

# Technologie laserového řezání

Filip Větršíšek

---

Bakalářská práce  
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Filip Větršísek**  
Osobní číslo: **T16532**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Technologie laserové řezání**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na dané téma
2. Provedte experimentální obrábění vybraných materiálů při změně technologických parametrů
3. Provedte statistické zpracování naměřených dat

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucí práce**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

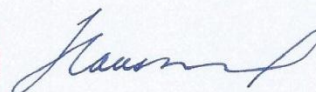
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2017**

Ve Zlíně dne 31. 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 užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, 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 26.5.2011

Větršíšek

---

<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**

Tato bakalářská práce se zabývá technologií řezání laserem. Práce popisuje stále více rozšířenou metodu řezání a její vliv na kvalitu řezné plochy. Teoretická část se zabývá historií laseru, principem laseru a dělením laserů. Praktická část zahrnuje výrobu kovových vzorků a popis zařízení. Cílem praktické části je zkoumání různých řezných podmínek a jejich vliv na drsnost povrchu řezné plochy. Konkrétně porovnává vliv řezné rychlosti, vliv tlaku plynu a vliv výkonu.

Klíčová slova: laser, technologie řezání, paprsek

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with laser cutting technology. The paper describes an increasingly widespread cutting method and its influence on the quality of the cutting surface. The theoretical part deals with the history of laser, the principle of laser and the division of lasers. The practical part involves the production of metal samples and a description of the equipment. The aim of the practical part is to examine various cutting conditions and their influence on the roughness of the cutting surface. Specifically, it compares the effect of cutting speed, the influence of gas pressure and the effect of power.

Keywords: laser, cutting technology, beam

Tímto bych rád poděkoval své vedoucí doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za odborné rady, vedení a její trpělivost. Za pomoc s měřením a statistickým zpracováním panu doc. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi. Dále firmě NERA DISPLAYS s. r. o. za umožnění výroby vzorků. A v neposlední řadě svým rodičům a přítelkyni za psychickou podporu.

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

Ve Zlíně, 26. 5. 2017

.....

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HISTORIE LASERU</b> .....	<b>11</b>
1.1 MASER .....	11
1.2 HISTORICKÝ VÝVOJ LASERU .....	11
<b>2 PRINCIP LASERU</b> .....	<b>13</b>
2.1 SCHÉMA LASERU .....	13
<b>3 ROZDĚLENÍ LASERŮ</b> .....	<b>14</b>
3.1 PODLE AKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ.....	14
3.1.1 Pevnolátkové .....	14
3.1.2 Plynové.....	14
3.1.3 Polovodičové.....	15
3.1.4 Kapalinové (barvivové).....	15
3.2 PODLE REŽIMU PRÁCE .....	15
3.3 PODLE EXCITACE (BUZENÍ).....	15
<b>4 KRITÉRIA HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU</b> .....	<b>16</b>
4.1 KUŤELOVITOST .....	16
4.2 DRSNOST POVRCHU .....	16
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>18</b>
<b>5 POPIS EXPERIMENTU</b> .....	<b>19</b>
5.1 CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	19
5.2 CHARAKTERISTIKA POUŽITÉHO ZAŘÍZENÍ.....	19
5.3 VÝROBA VZORKŮ .....	20
<b>6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU</b> .....	<b>22</b>
6.1 VZHLED ŘEZNÉ PLOCHY VZORKŮ .....	22
6.1.1 Snímky řezné plochy .....	22
6.2 VYHODNOCENÍ KUŤELOVITOSTI .....	35
6.3 VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	38
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>42</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>44</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>45</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>46</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>49</b>



## ÚVOD

Objev laseru patří mezi nejvýznamnější objevy dvacátého století, jelikož se využívá v mnoha různých oborech, např. v průmyslu, lékařství, astronomii, vojenství a v mnoha dalších. V této práci se zabývám využitím laseru v průmyslu, konkrétně ve strojírenství, ve kterém se využívá zejména k dělení kovových materiálů. Laserové řezání materiálů patří mezi nekonvenční metody obrábění, což znamená, že při obrábění nedochází k odebrání materiálu mechanicky, ale fyzikálně, chemicky nebo kombinací obojího. K řezání kovových materiálů se používají především plynové lasery a novější vláknové lasery, u kterých se jako asistenční plyn používá kyslík nebo dusík ve formě plynu. Tyto plyny zvyšují tepelné účinky a urychlují proces řezání. Výkony plynových a vláknových laserů dosahují až 20 kW. Mezi výhody těchto laserů patří především velká rychlost, velká přesnost, možnost automatizace a bezkontaktnost s obrobkem. Nevýhodami jsou vysoké pořizovací a provozní náklady, omezení tloušťkou materiálu, značné zahřívání dílů z tlustších materiálů.

V praktické části mé práce se zabývám výrobou zkušebních vzorků, na kterých je poté zkoumána kvalita řezné plochy. U jednotlivých vzorků jsou měněny řezné podmínky a je vyhodnocována kvalita povrchu na základě drsnosti povrchu ve dvou měřených oblastech. Cílem je nalezení optimálních řezných podmínek pro dané zařízení a materiál.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 HISTORIE LASERU

Laser je významný objev, který našel své uplatnění v mnoha oblastech lidského života. Laser byl poprvé fyzikálně popsán už v roce 1917 asi nejznámějším fyzikem všech dob Albertem Einsteinem v jeho kvantové teorii záření. Slovo LASER vzniklo spojením prvních písmen z anglického názvu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Tento název by se dal přeložit jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Předchůdcem laseru je tzv. maser. [1]

### 1.1 Maser

Název maser, podobně jako laser, vznikl spojením prvních písmen z anglického názvu *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Tento název byl později upraven na *Molecular Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, protože vyjadřuje využití maseru i pro generování a zesilování elektromagnetického záření o různých vlnových délkách a ne pouze pro mikrovlnné záření.

V roce 1952 popsali princip maseru Nikolaj Basov a Alexander Prochorov, o rok později Charles H. Townes s pomocí svých studentů sestavil první funkční čpavkový maser. Roku 1956 byl sestaven vysoce výkonný třístupňový krystalový maser Nicolaasem Bloembergenem a v roce 1960 sestavil Norman F. Ramsey první vodíkový maser.

### 1.2 Historický vývoj laseru

1917 – A. Einstein předpověděl existenci stimulované emise.

1939 – V. A. Fabrikant přišel s myšlenkou využití stimulované emise k zesilování elektromagnetického záření.

1951 – Registrace patentu na metodu zesilování elektromagnetického záření pomocí prostředí – V. A. Fabrikant, M. M. Vudynský a F. A. Butajevová.

1952 – zesilování záření v mikrovlnné oblasti pomocí stimulované emise v maseru – N. G. Basov a A. M. Prochorov.

1954 – Sestavení prvního molekulárního generátoru.

1955 – navržení optického buzení – N. G. Basov a A. M. Prochorov.

1957 – N. G. Basov realizoval optický rezonátor s leštěnými paralelními stěnami. – V. A. Fabrikant a F. A. Butajevová pozorovali zesílení optického záření u elektrického výboje, který procházel směsí par rtuti, vodíku a helia.

1958 – A. M. Prochorov, Schawlow a Townes nezávisle na sobě vysvětlili hypotézu, že stimulovaná emise může být použita i v oblasti ultračerveného světla.

1960 – T. Maiman vyleštil koncové stěny krystalu umělého rubínu, nanesl na ně tenkou vrstvičku stříbra (funkce zrcadla) a vytvořil tak první nedokonalý rubínový laser. – A. Javan, W. R. Bennett a D. R. Herriott ukázali laserové záření i ve směsi plynů helia a neonu. – Zkonstruován první vodíkový maser.

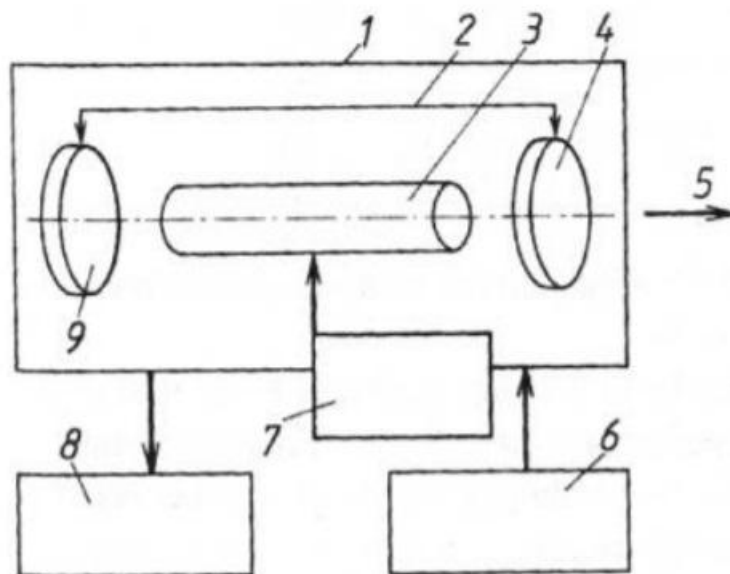
1962 – R. Hall sestrojil první polovodičový laser. – V Československu první maser.

1963 – V Československu první laser. [2]

## 2 PRINCIP LASERU

Princip laseru spočívá ve stimulované emisi. K stimulované emisi dochází dopadem fotonu (záření) na atom. Elektron, obíhající jádro atomu, pohltí energii fotonu a excituje (přesune se) na vyšší oběžnou dráhu (energetickou hladinu). Foton musí mít energii potřebnou k přesunu elektronu na vyšší energetickou hladinu. Atom dále přijímá energii a elektron je přinucen rovnováhou sil vyzářit energii a vrátit se na původní oběžnou dráhu. Tato vyzářená energie ve formě fotonů má přesnou vlnovou délku, záření je monochromatické a fotony se pohybují ve svazku jedním směrem a jsou pravidelně uspořádány. [3]

### 2.1 Schéma laseru



Obr. 1. Schéma laseru[3]

- 1 – laserová hlavice
- 2 – rezonátor
- 3 – laserové medium
- 4 – polopropustné sklo
- 5 – výstup paprsku
- 6 – zdroj energie buzení
- 7 – budicí zařízení
- 8 – chlazení
- 9 – nepropustné zrcadlo

## 3 ROZDĚLENÍ LASERŮ

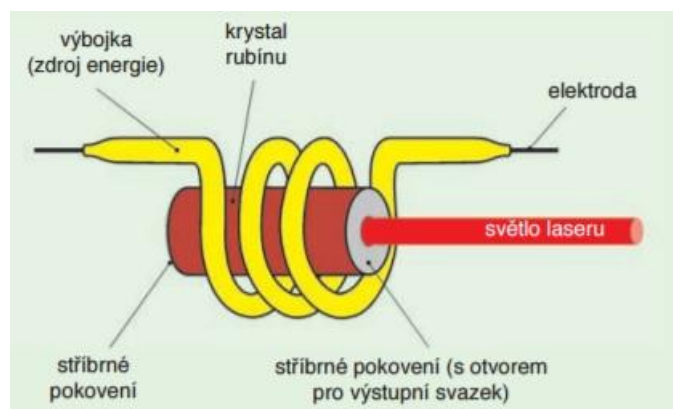
### 3.1 Podle aktivního prostředí

#### 3.1.1 Pevnolátkové

Aktivní prostředí je tvořeno krystalickými nebo amorfními izolanty. Jsou stabilní a pracují v rozsahu infračerveného až viditelného světla. Tyto lasery mohou být vláknové, diskové nebo polovodičové.

Druhy pevnolátkových laserů:

- Rubínový laser
- Neodymový laser
- Erbiový laser
- Titan-safírový laser
- Alexandritový laser



Obr. 2. Schéma pevnolátkového laseru[4]

#### 3.1.2 Plynové

Pracují v širokém rozsahu vlnových délek. Díky homogennímu aktivnímu prostředí mají výborné parametry, ale malý výkon.

- Atomární (helium-neonový, měděný, jodový, xenonový)
- Molekulární (vodíkové, CO<sub>2</sub>, CO, dusíkové, excimerové)
- Iontové (argonové, helium-kadmiové)

### 3.1.3 Polovodičové

Všeobecně nejpoužívanější lasery. Nejrozšířenějším typem je GaAs, který obsahuje krystal arsenidu gallitého. Polovodičové lasery se vyznačují snadnou regulací výkonu. Jejich nevýhodou je velká rozbíhavost.

### 3.1.4 Kapalinové (barvivové)

U těchto laserů je nejčastějším aktivním prostředím alkoholový nebo vodný roztok organického barviva. Hlavní výhodou kapalinových laserů je plynulá změna vlnové délky světla. Nevýhodou je rychlý rozpad aktivního prostředí vlivem tepla a světla.

## 3.2 Podle režimu práce

- a) kontinuální
- b) pulzní
- c) kvazikontinuální

## 3.3 Podle excitace (buzení)

- a) optickým zářením
- b) elektrickým polem
- c) chemickou reakcí
- d) termodynamicky [5]

## 4 KRITÉRIA HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU

### 4.1 Kuželovitost

Kuželovitost je ovlivněna hlavně řeznými podmínkami a dále tloušťkou materiálu a délkou paprsku. Při průchodu paprsku materiálem se paprsek oslabuje a dochází k jeho odklonu od vlastní osy. Pro výpočet kuželovitosti, byly měřeny hrany vzorků na vstupu a výstupu paprsku a z jejich rozdílů byla určena kuželovitost. Měření bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřítka Festa s rozlišitelností 0,01 mm.

Vztah pro výpočet kuželovitosti:

$$\varphi = \frac{\left[ \tan^{-1} \cdot \left( \frac{l_{vstup} - l_{výstup}}{h} \right) \right]}{2}$$

kde:

$\varphi$  – kuželovitost [°]

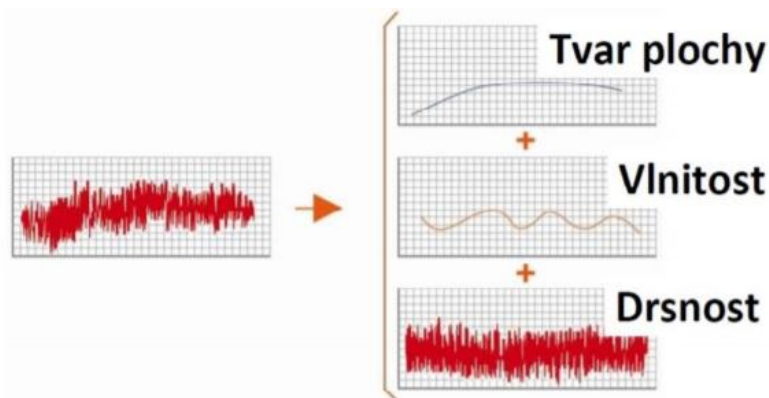
$l_{vstup}$  – délka hrany na vstupu laseru [mm]

$l_{výstup}$  – délka hrany na výstupu laseru [mm]

$h$  – tloušťka materiálu

### 4.2 Drsnost povrchu

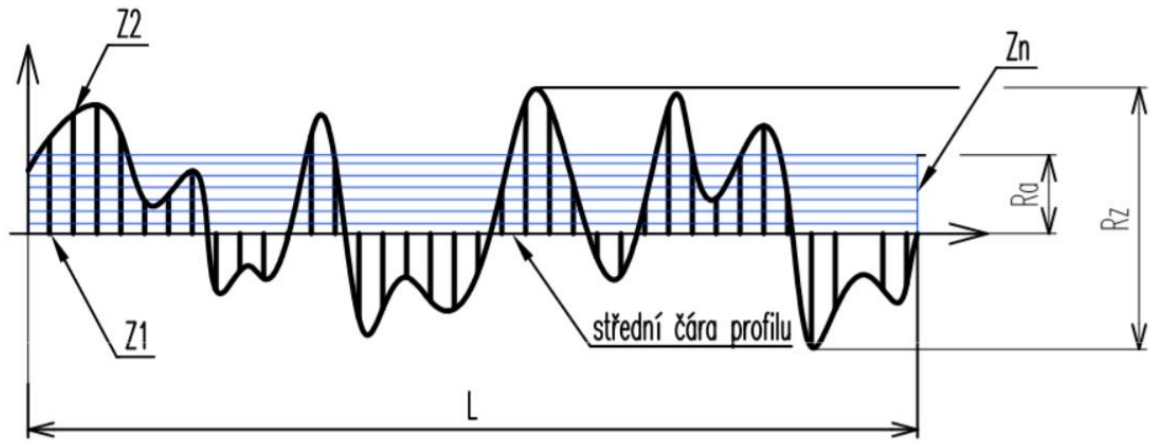
Každá technologie obrábění zanechává na obrobené ploše materiálu stopu (nerovnosti). Správná jakost povrchu zajišťuje spolehlivost a dlouhou životnost součástí. Existují tři části funkčního povrchu součástí, které odlišuje vlnová délka. Určuje se podle způsobu obrábění, vzhledu a hloubky stop po nástroji.



Obr. 3. Obecný povrch[6]



Nejpoužívanější parametry drsnosti:



Obr. 4. Znárodnění  $Ra$  a  $Rz$ [7]

Průměrná aritmetická úchylka –  $Ra$

Jedná se o střední hodnotu vzdálenosti bodu zjišťovaného profilu od střední čáry v délce měřeného úseku.

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| = \frac{|z_1| + |z_2| + |z_3| + \dots + |z_n|}{n}$$

Maximální úchylka –  $Rz$

Součet výšky nejvyššího bodu profilu a hloubky nejnižší bodu profilu v délce měřeného úseku. [7]

$$Rz = z_{max} - (z_{min})$$

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 POPIS EXPERIMENTU

### 5.1 Cíl praktické části

- výroba vzorků
- určení kuř elovitosti vzorků
- zkoumání vlivu řezných podmínek na kvalitu řezné plochy
- určení optimálních řezných podmínek

### 5.2 Charakteristika použitého zařízení

#### CNC vláknový řezací laser – NESSAP GAMA 3015FL



*Obr. 5. NESSAP GAMA 3015FL*

Jde o vláknový laser, u něhož výrobce klade důraz na úsporu elektrické energie. Tento model řezacího laseru slouží k řezání z tabulí plechu. Výkon 2000 W je dostačující pro řezání konstrukčních ocelí do tloušťky 12 mm. Dále je možné řezání pozinkovaných a nerezových plechů, mosazi, slitin mědi a hliníku, různých druhů plastů a pryže. Zařízení je vybaveno dvěma vyměnitelnými stoly, což zrychluje výrobu. Pohon řezací hlavy zajišťují servomotory. Řezací hlava je během chodu stroje monitorována kamerou a obraz je přenášen na obrazovku řídicího panelu. [8]

**Technické parametry:**

Typ rezonátoru: Ytterbium Fiber Laser YLS

Výkon: 2kW

Pracovní plocha stolu: 3000x1500 mm

Přesnost řezání: +/- 0,1 mm

Šířka spáry řezu: 0,1 - 0,6 mm dle materiálu

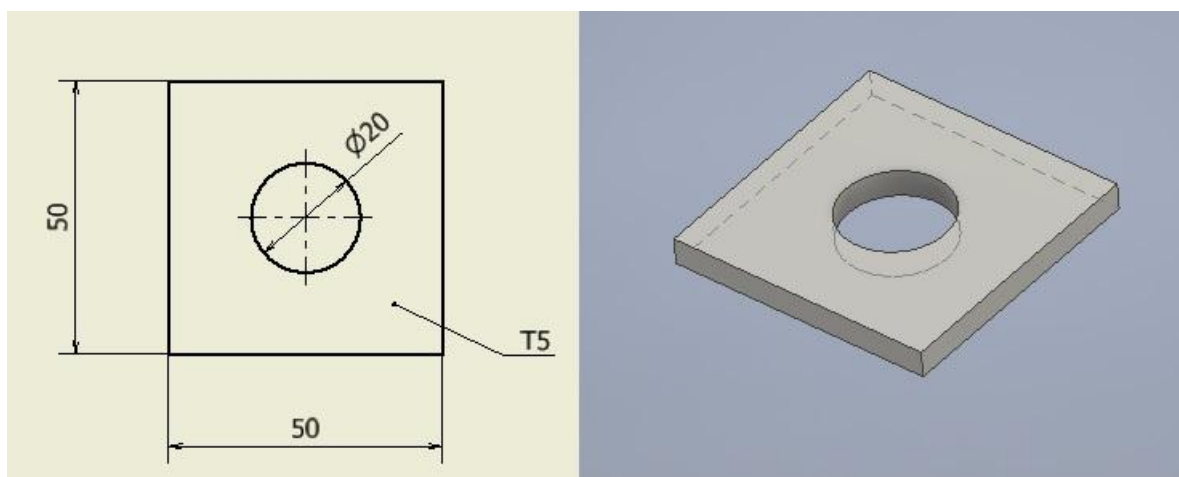
Max. hmotnost polotovaru: 450 kg

Max. tloušťka řezaného materiálu:

- konstrukční ocel 12 mm
- nerezová ocel 6 mm
- mosaz 4 mm
- měděné slitiny 3 mm
- hliníkové slitiny 5 mm [8]

**5.3 Výroba vzorků**

Před samotnou výrobou vzorků bylo laserové zařízení vyčištěno a kalibrováno, aby nedocházelo k výrobě nekvalitních vzorků a aby kvalita řezné plochy nebyla ovlivněna nečistotami a vlivy. Jako materiál pro výrobu vzorků byla zvolena konstrukční ocel 11 375. Rozměry vzorků byly 50x50x5 mm.



Obr. 6. Vzorek

Vzorky byly řezány ve třech sériích, přičemž v každé sérii se měnil vždy jen jeden parametr řezání.

Série A – změna řezné rychlosti

Série B – změna výkonu laseru

Série C – změna tlaku plynu

Základní technologie řezání:

Počet propalů:	120	-
Typ plynu:	O <sub>2</sub>	-
Tlak plynu v propalu:	1	bar
Tlak plynu v řezu:	1,05	bar
Vzdálenost ohniska:	1,6	mm
Průměr trysky:	0,8	mm
Výkon v propalu:	2000	W
Výkon v řezu:	2000	W
Řezná rychlost:	2000	mm/min

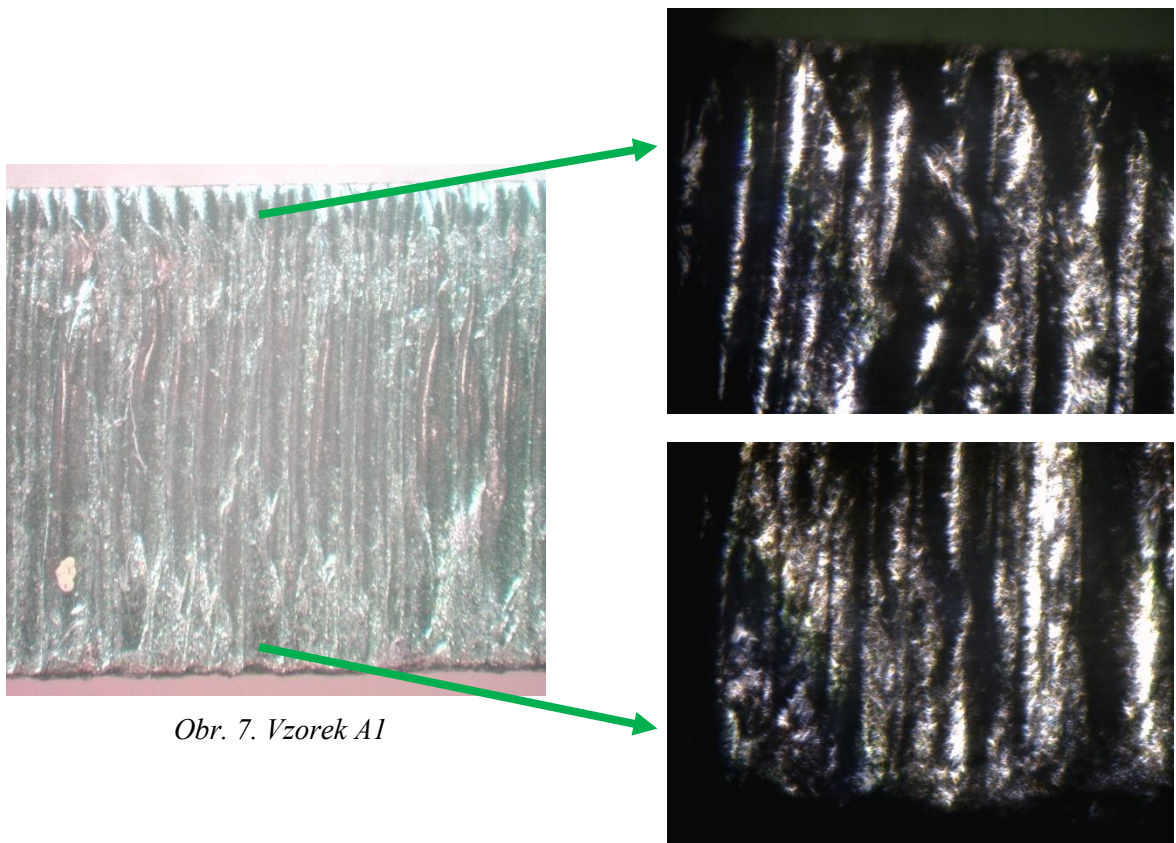
## 6 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

### 6.1 Vzhled řezné plochy vzorků

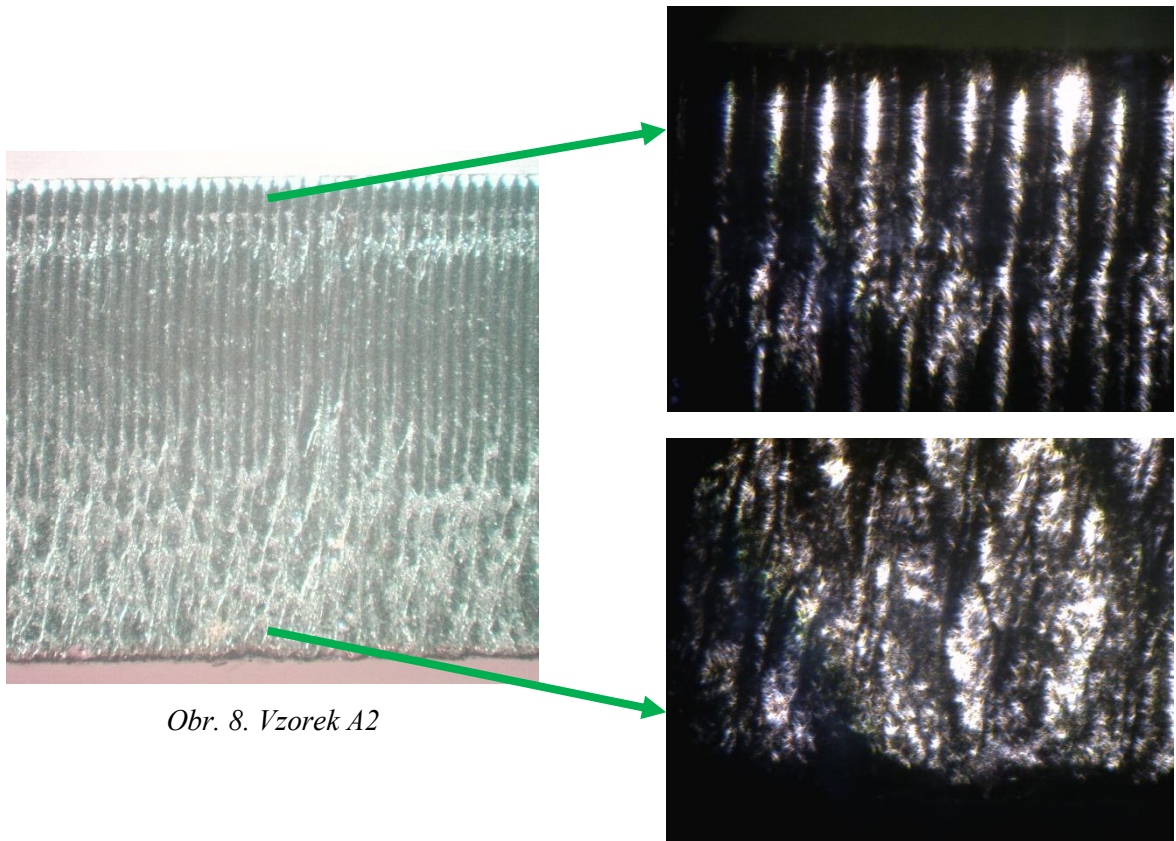
Vzhled řezné plochy byl snímán za pomoci mikroskopu Carl Zeiss Jena, na kterém byla umístěna kamera propojená s PC. Fotografie byly pořízeny se zvětšením 50x a 200x. Jako zdroj světla byla použita diodová lampa. Nejprve byla snímána celá tloušťka řezné plochy a poté byly pořízeny snímky na vstupu paprsku do materiálu a výstupu z materiálu.

#### 6.1.1 Snímky řezné plochy

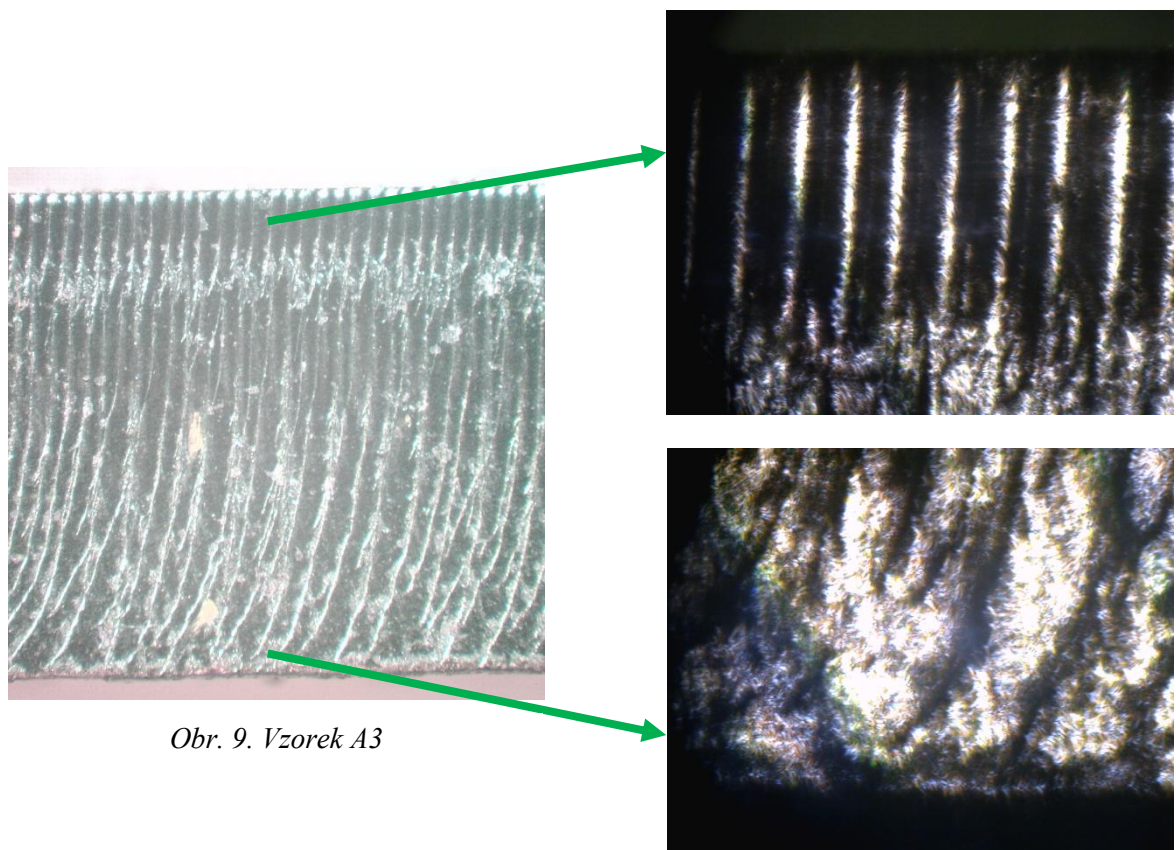
- a) Série vzorků A – změna řezné rychlosti



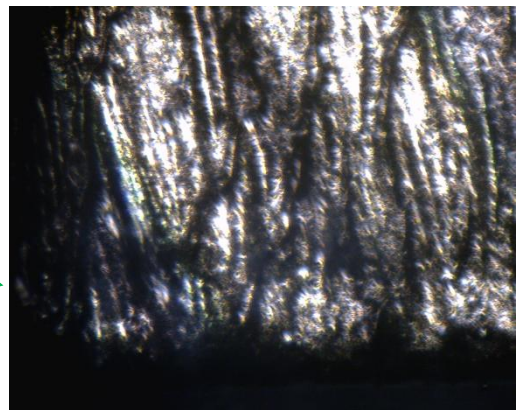
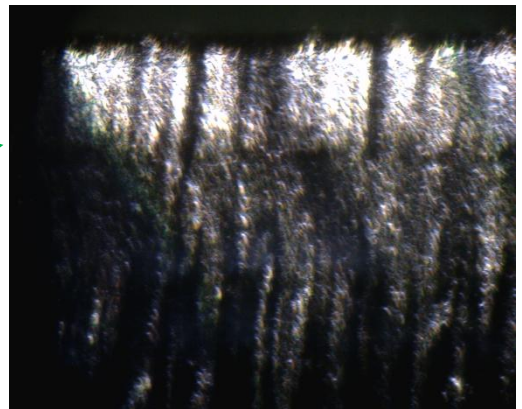
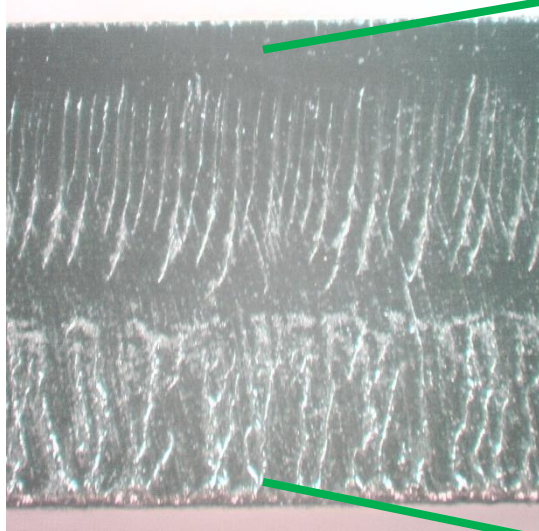
Obr. 7. Vzorek A1



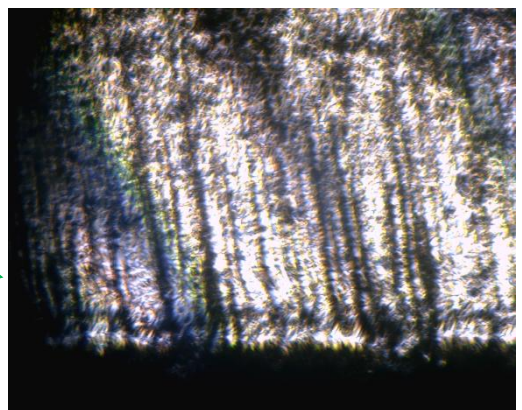
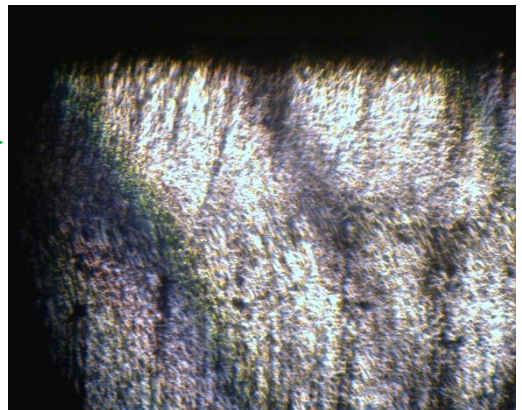
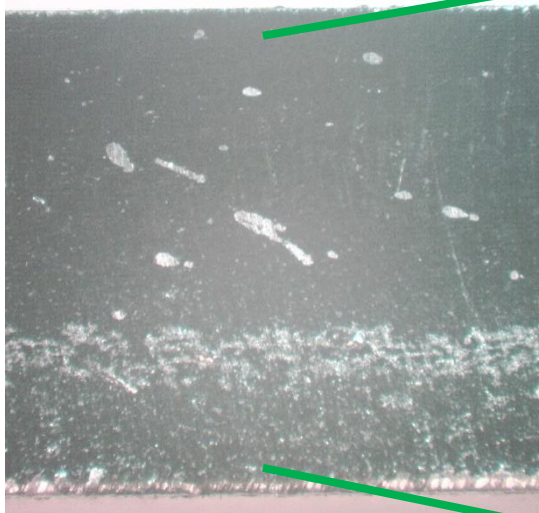
*Obr. 8. Vzorek A2*



*Obr. 9. Vzorek A3*

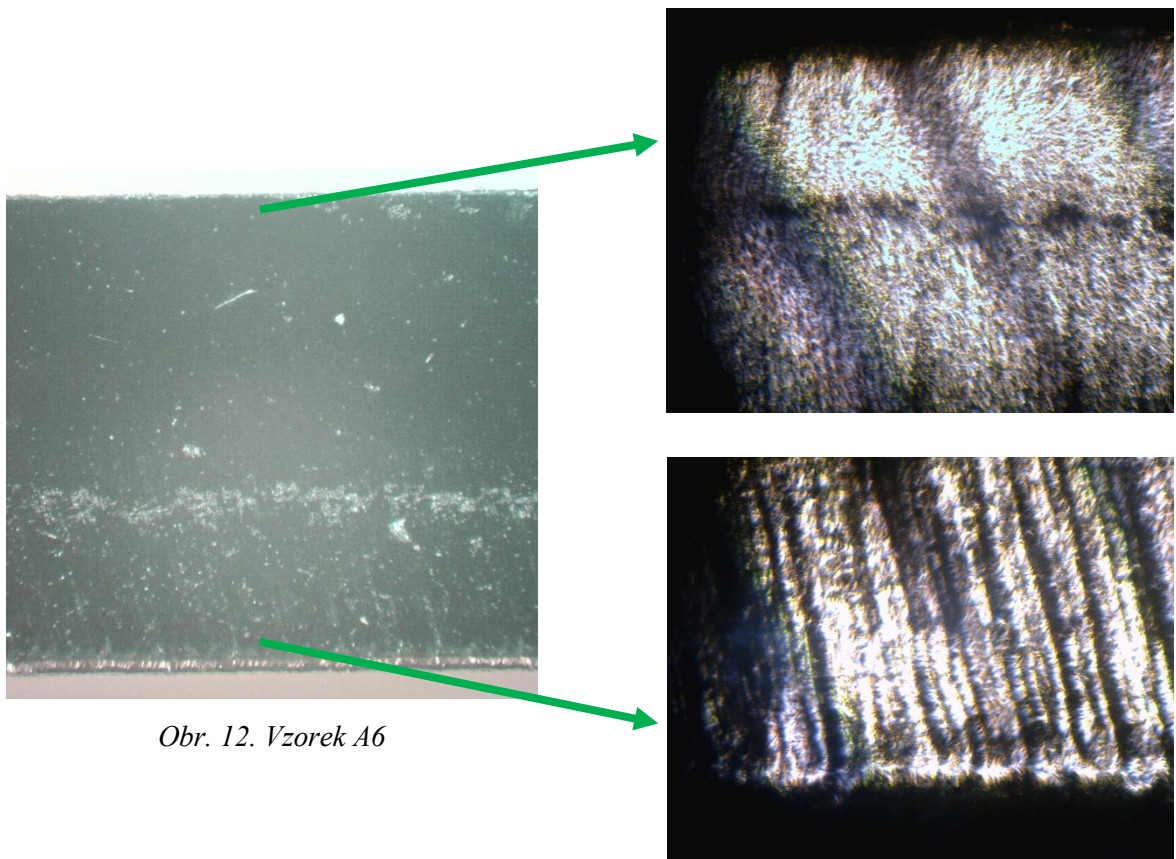


Obr. 10. Vzorek A4



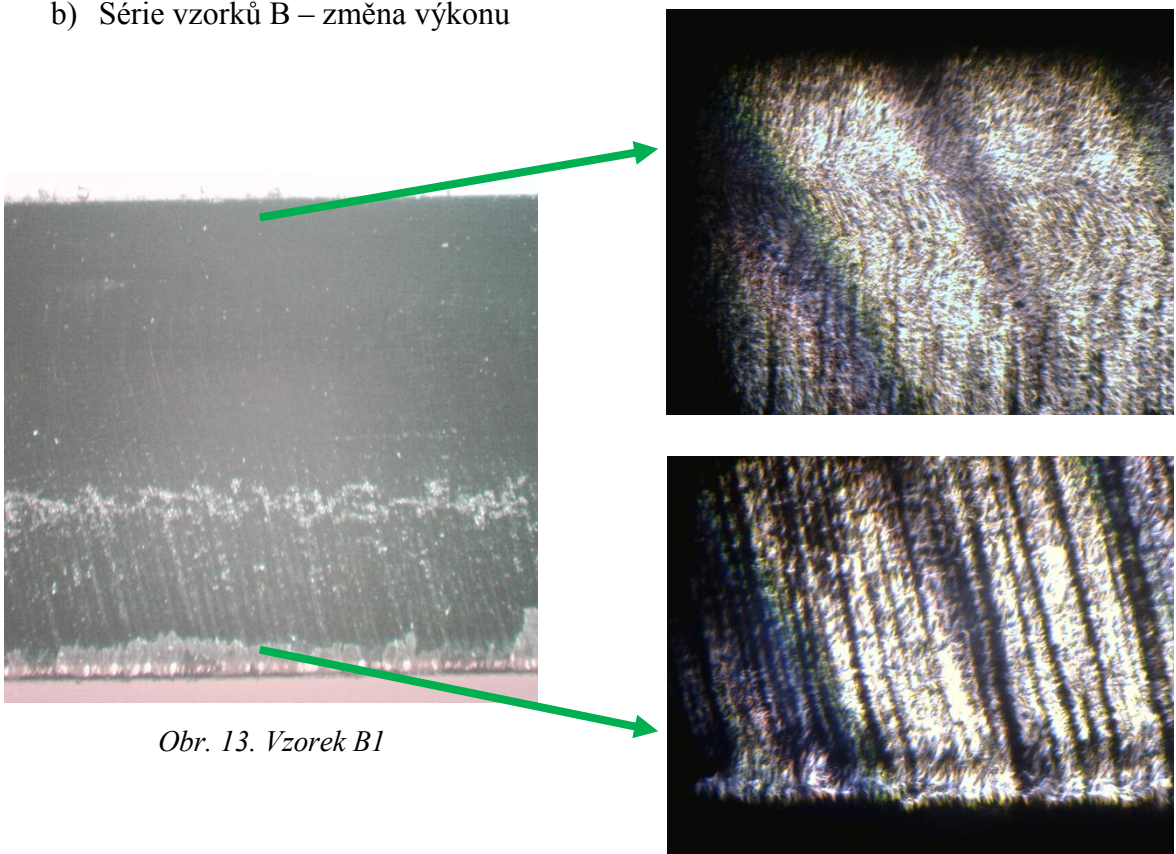
Obr. 11. Vzorek A5



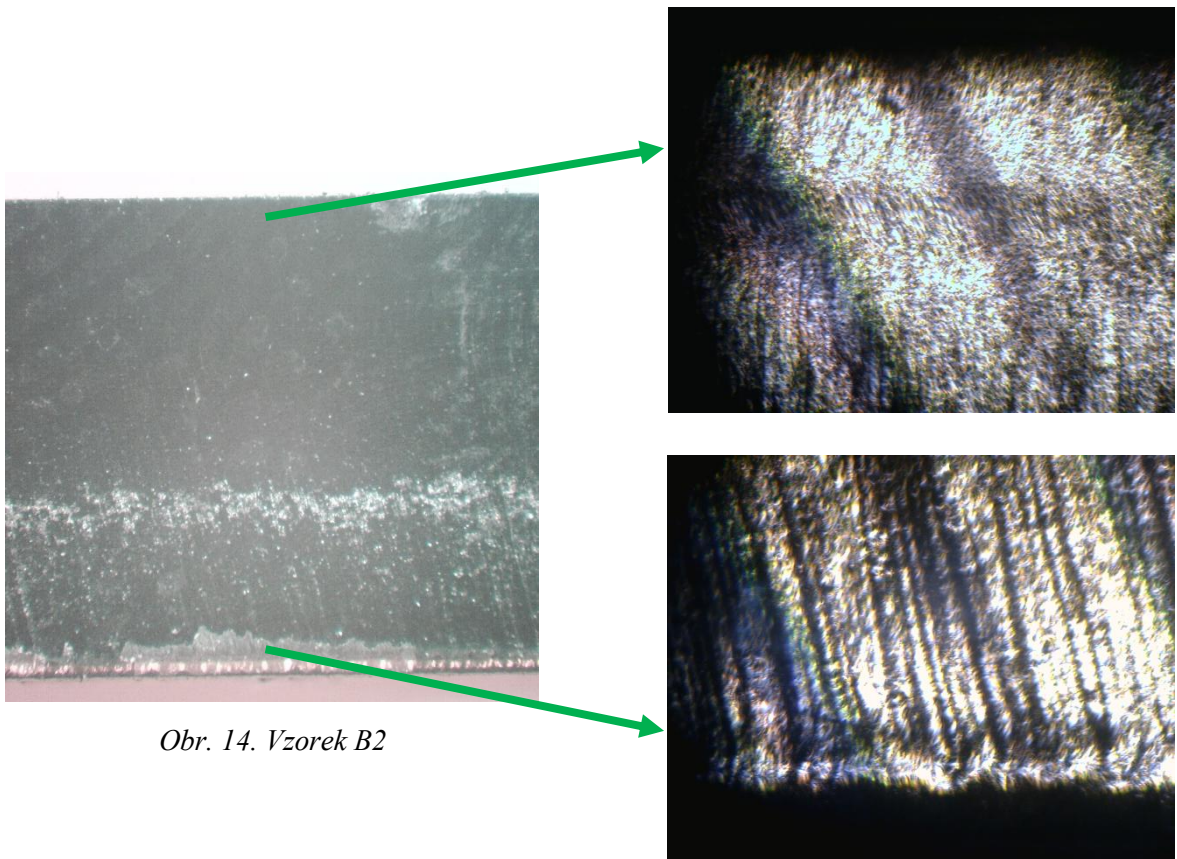


Obr. 12. Vzorek A6

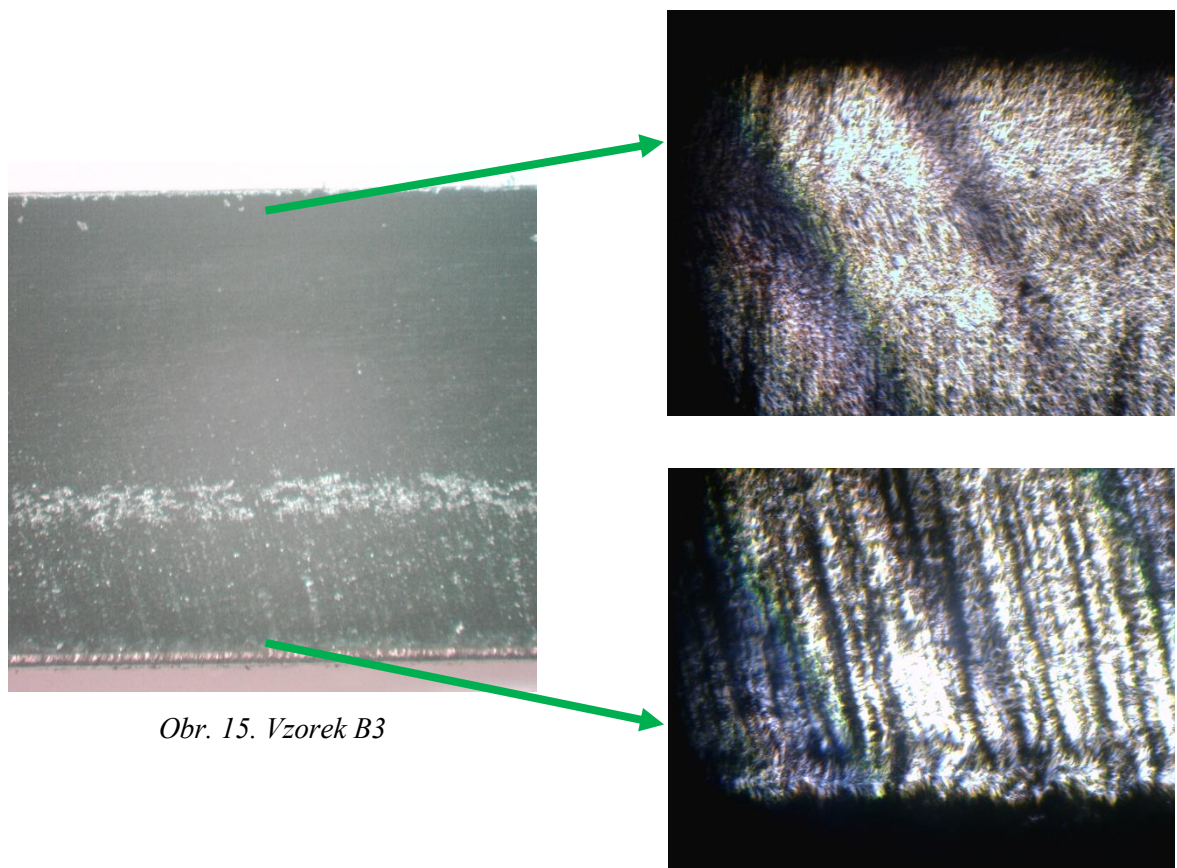
b) Série vzorků B – změna výkonu



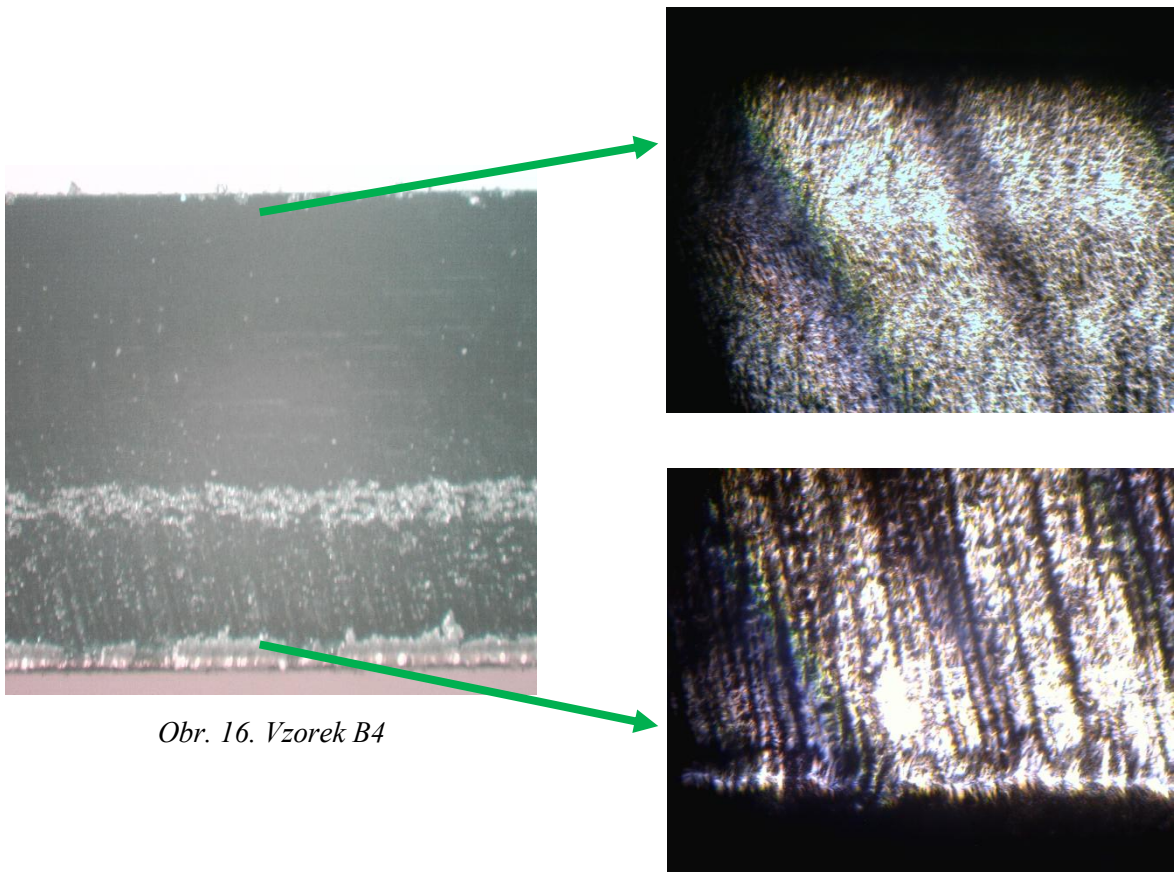
Obr. 13. Vzorek B1



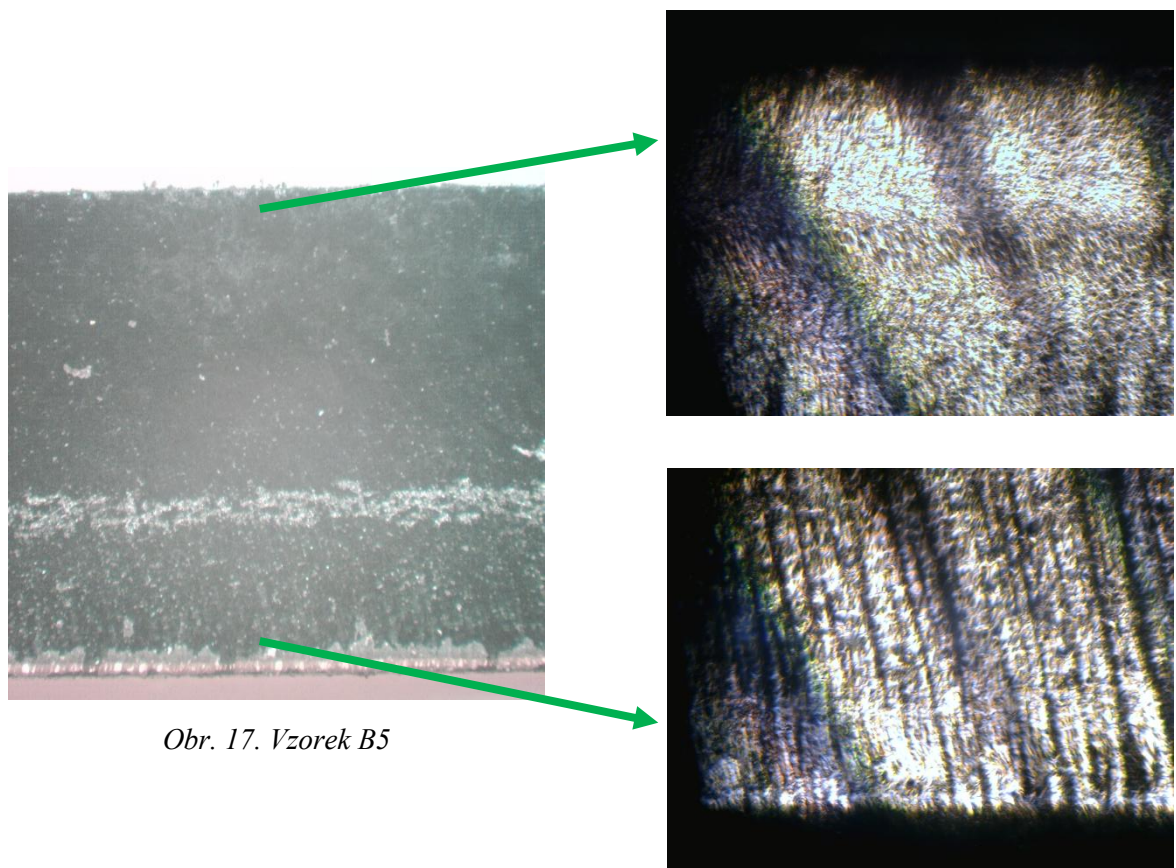
Obr. 14. Vzorek B2



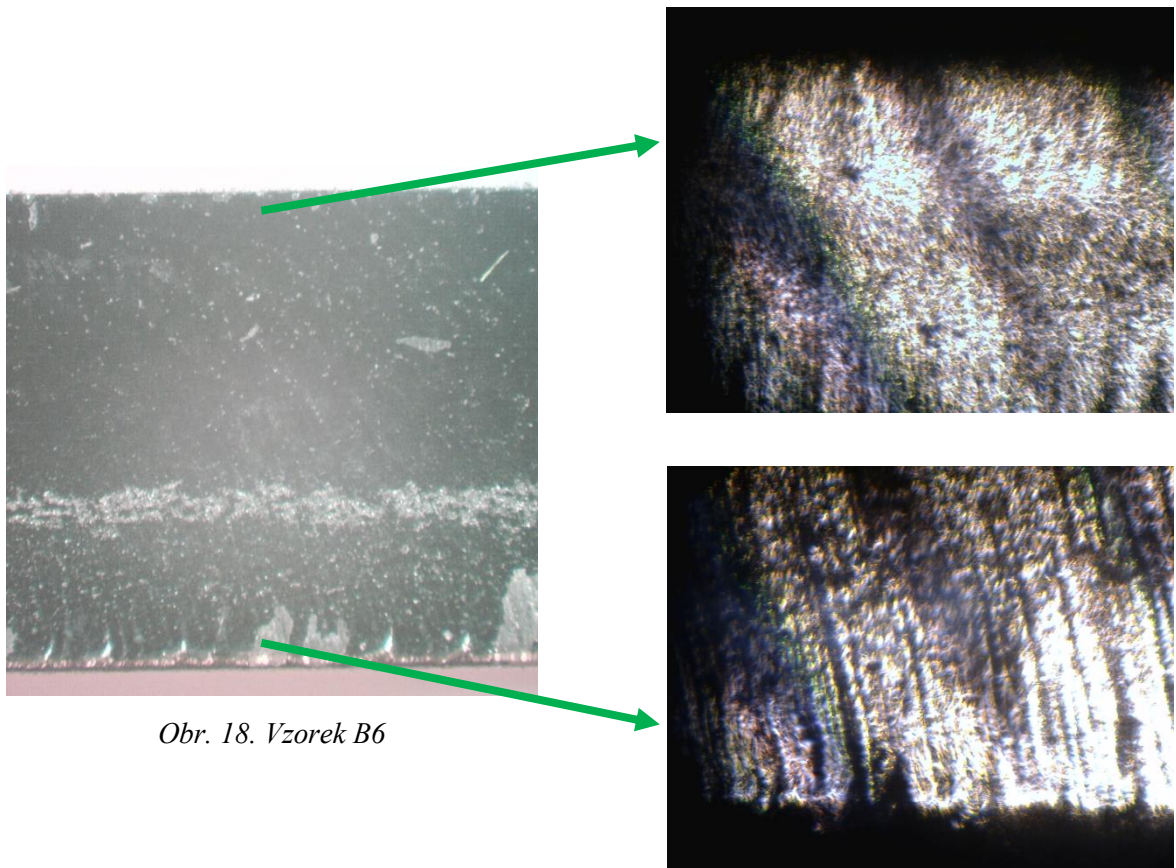
Obr. 15. Vzorek B3



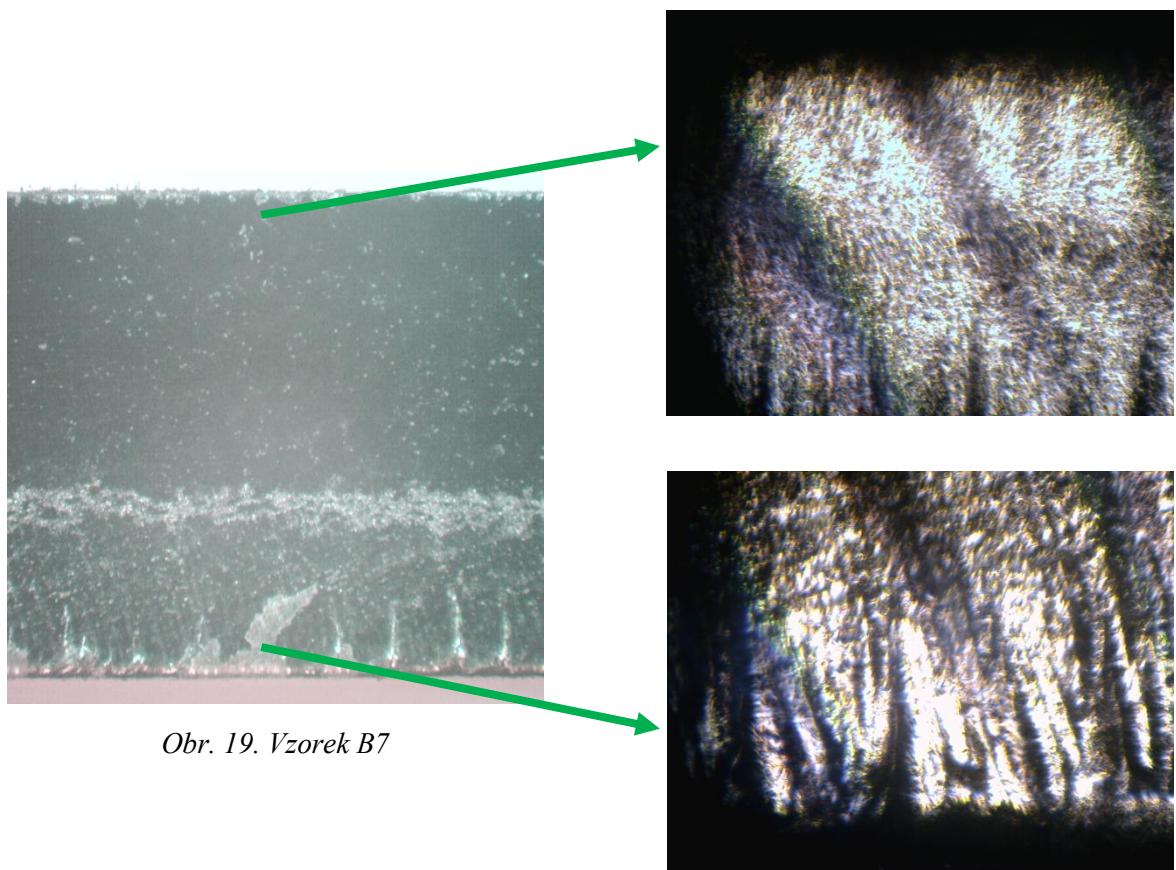
*Obr. 16. Vzorek B4*



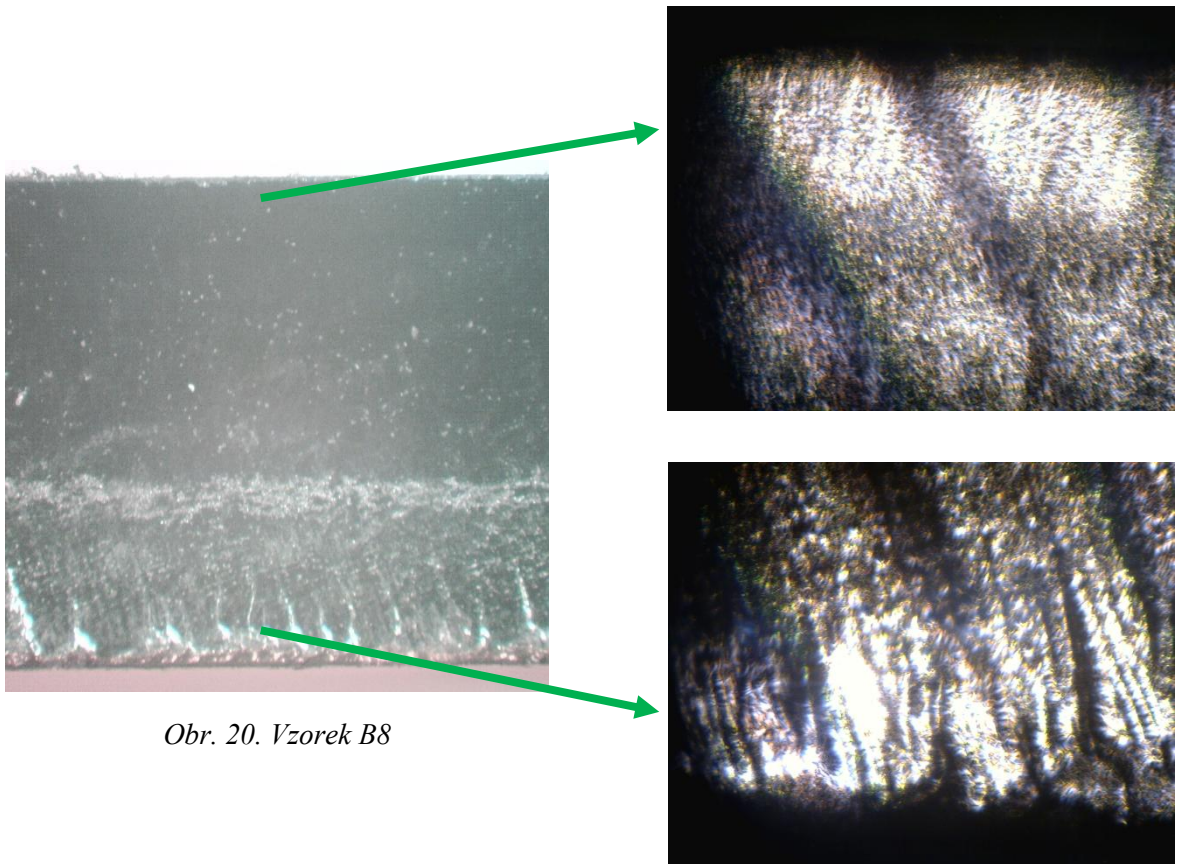
*Obr. 17. Vzorek B5*



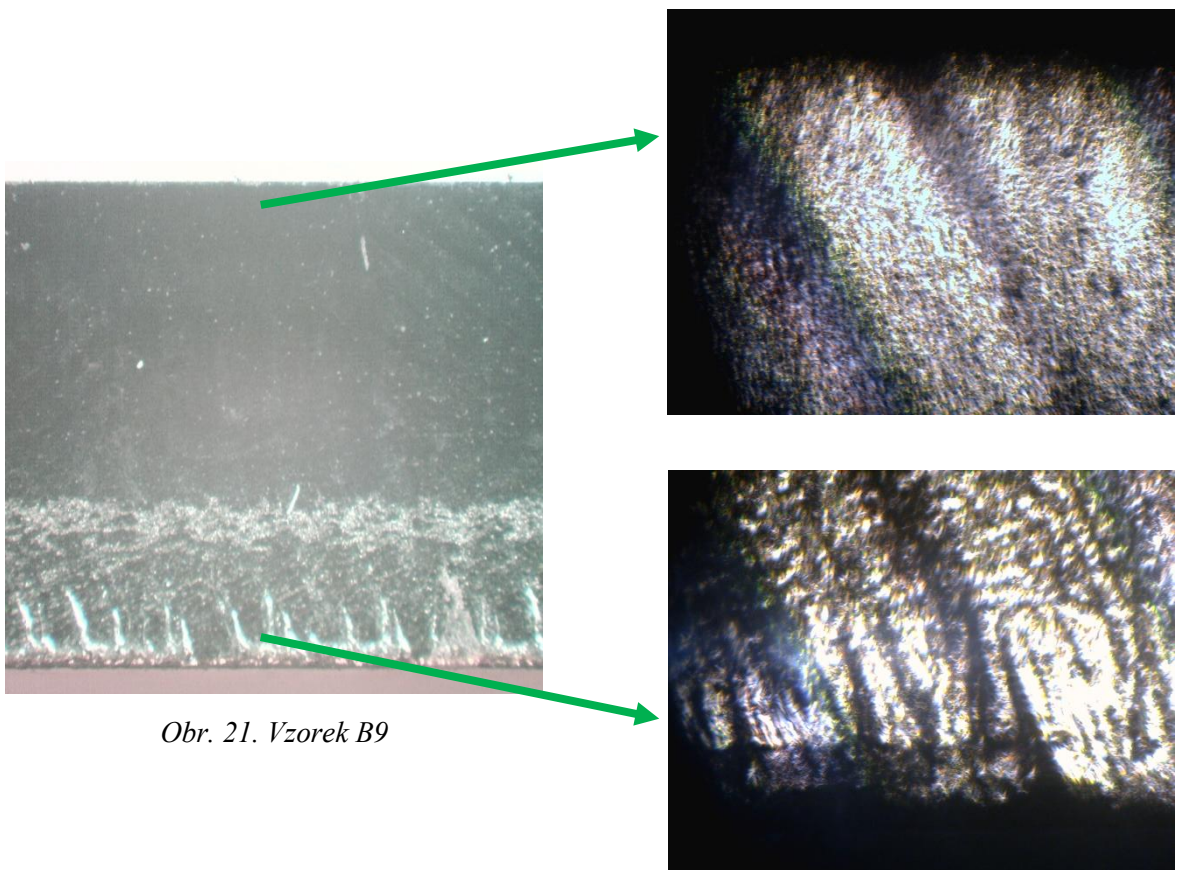
Obr. 18. Vzorek B6



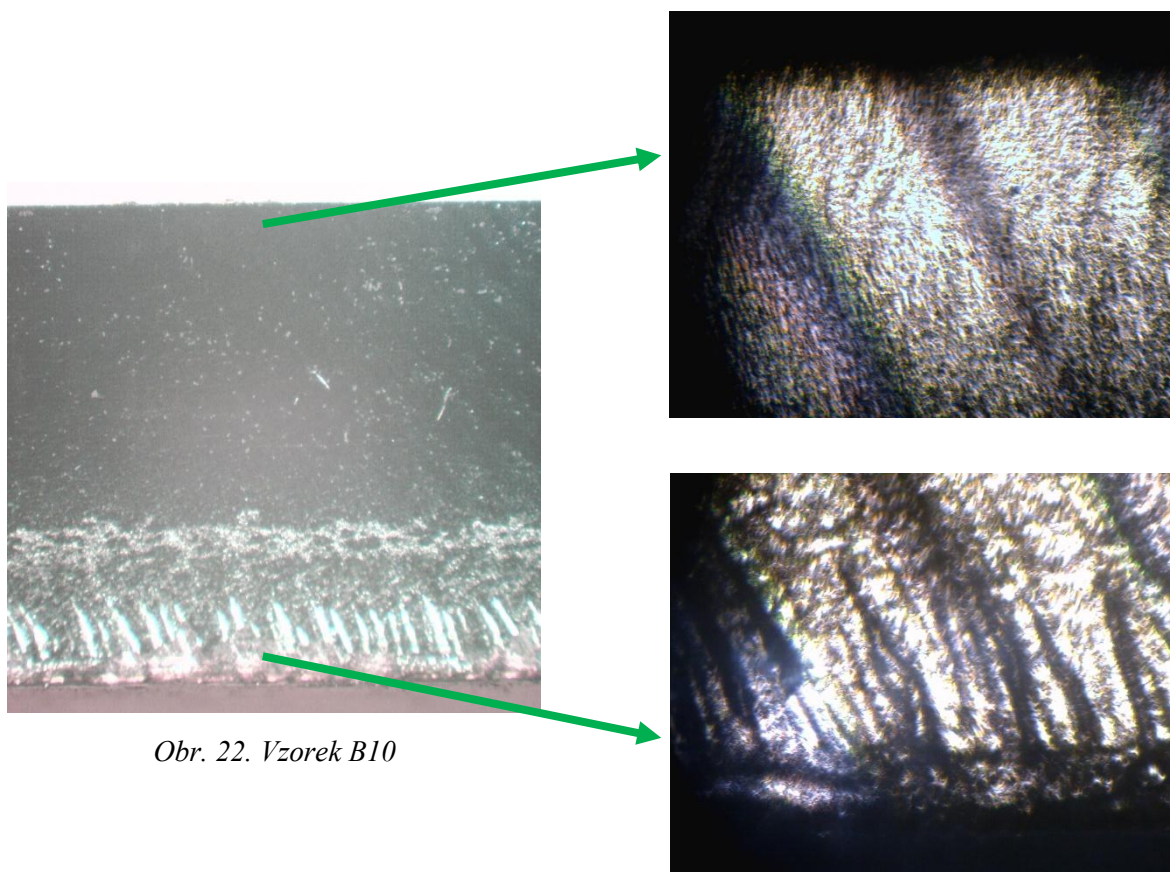
Obr. 19. Vzorek B7



Obr. 20. Vzorek B8

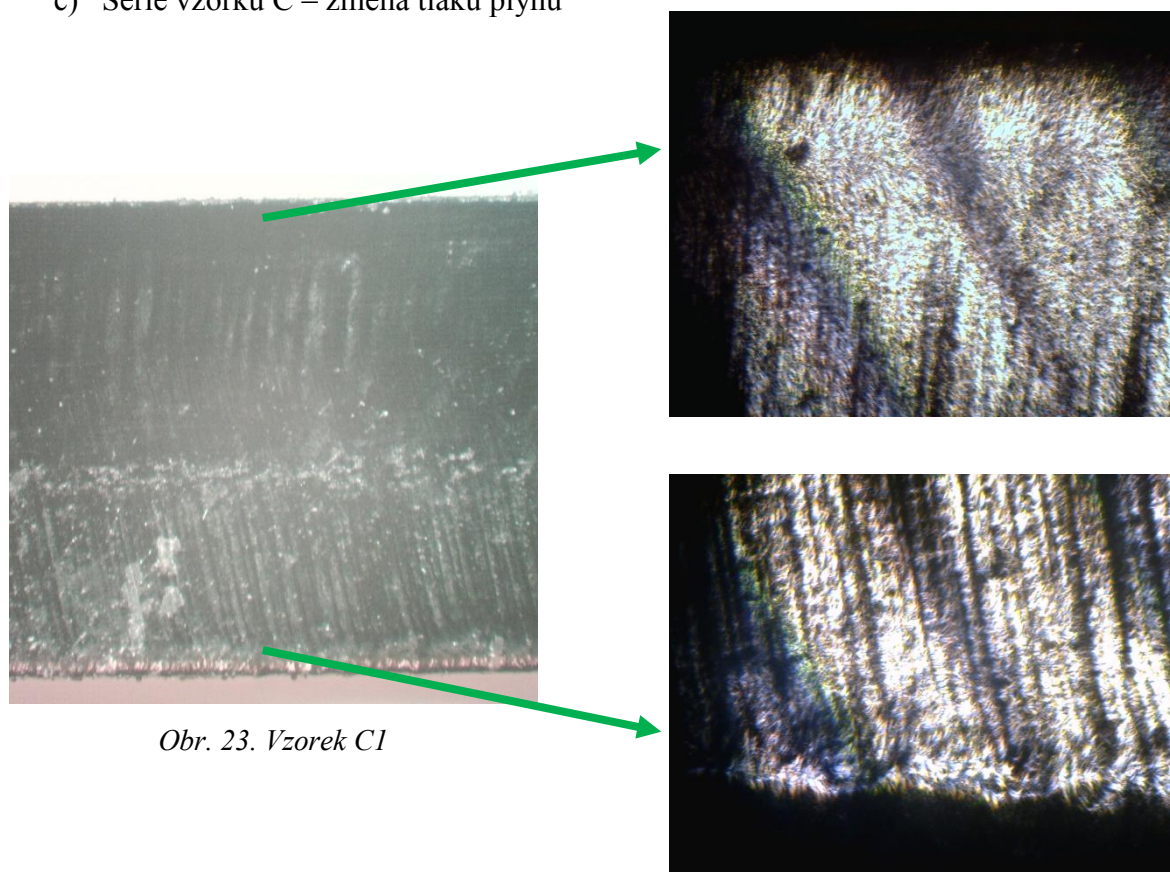


Obr. 21. Vzorek B9

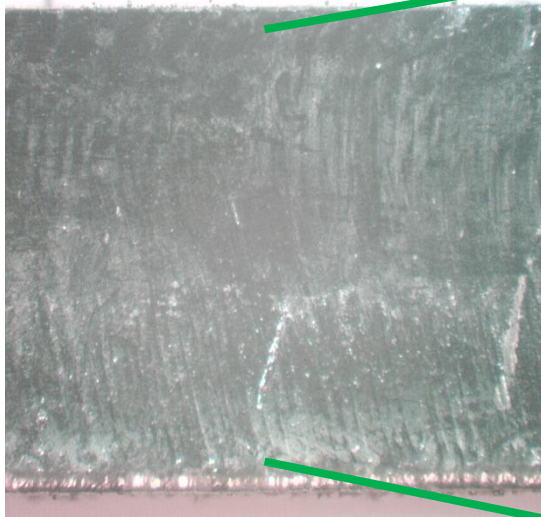


Obr. 22. Vzorek B10

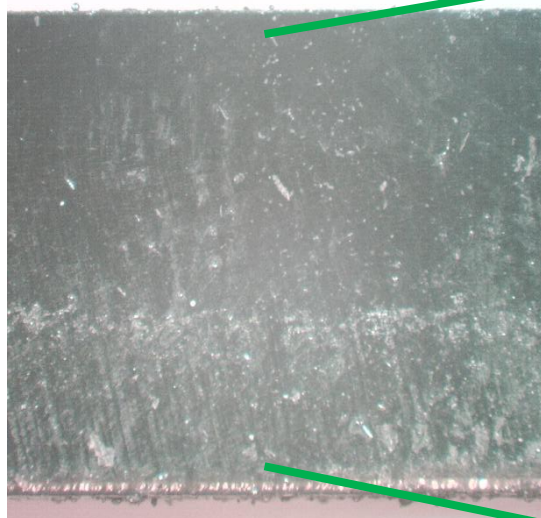
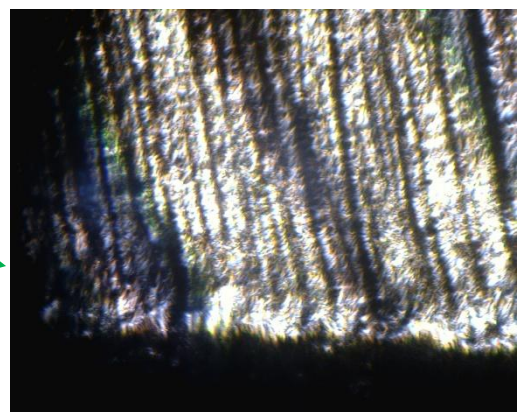
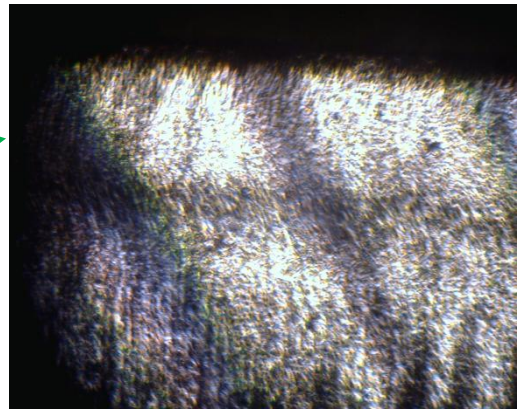
c) Série vzorků C – změna tlaku plynu



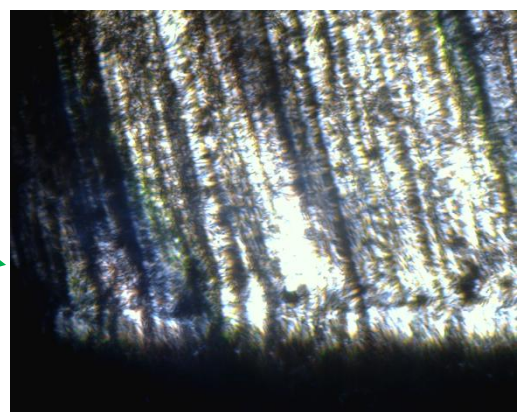
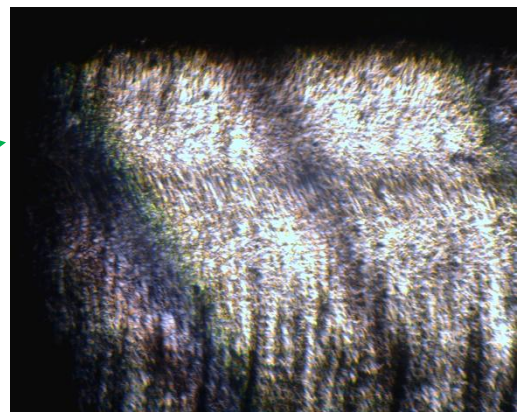
Obr. 23. Vzorek C1

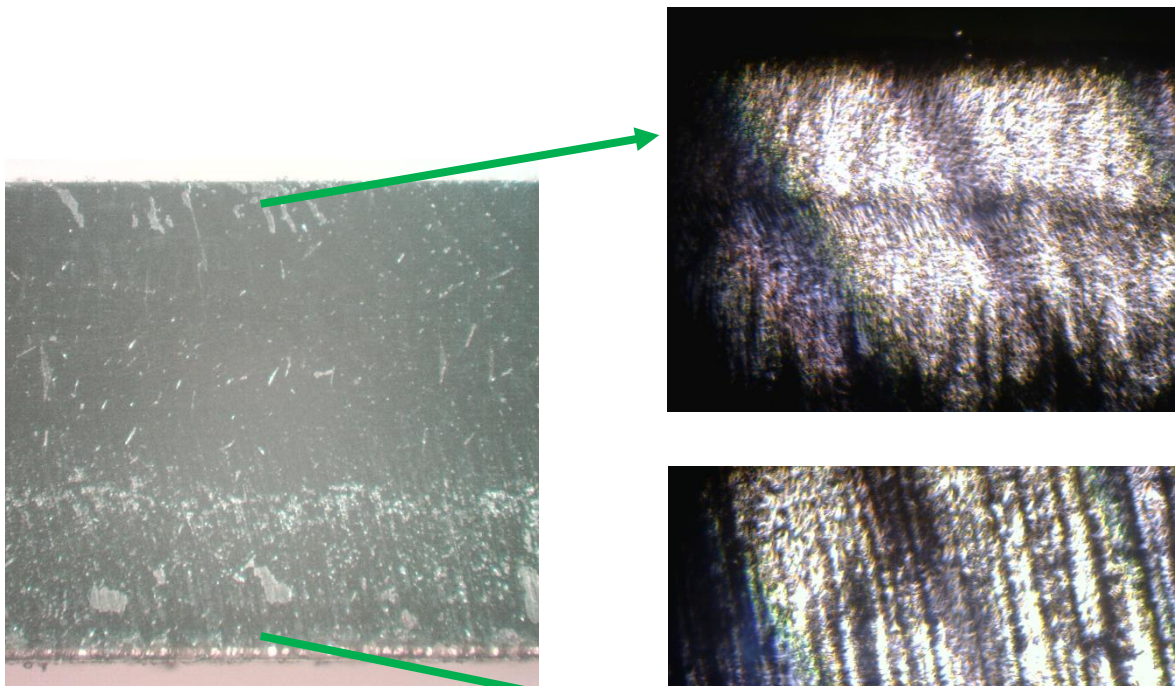


Obr. 24. Vzorek C2

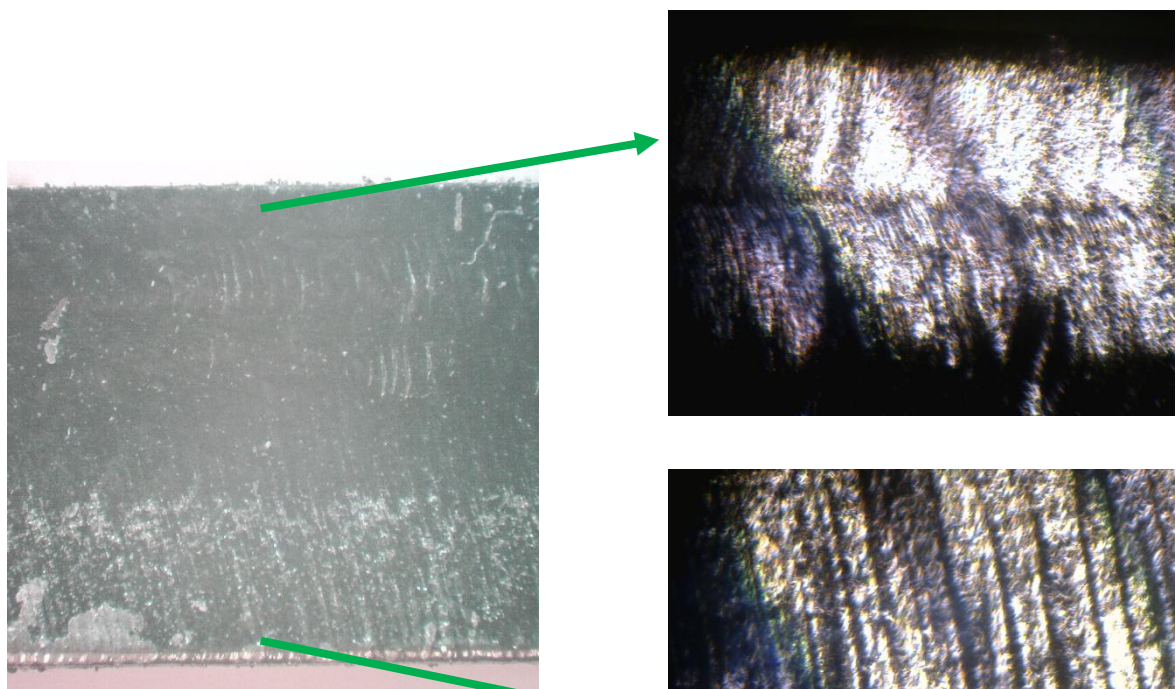


Obr. 25. Vzorek C3



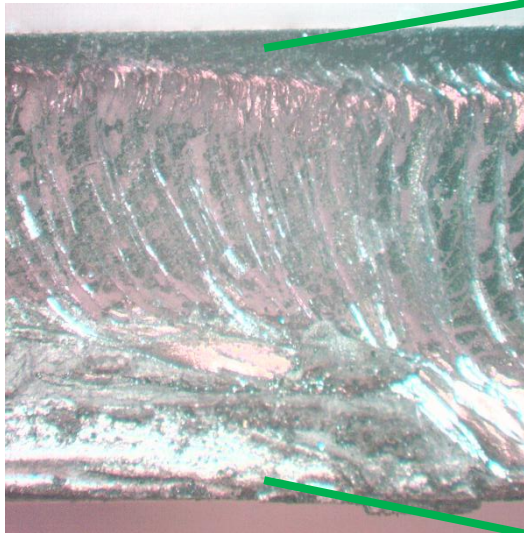


Obr. 26. Vzorek C4

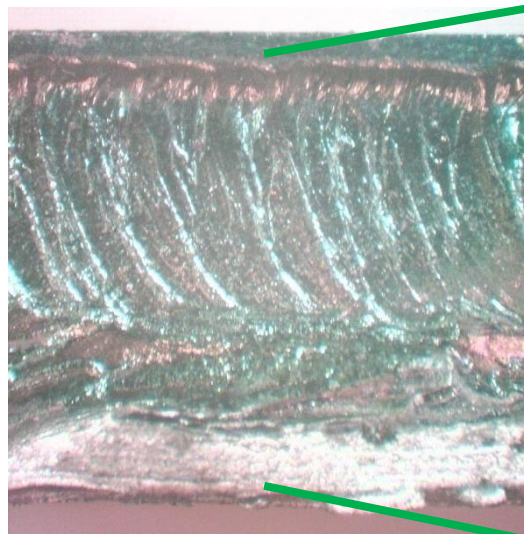
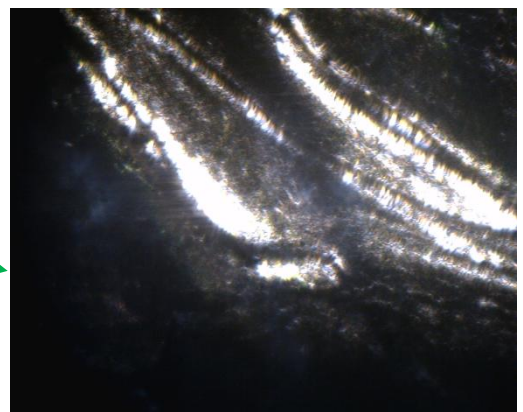
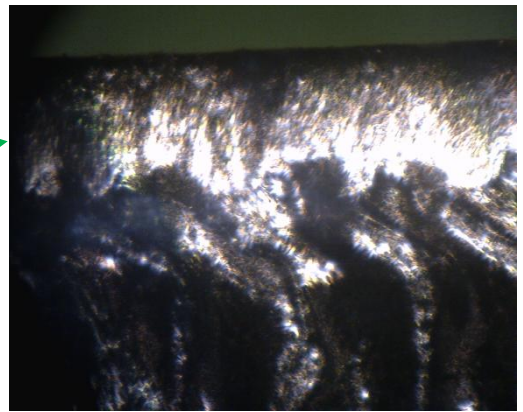


Obr. 27. Vzorek C5

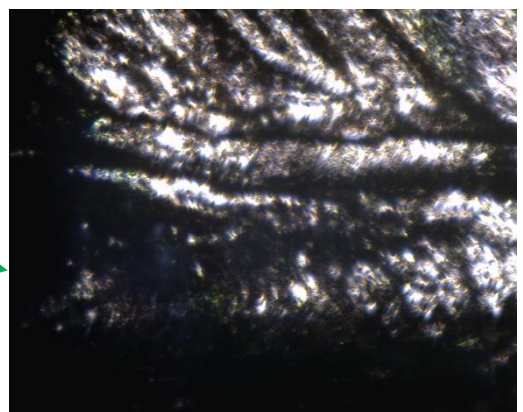
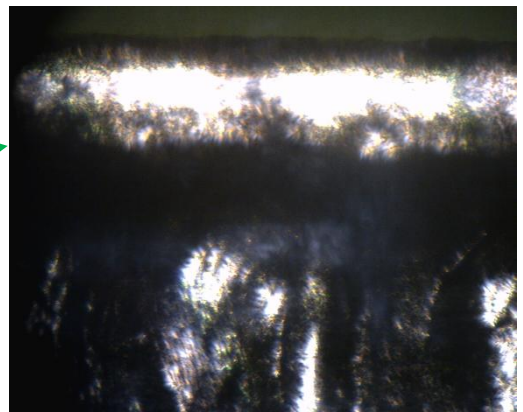


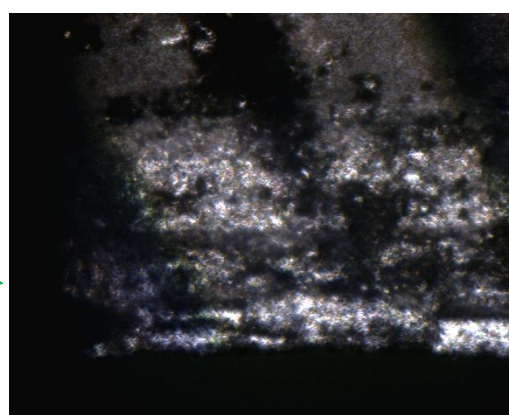
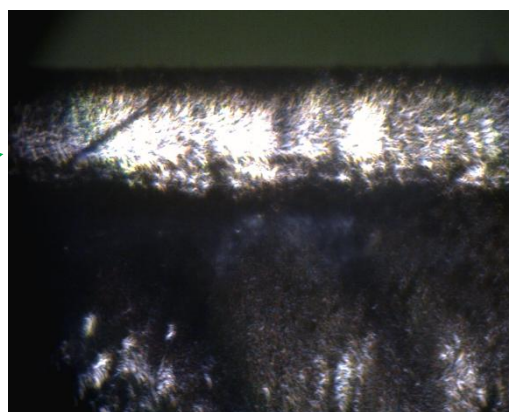
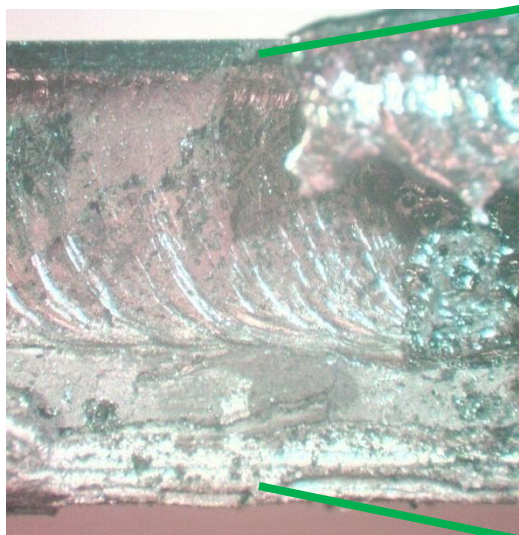


Obr. 28. Vzorek C6



Obr. 29. Vzorek C7



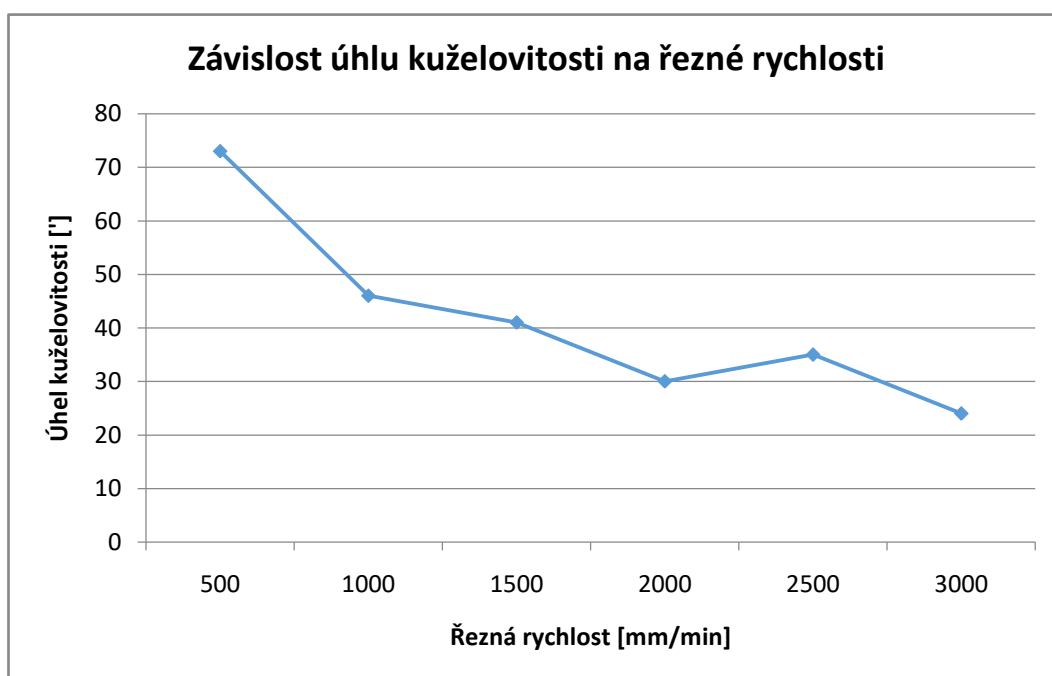


*Obr. 30. Vzorek C8*

## 6.2 Vyhodnocení kuželovitosti

Tab. 1. Vliv řezné rychlosti na kuželovitost

Vzorek	Řezná rychlost [mm/min]	Délka vstup [mm]	Sm. odchylka [mm]	Délka výstup [mm]	Sm. odchylka [mm]	Úhel kuželovitosti [°]
A1	500	49,75	0,012	49,54	0,024	73
A2	1000	49,82	0,016	49,69	0,029	46
A3	1500	49,85	0,030	49,73	0,017	41
A4	2000	49,80	0,015	49,71	0,017	30
A5	2500	49,95	0,027	49,85	0,015	35
A6	3000	49,91	0,020	49,83	0,012	24

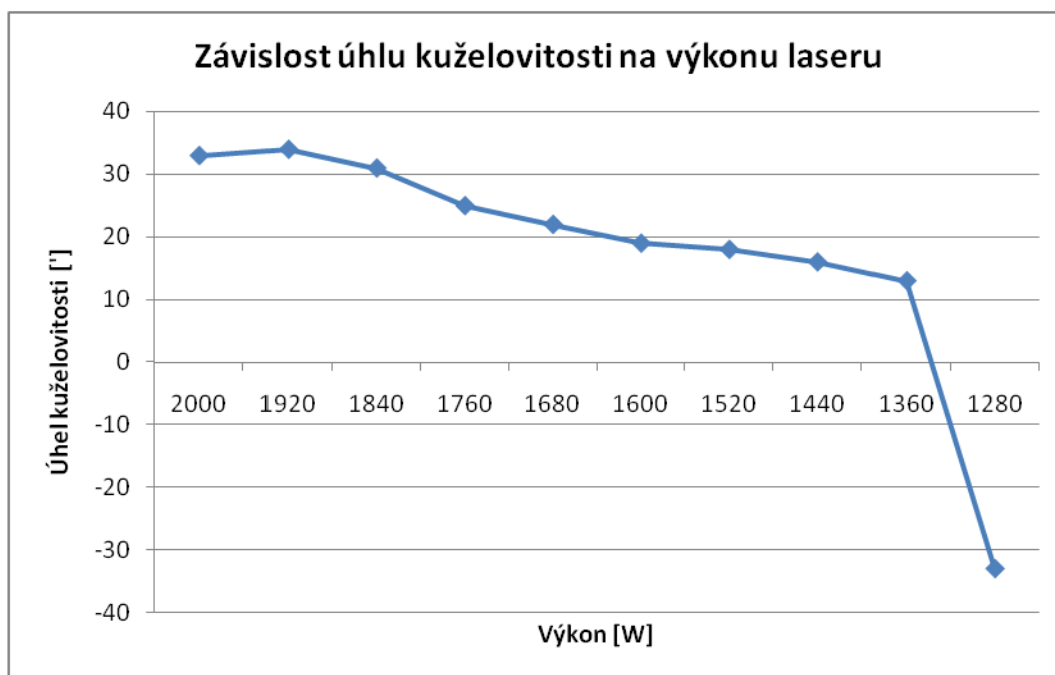


Obr. 31. Závislost kuželovitosti na řezné rychlosti

Velikost řezné rychlosti má značný vliv na kuželovitost vzorku. Úhel kuželovitosti má největší hodnotu při nejnižší řezné rychlosti. Tento jev může způsobovat delší kontakt paprsku s materiálem. Úhel kuželovitosti má klesající tendenci s rostoucí řeznou rychlostí.

Tab. 2. Vliv výkonu laseru na kuželovitost

Vzorek	Výkon [W]	Délka vstup [mm]	Sm. Odchylka [mm]	Délka výstup [mm]	Sm. Odchylka [mm]	Úhel kuželovitosti [°]
B1	2000	49,94	0,013	49,85	0,018	33
B2	1920	49,95	0,015	49,85	0,010	34
B3	1840	49,95	0,018	49,86	0,010	31
B4	1760	49,97	0,018	49,90	0,018	25
B5	1680	49,95	0,016	49,89	0,010	22
B6	1600	49,97	0,010	49,92	0,012	19
B7	1520	49,98	0,012	49,92	0,013	18
B8	1440	49,99	0,016	49,95	0,014	16
B9	1360	49,96	0,014	49,92	0,011	13
B10	1280	49,94	0,010	50,04	0,014	-33

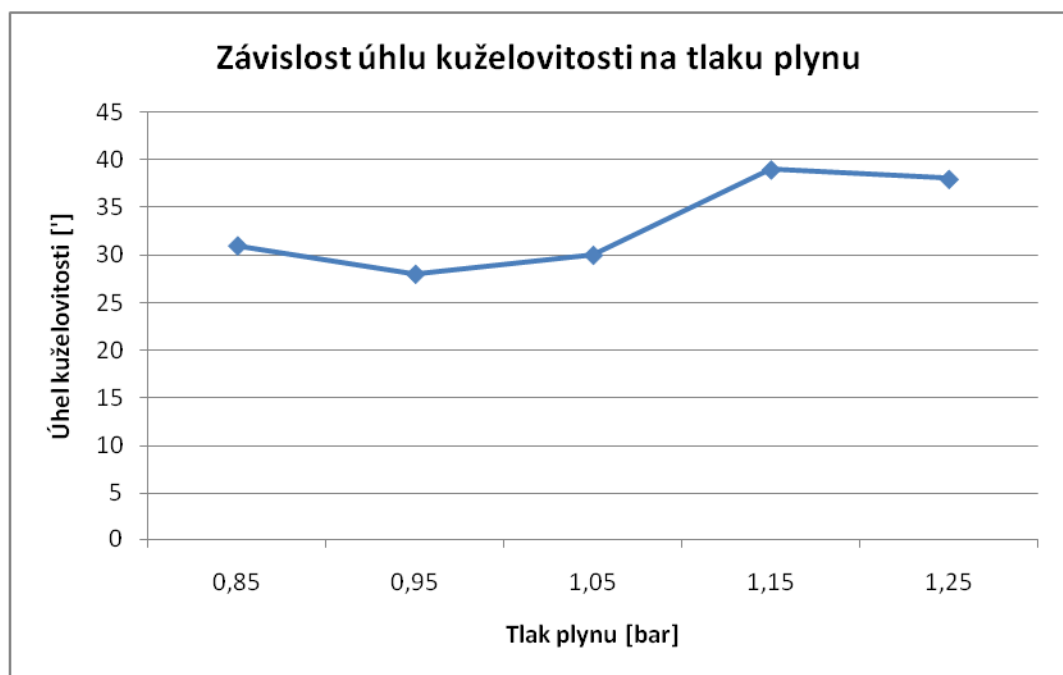


Obr. 32. Závislost kuželovitosti na výkonu laseru

Toto měření potvrzuje myšlenku, že měnící se výkon laseru ovlivňuje kuželovitost řezné spáry. Při vyšších výkonech laseru dosahuje úhel sklonu řezných ploch největších hodnot a při postupném snižování výkonu se snižuje úhel kuželovitosti. Při nejmenším výkonu je možné pozorovat, že úhel kuželovitosti dosahuje záporné hodnoty a tím se mění orientace sklonu řezné spáry.

Tab. 3. Vliv tlaku plynu na kuželovitost

Vzorek	Tlak plynu [bar]	Délka vstup [mm]	Sm. Odchylka [mm]	Délka výstup [mm]	Sm. Odchylka [mm]	Úhel kuželovitosti [°]
C1	0,85	49,94	0,014	49,85	0,017	31
C2	0,95	49,96	0,012	49,88	0,015	28
C3	1,05	49,93	0,012	49,84	0,014	30
C4	1,15	49,93	0,013	49,81	0,015	39
C5	1,25	49,92	0,014	49,81	0,015	38



Obr. 33. Závislost kuželovitosti na tlaku plynu

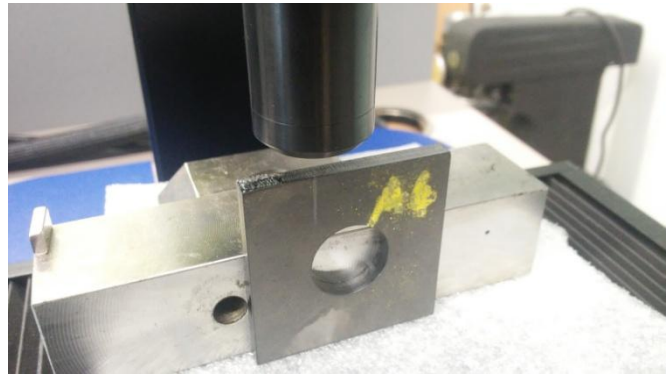
Vzorky C6, C7 a C8 nebyly vhodné pro měření, z důvodu zapečeného materiálu na řezné ploše. Ze závislosti úhlu kuželovitosti na tlaku plynu vyplývá, že změna tlaku plynu nemá výraznější vliv na kuželovitost.

### 6.3 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Drsnost povrchu byla měřena za pomoci přístroje Taylor Hobson Talysurf CLI 500. Toto zařízení je vhodné pro měření drsnosti povrchu méně rozměrných součástí. Přístroj je účinným měřicím prostředkem k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením. Přístroj je schopen měřit ve třech osách, s využitím dotykové nebo bezdotykové měřicí techniky.



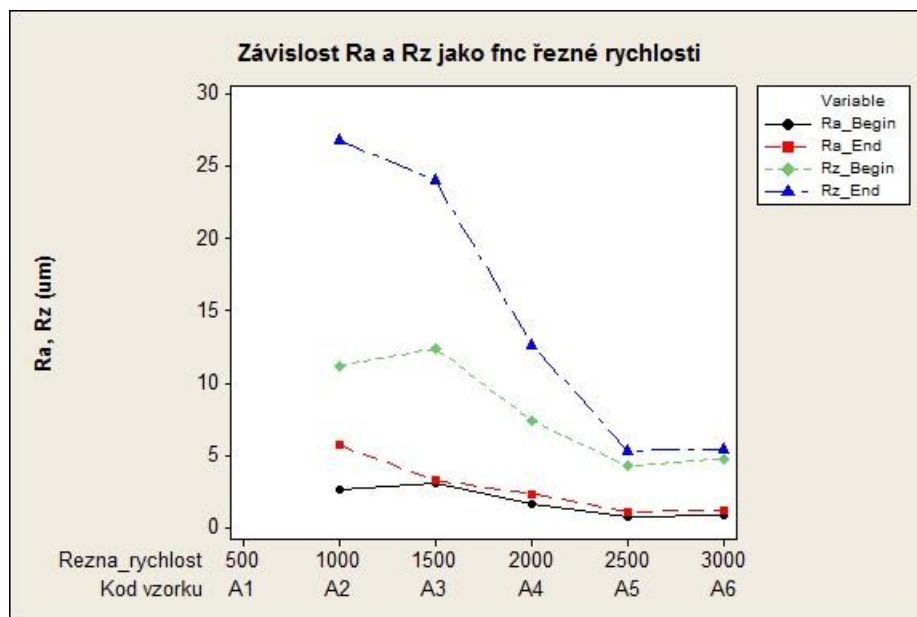
*Obr. 34. Talysurf CLI 500*



*Obr. 35. Měření drsnosti*

Tab. 4. Změna řezné rychlosti

Vzorek	Řezná rychlost [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Rz [ $\mu\text{m}$ ]	
		vstup	výstup	vstup	výstup
A1	500	x	x	x	x
A2	1000	2,650	5,704	11,193	26,905
A3	1500	3,068	3,248	12,410	24,024
A4	2000	1,592	2,310	7,350	12,651
A5	2500	0,723	1,077	4,217	5,295
A6	3000	0,805	1,145	4,762	5,426



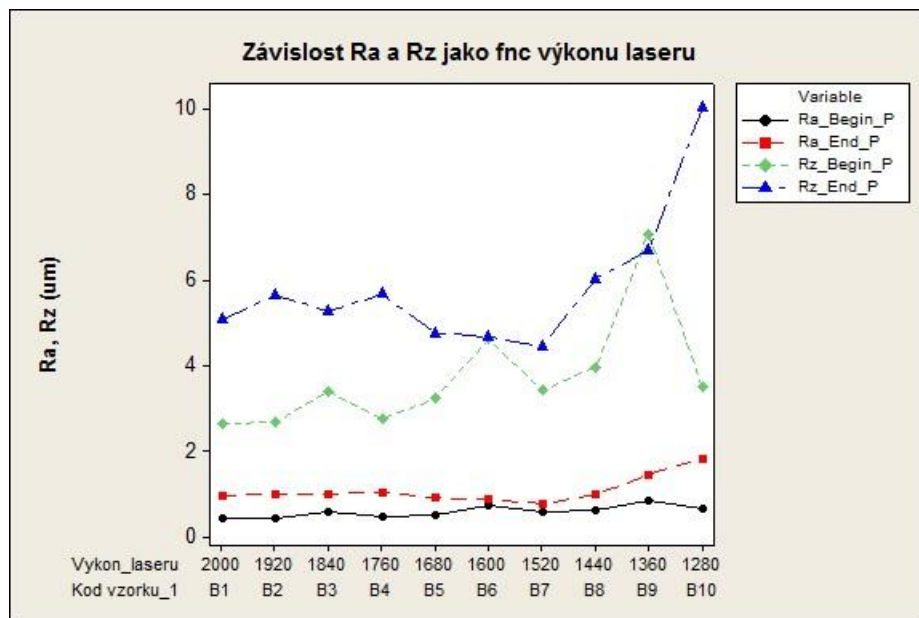
Obr. 36. Závislost Ra a Rz na řezné rychlosti

Vzorek A1 byl pro měření drsnosti nevhodný, z důvodu velmi nekvalitní řezné plochy.

Obecně platí, že kvalita řezné plochy na vstupu paprsku do materiálu je vyšší než na výstupu paprsku. Tato hypotéza se při měření drsnosti povrchu potvrdila. Dále můžeme upozorovat, že s rostoucí řeznou rychlostí se zlepšuje kvalita povrchu. Tento jev bude platit pouze do určité hodnoty řezné rychlosti, protože při vyšších rychlostech nebude doba interakce paprsku s materiálem dostatečná na to, aby došlo k propálení celé tloušťky materiálu. Již při řezné rychlosti 3200 mm/min docházelo k nedokonalému vypálení vzorků a vzorky nebyly použitelné pro měření. Řezná rychlost, při níž bude dosaženo nejkvalitnějších povrchů, se bude pro různé materiály lišit.

Tab. 5. Změna velikosti výkonu

Vzorek	Výkon [W]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Rz [ $\mu\text{m}$ ]	
		vstup	výstup	vstup	výstup
B1	2000	0,427	0,967	2,663	5,081
B2	1920	0,460	1,012	2,681	5,657
B3	1840	0,599	1,016	3,410	5,265
B4	1760	0,474	1,049	2,755	5,674
B5	1680	0,529	0,919	3,244	4,767
B6	1600	0,726	0,895	4,626	4,685
B7	1520	0,588	0,786	3,429	4,453
B8	1440	0,633	0,992	3,966	6,04
B9	1360	0,865	1,466	7,079	6,693
B10	1280	0,652	1,845	3,532	10,016



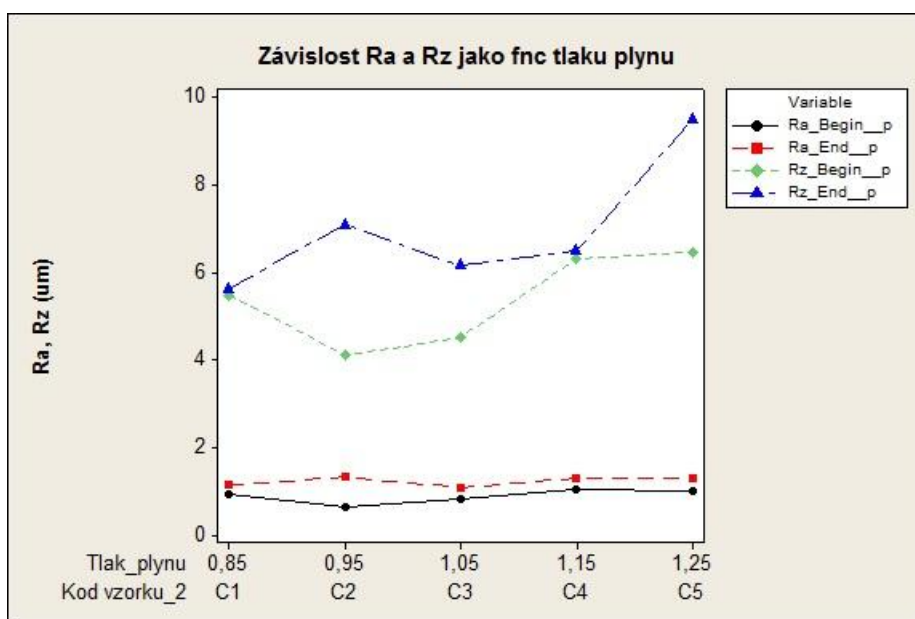
Obr. 37. Závislost Ra a Rz na výkonu laseru

I při tomto měření se potvrdilo, že kvalita řezné plochy na vstupu paprsku do materiálu je vyšší než na výstupu paprsku. Z měření vyplývá, že výkon laseru výrazně neovlivňuje drsnost povrchu. Pouze při nižších výkonech, můžeme pozorovat mírné zvětšení drsnosti povrchu. To může být způsobeno nedostatečnou energií paprsku. Při nízkých výkonech nebude mít paprskem dostatečnou energii na proniknutí materiálem, naopak při velmi vysokých výkonech může docházet k zapékání materiálu.



Tab. 6. Změna tlaku plynu

Vzorek	Tlak plynu [bar]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Rz [ $\mu\text{m}$ ]	
		vstup	výstup	vstup	výstup
C1	0,85	0,904	1,128	5,474	5,613
C2	0,95	0,626	1,305	4,089	7,085
C3	1,05	0,805	1,072	4,501	6,136
C4	1,15	1,048	1,286	6,295	6,480
C5	1,25	1,010	1,296	6,453	9,465
C6	1,35	x	x	x	x
C7	1,45	x	x	x	x
C8	1,55	x	x	x	x



Obr. 38. Závislost Ra a Rz na tlaku plynu

Vzorky C6, C7 a C8 byly pro měření drsnosti nevhodné, z důvodu velmi nekvalitní řezné plochy.

I z tohoto měření vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od proniknutí paprsku do materiálu, se kvalita povrchu řezné plochy zhoršuje. Vliv tlaku plynu z pohledu parametru Ra není tak podstatný jako např. vliv řezné rychlosti. Nicméně tlak plynu musí být vhodně zvolen, protože ovlivňuje proces hoření a vyfukování oxidů a taveniny z prostoru řezné spáry. Příliš nízký tlak může způsobovat špatné vyfukování taveniny ze spáry a může docházet k zapékání výpalků.

## ZÁVĚR

Dělení materiálů je jednou z prvotních operací ve výrobním procesu. Pro dělení materiálů existuje v dnešní době velké množství metod a technologií. Každá z těchto metod má svou oblast použití, výhody, ale i nevýhody. Tádna z těchto technologií není univerzální, a proto se musí volba technologie vř dy zvařovat. V této práci se zabývám technologií řezání laserem. Technologie laserového řezání v dnešní době zařívá velký rozmach. Tento rozmach je způsoben především výhodami, kterými tato technologie disponuje. Hlavními výhodami je rychlost a tím pádem i produktivita práce při zachování velké kvality součástí. Další výhodou je široká škála materiálů, které je možné dělit pomocí této technologie. Mezi nevýhody patří vysoké pořizovací a provozní náklady, dále je laserové řezání omezeno tloušťkou materiálu a odrazivostí materiálu. Laserové zařízení pracuje na principu lokálního tavení, spalování a odpařování.

V teoretické části této práce byla popsána historie laseru a jeho předchůdce maseru. Dále zde byl popsán princip laserů, který spočívá ve stimulované emisi, tj. vynuceném záření. V této části práce je také uvedeno rozdělení a stručná charakteristika typů laserů, také je zde uveden popis a určování parametrů kvality vzorků, jako je kuřelovitost a drsnost řezné plochy vzorků. Tyto parametry ovlivňují funkčnost dílů.

V praktické části popisují výrobu vzorků a zařízení, pomocí kterého byly vzorky vyrobeny. Vzorky byly vyráběny na vláknovém laseru o maximálním výkonu 2000 W, celkem byly vyrobeny tři série vzorků. U série s označením A byla měněna řezná rychlost, u série B byl měněn výkon a u série s označením C byl měněn tlak asistenčního plynu. Na vypálených vzorcích byla zkoumána kuřelovitost a drsnost řezné plochy.

U parametru kuřelovitosti je zřejmý vliv řezné rychlosti a výkonu laseru. Úhel kuřelovitosti má klesající tendenci s rostoucí řeznou rychlostí a s klesajícím výkonem. Vliv tlaku asistenčního plynu nebyl jednoznačně prokázán.

Při měření drsnosti povrchu řezné plochy bylo potvrzeno, ře kvalita řezné plochy na vstupu paprsku do materiálu je vyšší než na výstupu paprsku. Vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu je z měření zřejmý, s rostoucí řeznou rychlostí se zlepřuje kvalita povrchu. Výkon laseru výrazně neovlivňuje drsnost povrchu, teprve při nižších výkonech začíná drsnost povrchu narůstat. Tento jev může být způsobeno nedostatečnou energií paprsku. Vliv tlaku plynu na parametr Ra nebyl prokázán, parametr Rz má při rostoucím tlaku rostoucí tendenci.

Ve výsledném hodnocení se jako nejvíce ovlivňující řezný parametr prokázala řezná rychlost laseru. Nicméně další zkoumané parametry se nesmí zanedbávat. Tyto parametry budou ovlivňovat kvalitu řezné plochy, vliv bude různý pro různé druhy a tloušťky materiálů. Pro dosažení největší možné kvality je nutná optimální kombinace výše zmíněných parametrů.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] *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.
- [2] Cesta k objevu. *ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z:  
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>
- [3] HLAVATÝ, Ivo. Laserové a plasmové řezání [online]. 2009 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/16-17-83-84.pdf>
- [4] PETERKA, Pavel. *Vláknové lasery*. Praha: Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR, 2014. ISBN 8086269981
- [5] Typy laserů. *ČEZ* [online]. 2004 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z:  
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [6] Drsnost povrchu. *OVMT* [online]. 2012 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z:  
<http://files.ovmt.webnode.cz/200000030-3094f328a0/Drsnost%20povrchu.pdf>
- [7] PROCHÁZKA, Lukáš. Technická dokumentace. [online]. 2014 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: [http://www.sps-prosek.cz/soubory/M/TD/TD-struktura\\_povrchu.pdf](http://www.sps-prosek.cz/soubory/M/TD/TD-struktura_povrchu.pdf)
- [8] NESSAP GAMA, *NESSAP GAMA* [online]. 2012 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z:  
<http://www.cncstroje.cz/produkty-nessap-gama-detail-2>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

MASER	Microwave amplification by stimulated emission of radiation
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
CO	Oxid uhelnatý
GaAs	Arsenid gallitý
$\varphi$	Úhel kuž elovitosti
$l_{vstup}$	Délka hrany na vstupu paprsku
$l_{výstup}$	Délka hrany na výstupu paprsku
h	Tloušťka materiálu
Ra	Průměrná aritmetická úchylka
Rz	Maximální úchylka

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1. Schéma laseru[3]</i> .....	13
<i>Obr. 2. Schéma pevnolátkového laseru[4]</i> .....	14
<i>Obr. 3. Obecný povrch[6]</i> .....	16
<i>Obr. 4. Znázornění Ra a Rz[7]</i> .....	17
<i>Obr. 5. NESSAP GAMA 3015FL</i> .....	19
<i>Obr. 6. Vzorek</i> .....	20
<i>Obr. 7. Vzorek A1</i> .....	22
<i>Obr. 8. Vzorek A2</i> .....	23
<i>Obr. 9. Vzorek A3</i> .....	23
<i>Obr. 10. Vzorek A4</i> .....	24
<i>Obr. 11. Vzorek A5</i> .....	24
<i>Obr. 12. Vzorek A6</i> .....	25
<i>Obr. 13. Vzorek B1</i> .....	25
<i>Obr. 14. Vzorek B2</i> .....	26
<i>Obr. 15. Vzorek B3</i> .....	26
<i>Obr. 16. Vzorek B4</i> .....	27
<i>Obr. 17. Vzorek B5</i> .....	27
<i>Obr. 18. Vzorek B6</i> .....	28
<i>Obr. 19. Vzorek B7</i> .....	28
<i>Obr. 20. Vzorek B8</i> .....	29
<i>Obr. 21. Vzorek B9</i> .....	29
<i>Obr. 22. Vzorek B10</i> .....	30
<i>Obr. 23. Vzorek C1</i> .....	30
<i>Obr. 24. Vzorek C2</i> .....	31
<i>Obr. 25. Vzorek C3</i> .....	31
<i>Obr. 26. Vzorek C4</i> .....	32
<i>Obr. 27. Vzorek C5</i> .....	32
<i>Obr. 28. Vzorek C6</i> .....	33
<i>Obr. 29. Vzorek C7</i> .....	33
<i>Obr. 30. Vzorek C8</i> .....	34
<i>Obr. 31. Závislost kuželovitosti na řezné rychlosti</i> .....	35
<i>Obr. 32. Závislost kuželovitosti na výkonu laseru</i> .....	36

---

<i>Obr. 33. Závislost kuželovitosti na tlaku plynu</i> .....	37
<i>Obr. 34. Talysurf CLI 500</i> .....	38
<i>Obr. 35. Měření drsnosti</i> .....	38
<i>Obr. 36. Závislost Ra a Rz na řezné rychlosti</i> .....	39
<i>Obr. 37. Závislost Ra a Rz na výkonu laseru</i> .....	40
<i>Obr. 38. Závislost Ra a Rz na tlaku plynu</i> .....	41

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Vliv řezné rychlosti na kuželovitost .....</i>	35
<i>Tab. 2. Vliv výkonu laseru na kuželovitost.....</i>	36
<i>Tab. 3. Vliv tlaku plynu na kuželovitost .....</i>	37
<i>Tab. 4. Změna řezné rychlosti.....</i>	39
<i>Tab. 5. Změna velikosti výkonu.....</i>	40
<i>Tab. 6. Změna tlaku plynu .....</i>	41

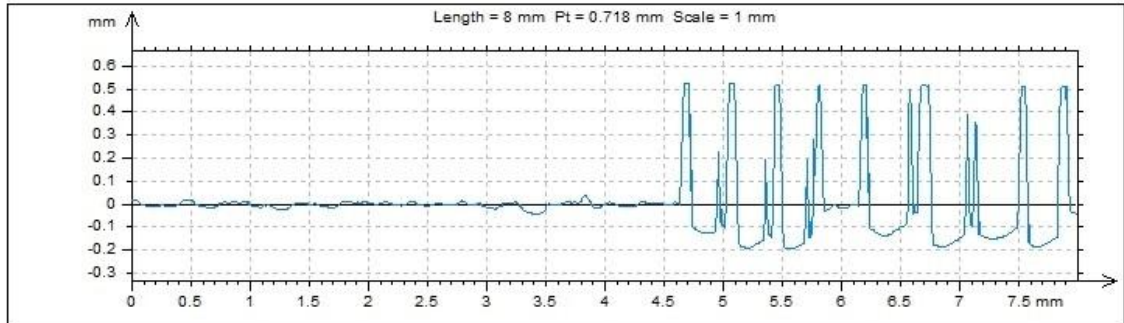


## SEZNAM PŘÍLOH

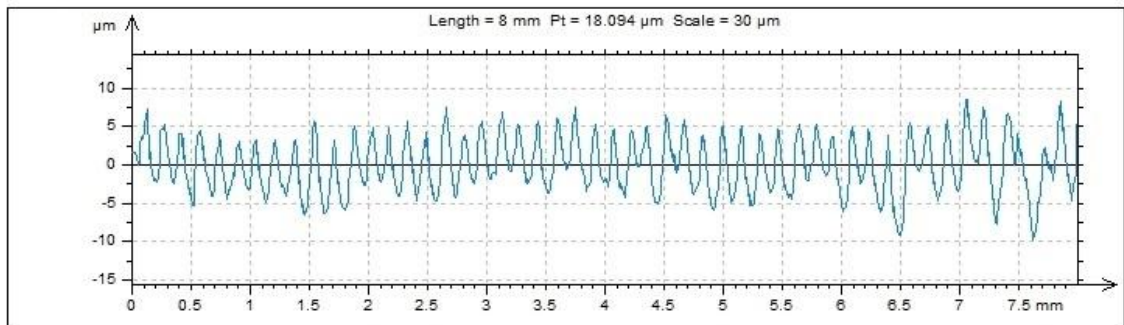
P I – Vyhodnocení drsnosti povrchu

# PŘÍLOHA P I: VYHODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU

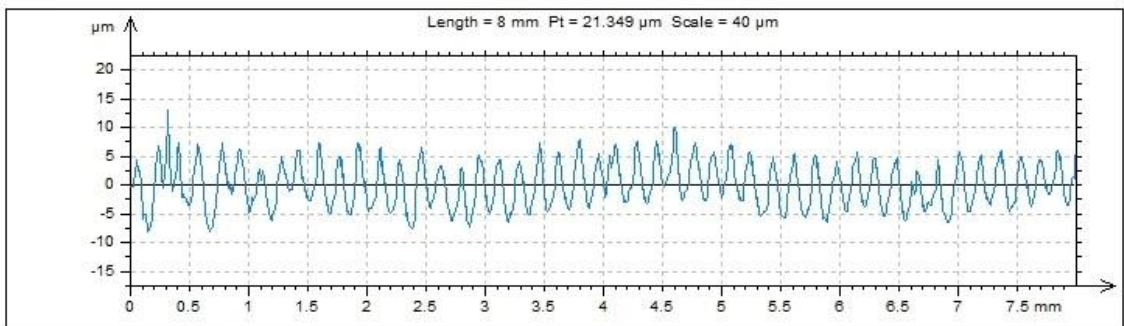
A1\_1



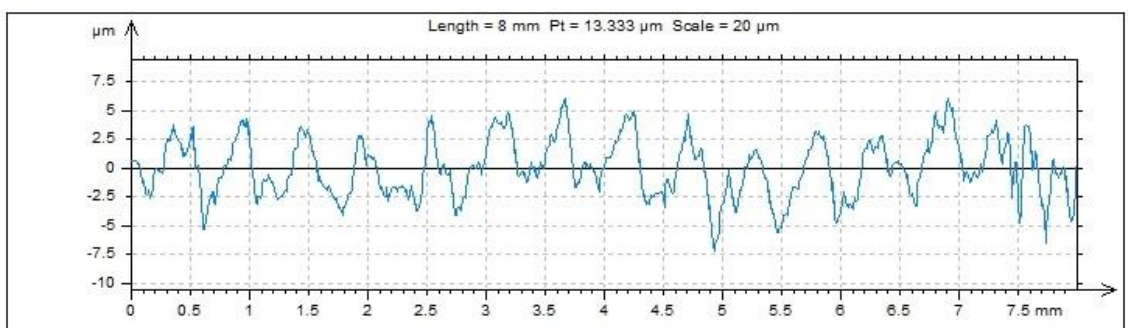
A2\_1



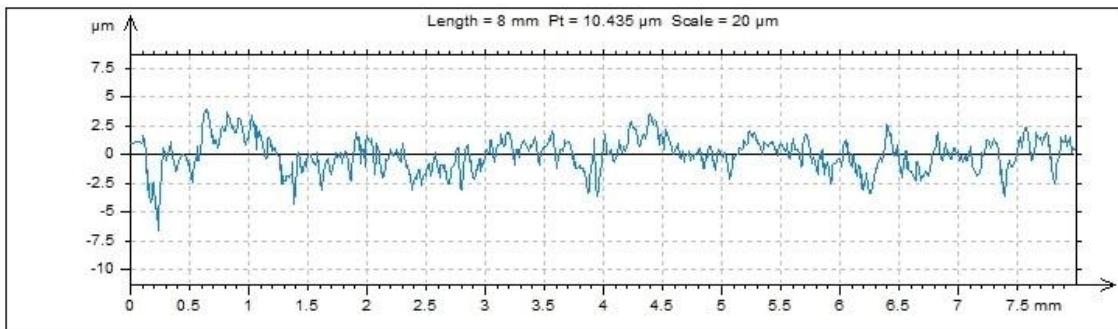
A3\_1



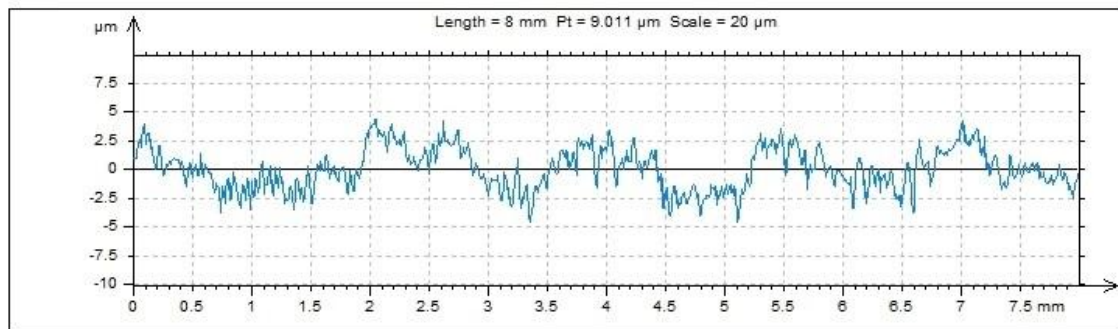
A4\_1



A5\_1



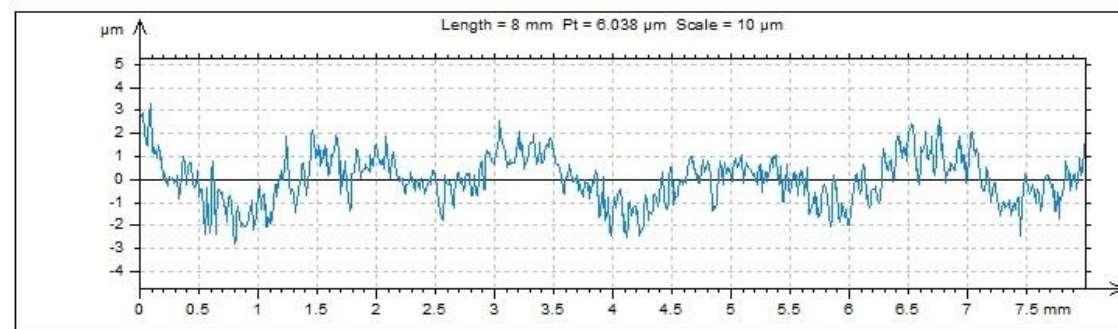
A6\_1



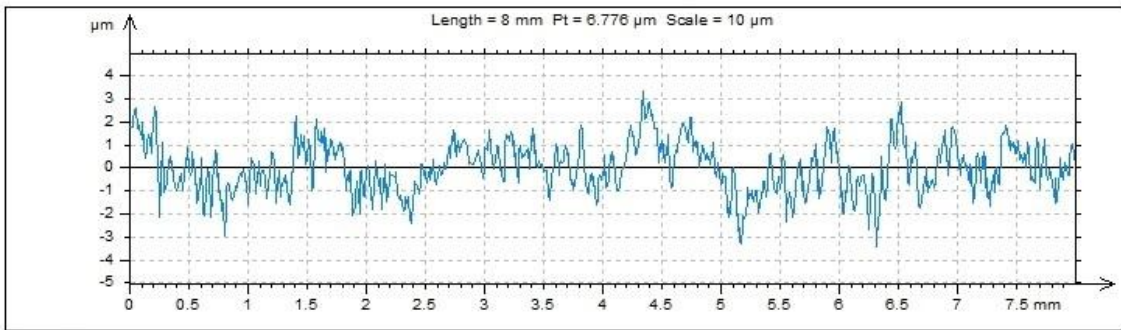
B1\_1



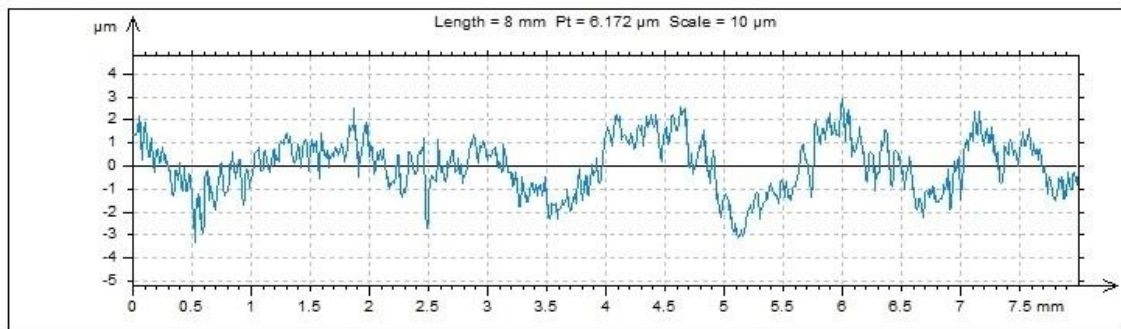
B2\_1



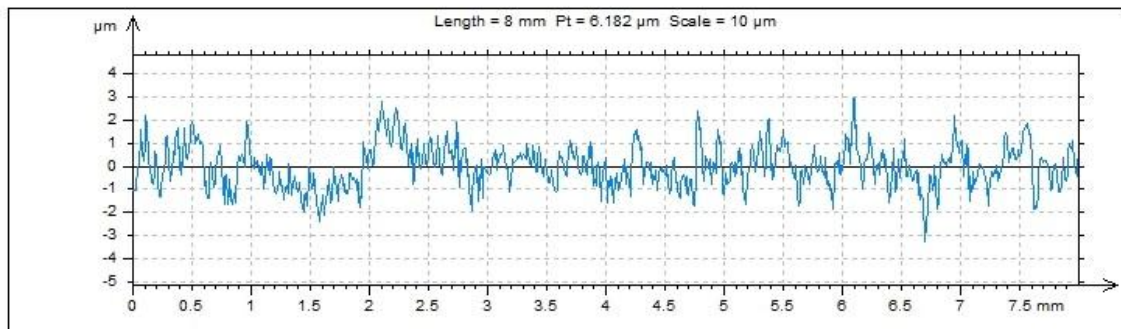
B3\_1



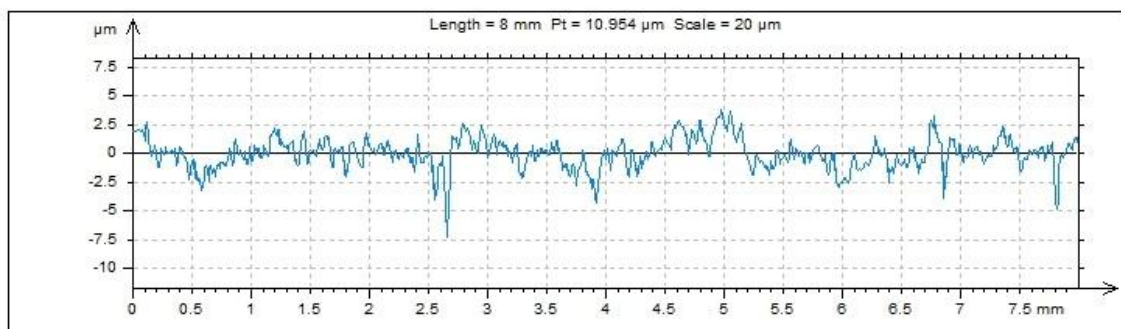
B4\_1



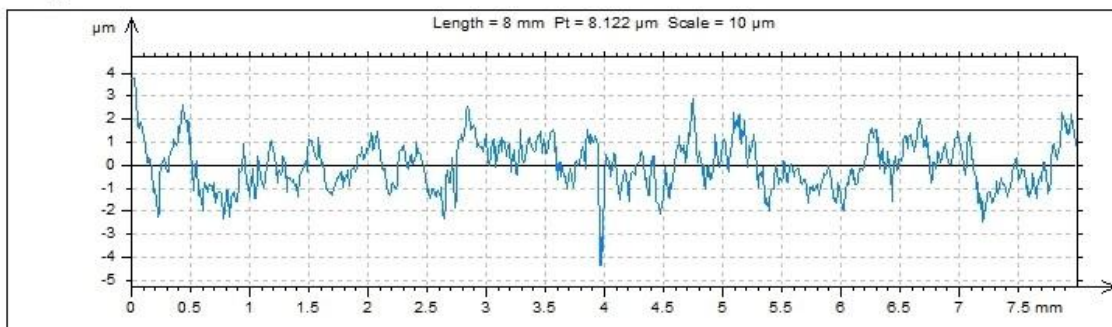
B5\_1



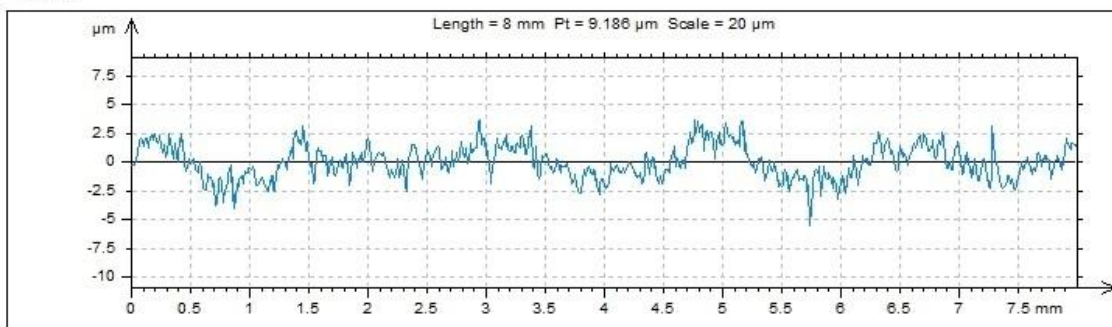
B6\_1



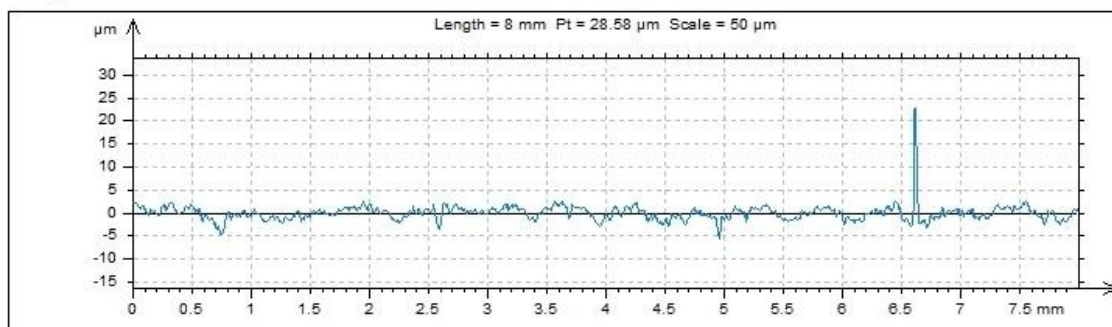
B7\_1



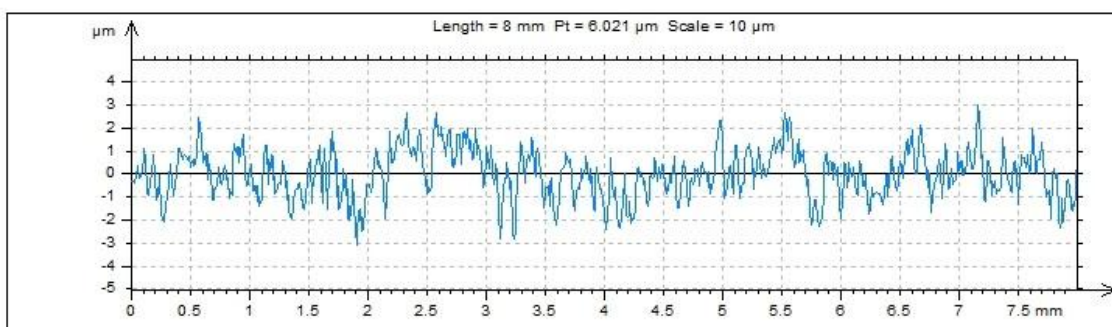
B8\_1



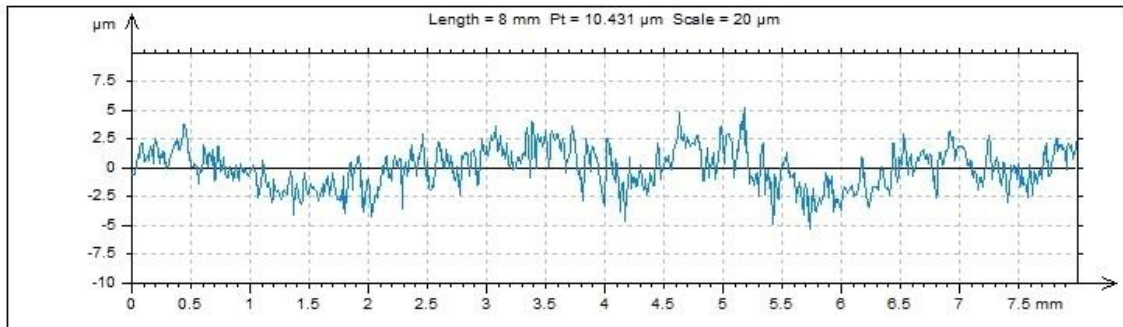
B9\_1



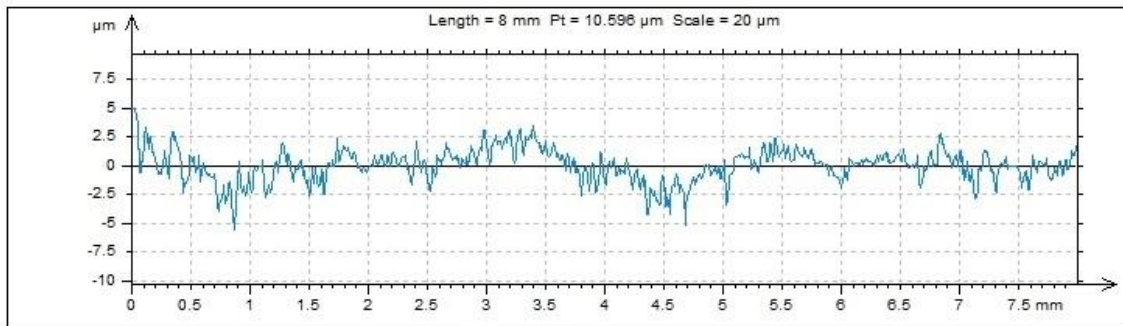
B10\_1



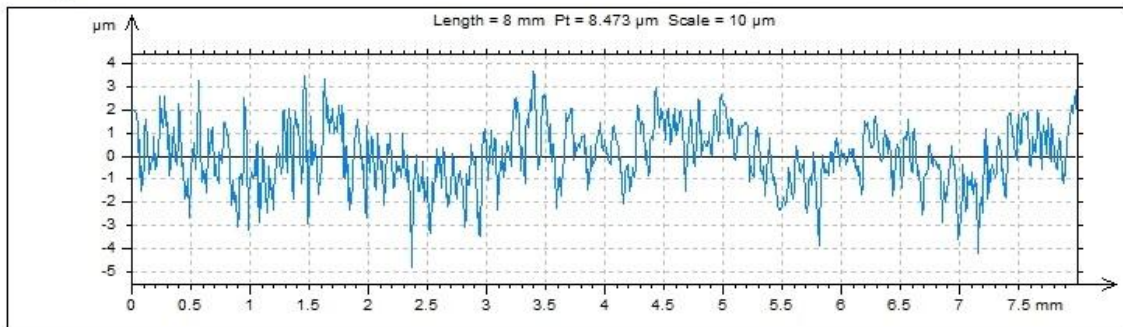
C1\_1



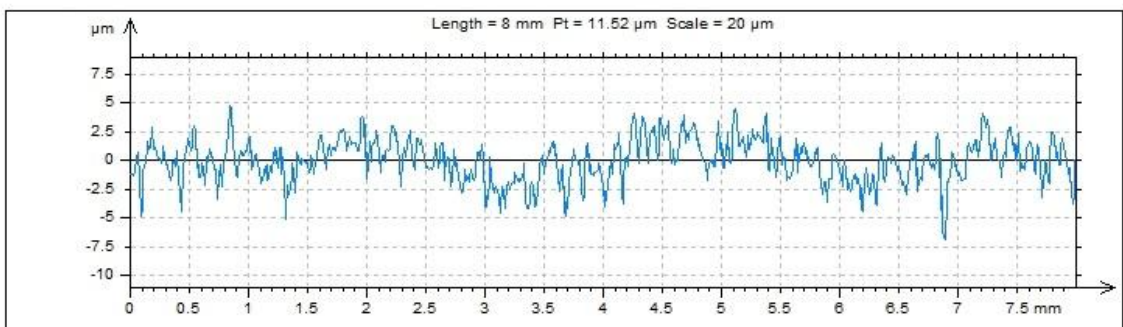
C2\_1



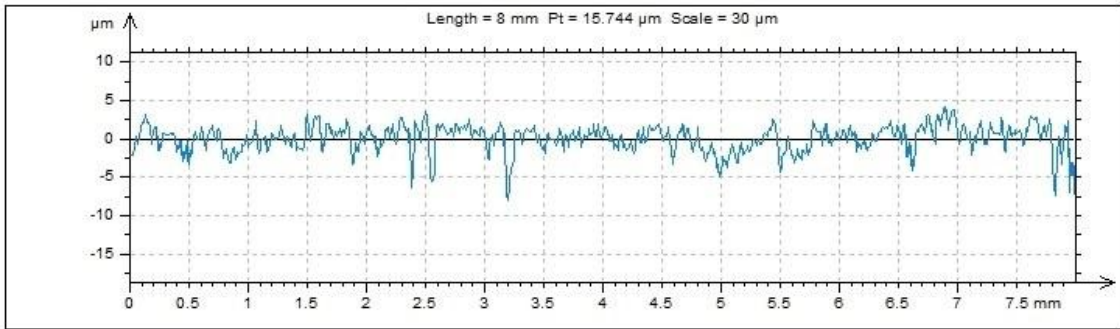
C3\_1



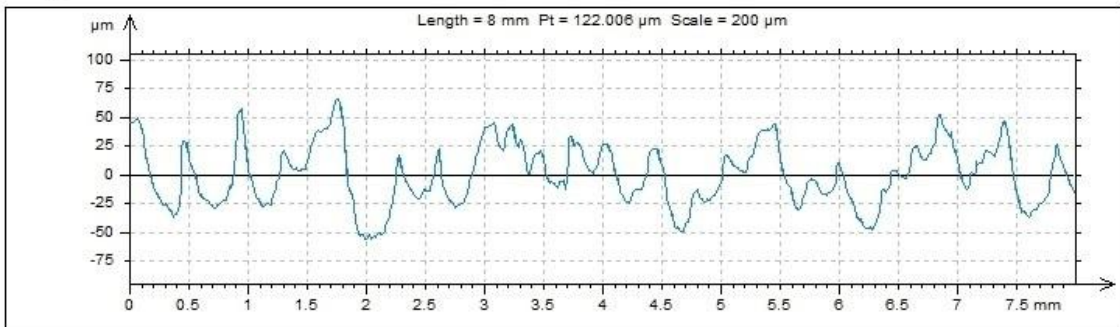
C4\_1



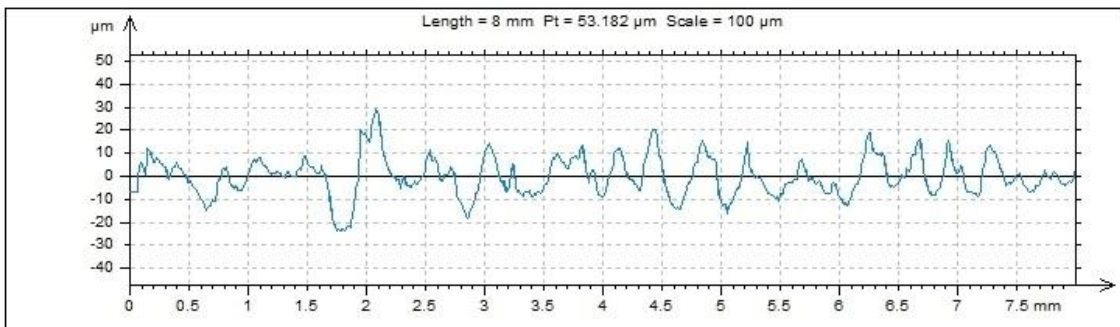
C5\_1



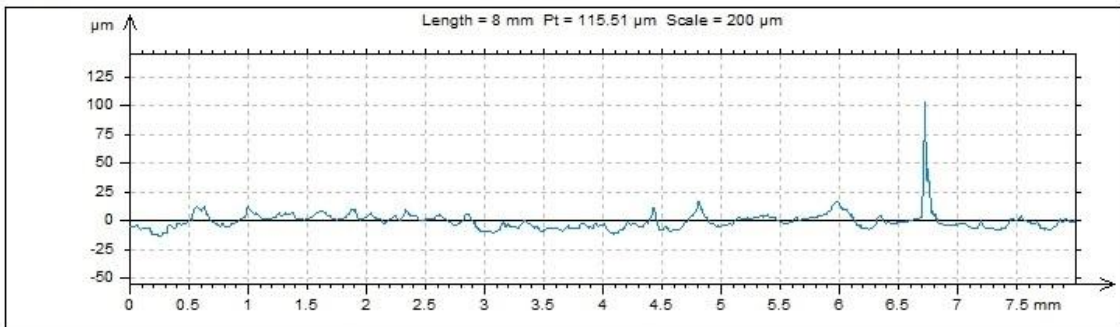
A1\_2



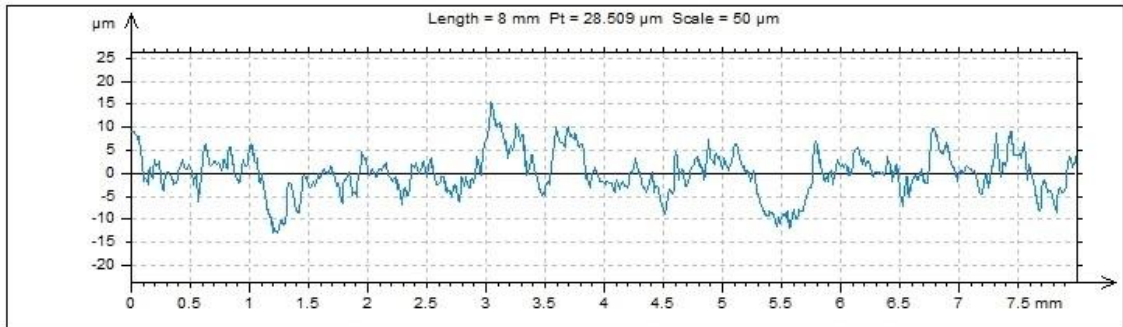
A2\_2



A3\_2



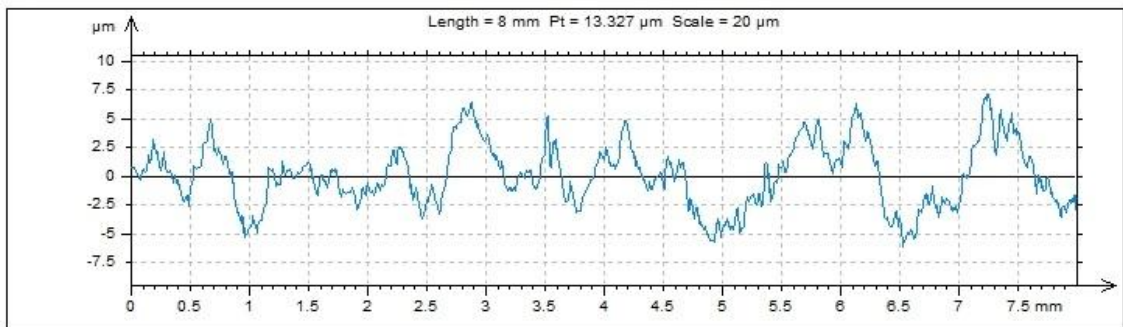
A4\_2



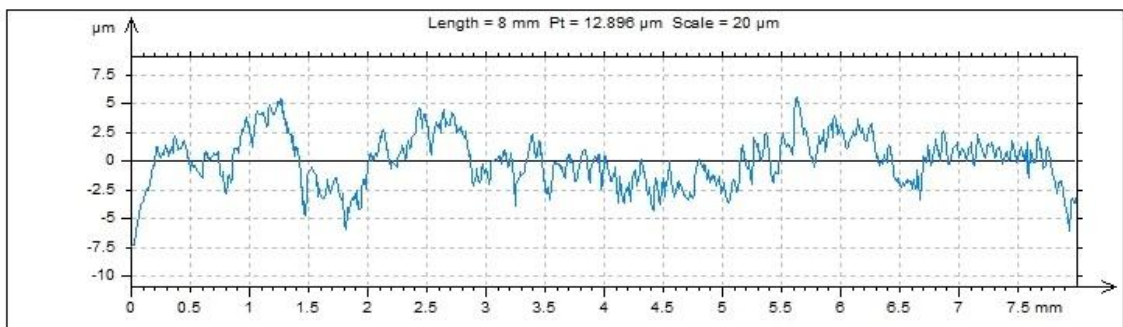
A5\_2



A6\_2

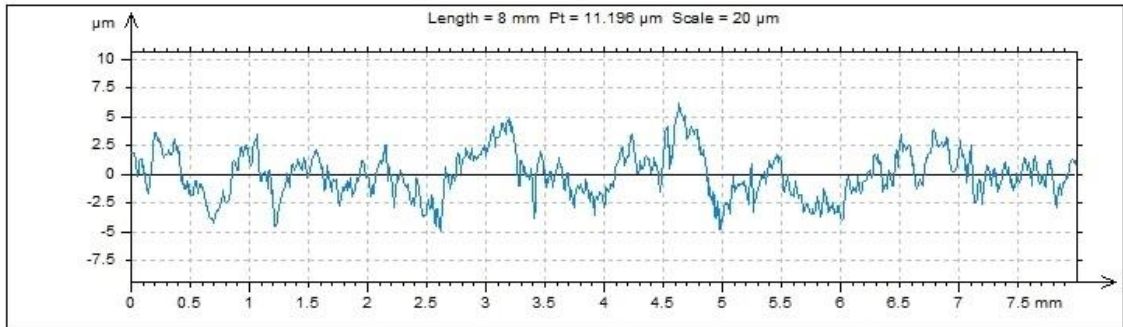


B1\_2





B2\_2



B3\_2



B4\_2



B5\_2



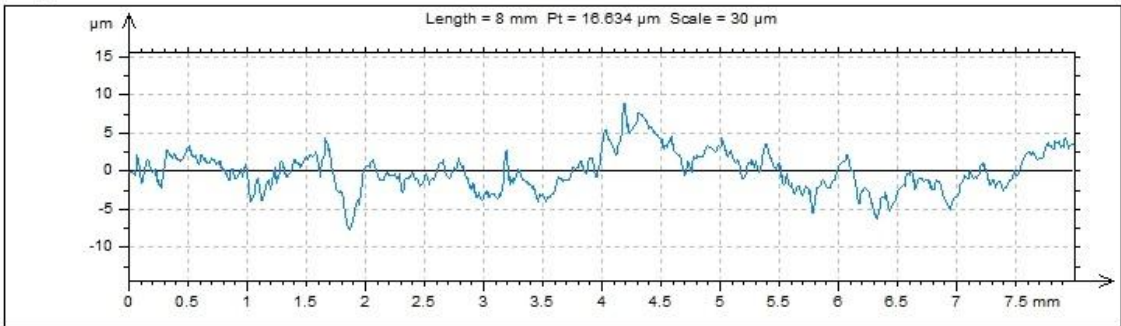
B6\_2



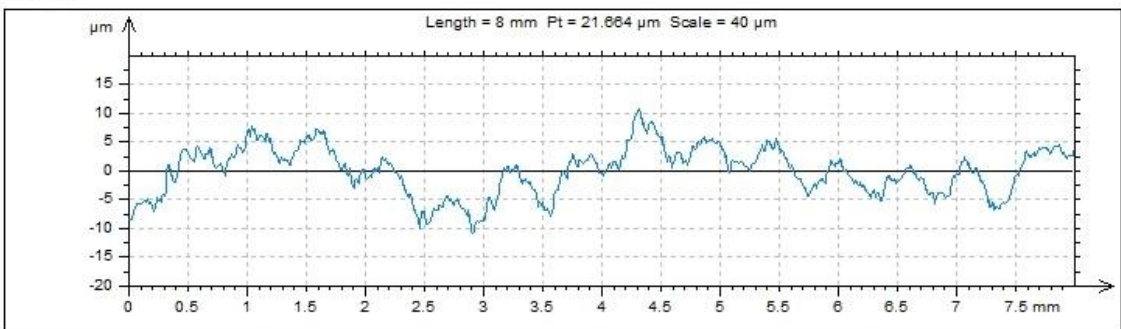
B7\_2



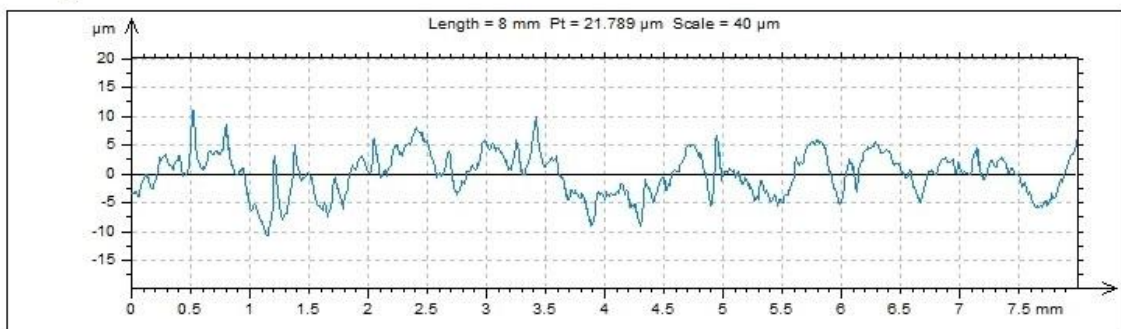
B8\_2



B9\_2



B10\_2



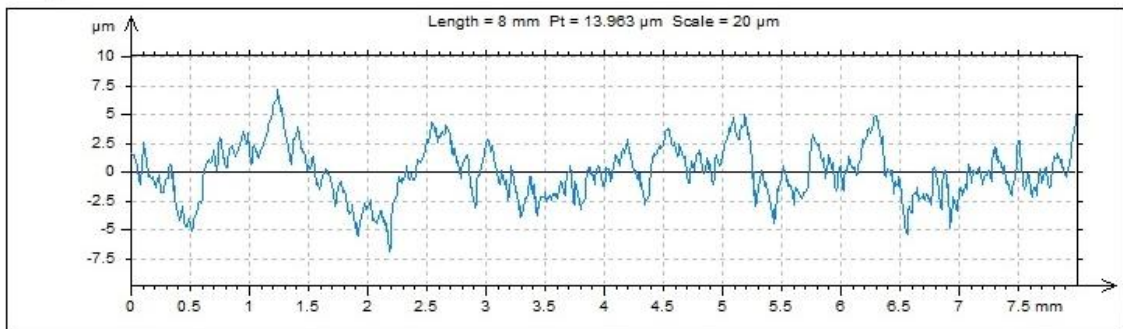
C1\_2



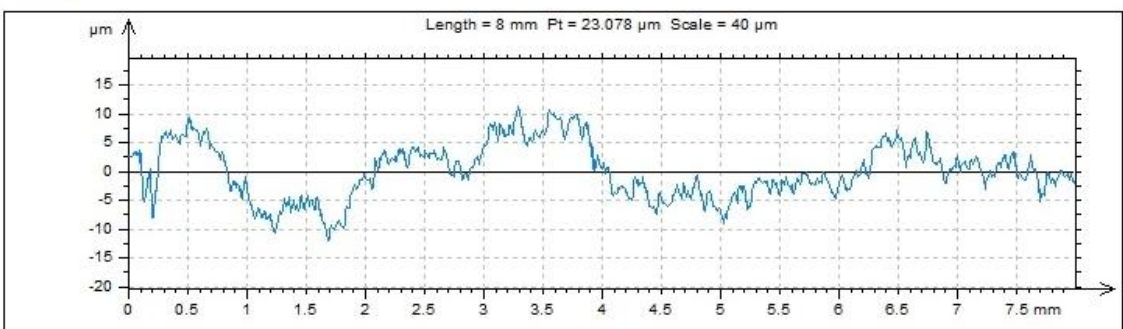
C2\_2



C3\_2



C4\_2



C5\_2

