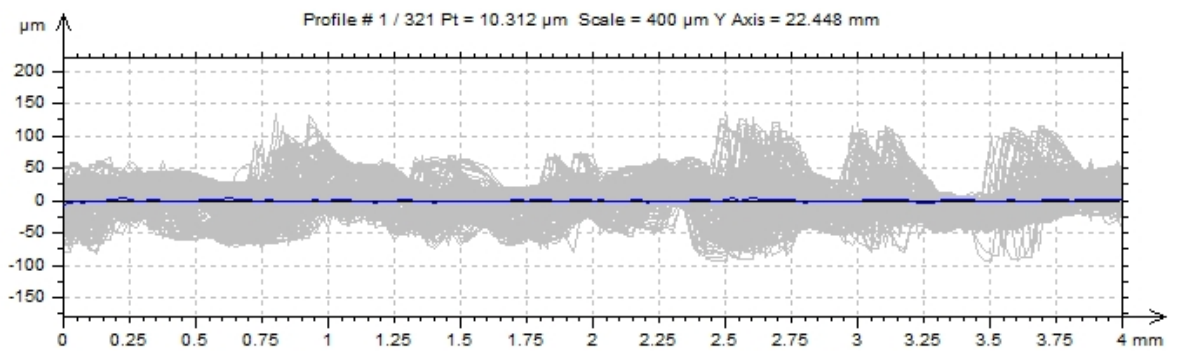
2B



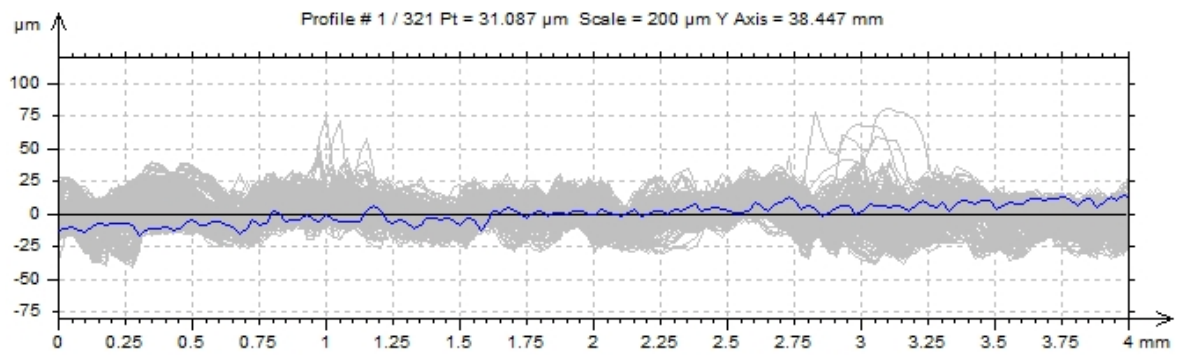
2C



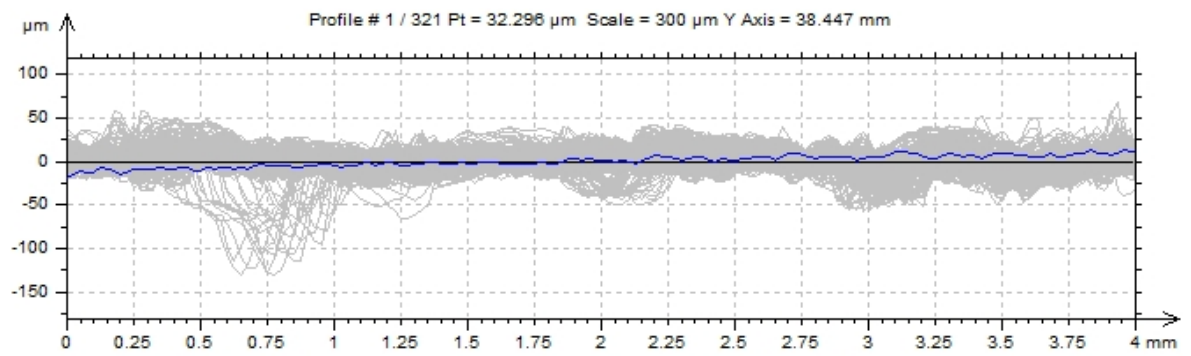
3A



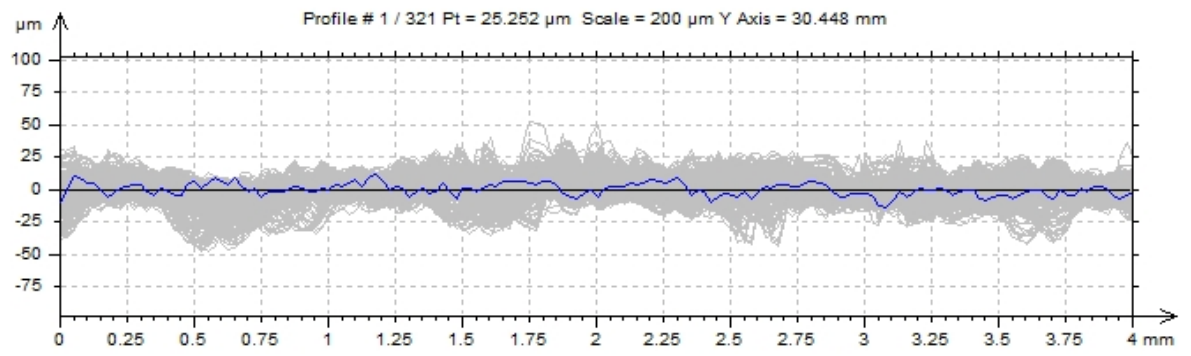
3B



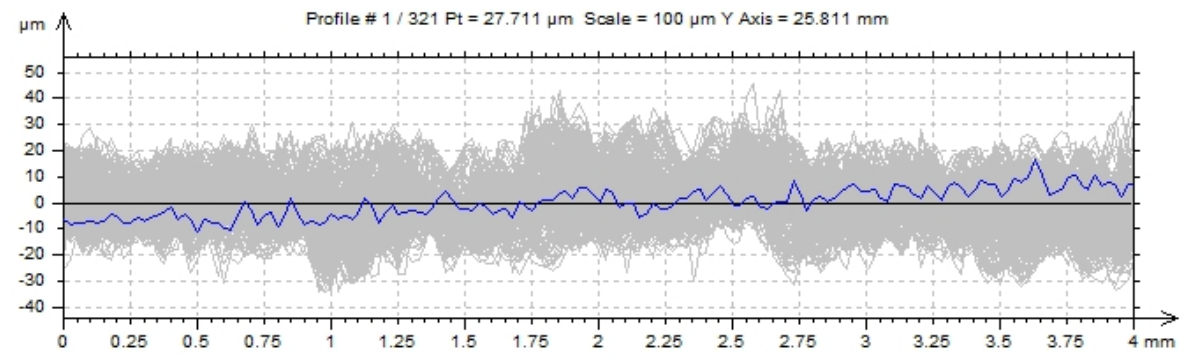
3C



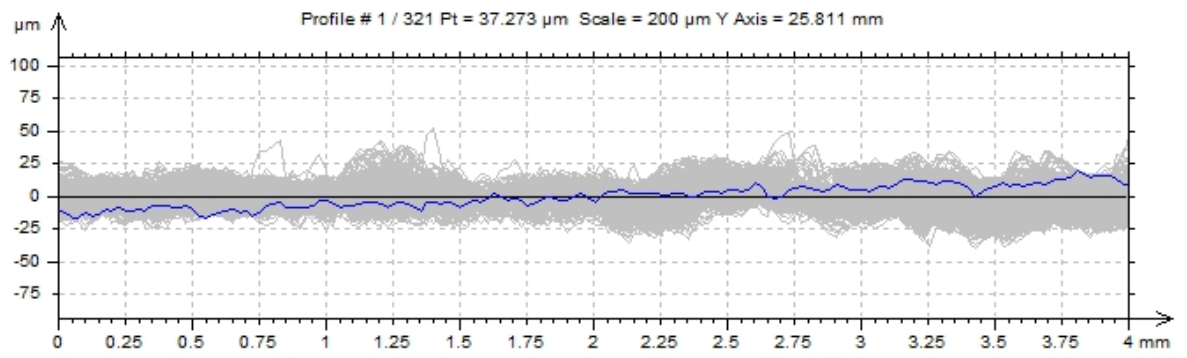
4A



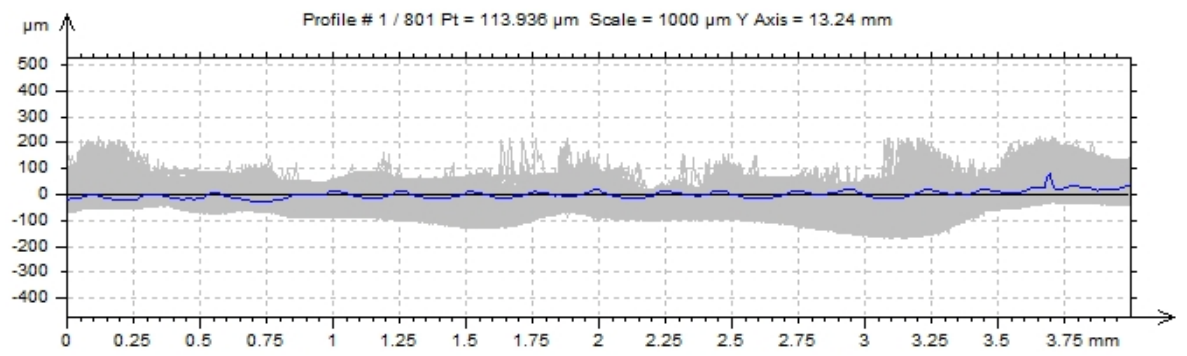
4B



4C



5A



## PŘÍLOHA P III: PARAMETRY DRSNOSTI POVRCHU

Grafické porovnání parametrů drsnosti povrchu

