

# **Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na řezání plasmou a laserem**

Bc. Lukáš Obr

---

Diplomová práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš OBR**  
Osobní číslo: **T100106**  
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na  
řezání plazmou a laserem**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracujte literární rešerši na dané téma**
- 2. Provedte experimentální obrábění laserem a plazmou při změně technologických parametrů pro vybrané materiály**
- 3. Vyhodnoťte kvalitu a rozměrovou přesnost obráběných ploch**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

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

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012

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



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou 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 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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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 11.5.2012



.....

---

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá obráběním nekonvenčními technologiemi a vlivem technologických parametrů na obráběné plochy. Zkoumá vliv řezné rychlosti na přesnost obrobeneho dílce a jakost jeho povrchu. Na závěr srovnává dvě použité technologie – obrábění laserem a plazmou. V práci jsou zahrnuty obecné teoretické poznatky o nekonvenčních metodách obrábění, dále se pak podrobněji zaměřuje na obrábění pomocí laserového paprsku a plazmového paprsku.

Klíčová slova:

Nekonvenční technologie, laserové obrábění, plazmové obrábění, laser, plazma

## **ABSTRACT**

This work is concerned with unconventional technologies and the influence of technological parameters on the machined surface. It examines the influence of cutting speed on precision machined parts and the quality of its surface. In conclusion, comparing two of the technology - laser and plasma cutting. The work includes general theoretical knowledge of unconventional machining methods, further detail will focus on working with a laser beam and plasma beam.

Keywords:

Unconventional technologies, laser cutting, plasma cutting, laser, plasma

Rád bych poděkoval mé vedoucí diplomové práce doc. Ing. Libuši Sýkorové Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady, připomínky, ochotu a vynaložený čas v průběhu vedení této práce. Dále bych rád poděkoval panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jeho volný čas, připomínky ke statistickému vyhodnocení práce a pomoc při manipulaci s vyhodnocovacím zařízením.

*„Každý chce napravit lidstvo, ale nikoho nenapadne, že by měl začít u sebe“*

*Lev Nikolajevič Tolstoj*

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

Ve Zlíně 11.5.2012



Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 NEKONVENČNÍ PROCESY OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 POROVNÁNÍ S KLASICKÝMI TECHNOLOGIEMI OBRÁBĚNÍ.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	13
<b>2 PŘEHLED NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ</b> .....	<b>15</b>
2.1 MECHANICKÉ PROCESY ÚBĚRU MATERIÁLU .....	15
2.1.1 Obrábění vodním paprskem (WJM).....	15
2.1.2 Opracování abrazivním paprskem (AJM-AFM).....	15
2.1.3 Obrábění ultrazvukem (USM).....	16
2.2 CHEMICKÉ PROCESY ÚBĚRU MATERIÁLU .....	16
2.2.1 Chemické obrábění (CM).....	17
2.2.2 Fotochemické obrábění (PCM) .....	17
2.3 ELEKTROCHEMICKÉ NEBO ELEKTRICKÉ PRINCIPY ÚBĚRU MATERIÁLU .....	17
2.3.1 Elektrochemické obrábění (ECM) .....	17
2.3.2 Elektrochemické broušení (ECG) .....	18
2.4 ELEKTROTEPELNÉ NEBO TEPELNÉ PROCESY ÚBĚRU MATERIÁLU .....	18
2.4.1 Elektrojiskrové obrábění (EDM).....	18
2.4.2 Obrábění laserem (LBM) .....	19
2.4.3 Obrábění paprskem elektronů (EBM) .....	20
2.4.4 Obrábění paprskem iontů (IBM) .....	20
2.4.1 Obrábění plazmovým paprskem (PAM) .....	21
<b>3 OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPSREM</b> .....	<b>22</b>
3.1 HISTORIE LASERU .....	22
3.2 DEFINICE LASERU A JEHO VLASTNOSTI .....	23
3.3 DRUHY LASERŮ A JEJICH DĚLENÍ .....	26
3.3.1 Lasery v pevné fázi.....	26
3.3.2 Plynové lasery .....	28
3.3.3 Kapalinové lasery .....	29
3.3.4 Polovodičové lasery .....	29
3.4 PŮSOBENÍ LASERU NA MATERIÁL.....	30
3.5 APLIKACE LASEROVÉHO PAPSREM PRO OPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ .....	31
3.5.1 Řezání laserovým paprskem.....	31
3.5.2 Vrtání laserem .....	32
3.5.3 Soustružení laserem .....	32
3.5.4 Mikroobrábění laserem .....	33
3.5.5 Dokončování povrchů laserem.....	33
3.5.6 Další aplikace laseru ve strojírenství.....	33
<b>4 OBRÁBĚNÍ PAPSREM PLASMY</b> .....	<b>35</b>



4.1	HISTORIE PLAZMOVÉHO OBRÁBĚNÍ.....	35
4.2	VZNIK PLAZMY .....	35
4.3	PLAZMOVÉ ZAŘÍZENÍ A POUŽÍVANÉ PLYNY .....	36
4.4	MECHANISMUS PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ MATERIÁLŮ .....	39
4.5	HLAVNÍ APLIKACE PLAZMOVÉHO PAPRSKU .....	41
4.5.1	Plazmové nanášení povlaků .....	41
4.5.2	Plazmové svařování .....	41
4.5.3	Plazmové dělení materiálu .....	42
4.5.4	Plazmové obrábění .....	42
	<b>CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI .....</b>	<b>44</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>CHARAKTERISTIKA VZORKŮ A POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>46</b>
5.1	OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY .....	46
5.2	ZAŘÍZENÍ PRO LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ.....	47
5.3	ZAŘÍZENÍ PRO PLAZMOVÉ OBRÁBĚNÍ .....	48
5.4	ZAŘÍZENÍ PRO VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	49
<b>6</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM.....</b>	<b>51</b>
6.1	VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI U OCELI 11 375 .....	51
6.2	VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI U OCELI 17 349 .....	63
6.3	VYHODNOCENÍ KVALITY OBRÁBĚNÉHO POVRCHU U OCELI 11 375 .....	74
6.4	VYHODNOCENÍ KVALITY OBRÁBĚNÉHO POVRCHU U OCELI 17 349 .....	79
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ PLAZMOVÝM PAPRSKEM.....</b>	<b>84</b>
7.1	VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI U OCELI 11 375 .....	84
7.2	VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI U OCELI 17 349 .....	95
7.3	VYHODNOCENÍ KVALITY OBRÁBĚNÉHO POVRCHU U OCELI 11 375 .....	106
7.4	VYHODNOCENÍ KVALITY OBRÁBĚNÉHO POVRCHU U OCELI 17 349 .....	111
<b>8</b>	<b>ZÁVĚREČNÉ POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM A PLAZMOVÝM PAPRSKEM.....</b>	<b>116</b>
8.1	POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ PRO OBRÁBĚNÍ MATERIÁLU 11 375 .....	116
8.2	POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ PRO OBRÁBĚNÍ MATERIÁLU 17 349.....	117
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>118</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>120</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>122</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>124</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>128</b>

## ÚVOD

Ve strojírenství je velmi důležitou oblastí obrábění. Existuje celá řada metod a způsobů jak docílit přetvoření polotovarů na výrobky. Jednou z těchto oblastí jsou nekonvenční technologie.

Nekonvenční technologie je široký pojem zahrnující všechny technologie, které využívají pro oddělování částeczek materiálu jiné, než klasické metody jako jsou například soustružení, frézování, broušení. U těchto technologií probíhá oddělování materiálu ve formě třísek. U nekonvenčních technologií probíhá oddělování částic materiálu pomocí účinku tepla, chemické reakce, elektrochemické reakce, či mechanickým účinkem.

Objevy těchto technologií způsobily velký pokrok v oblasti zpracování materiálu. Například objevení laseru v roce 1960 (jeho experimentální ověření), znamenalo velkou událost, která by se dala přirovnat k závažnosti objevu parního stroje, či telegrafu.

Tato diplomová práce se zabývá stručným popisem nejdůležitějších nekonvenčních technologií a dále se podrobněji zaměřuje na elektrotepelné principy úběru materiálu. Konkrétněji obrábění paprskem laseru a paprskem plazmy. Práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. Seřazení jednotlivých bodů obsahu je z důvodu návaznosti a tedy lepšího pochopení dané problematiky. Práce je pro lepší představivost doplněna obrázky

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 NEKONVENČNÍ PROCESY OBRÁBĚNÍ

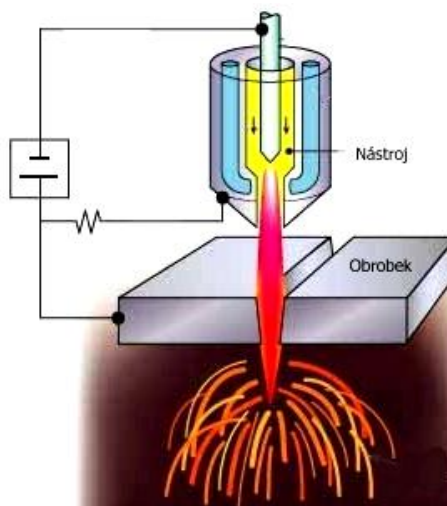
Pod pojmem nekonvenční rozumíme výraz netradiční. V technologii opracování materiálů zahrnuje technologie, které nepoužívají klasický řezný nástroj s definovanou nebo nedefinovanou geometrií.

Pojmenování „nekonvenční“ se dnes běžně používá v řadě publikací. Tento název podpořila také mezinárodní společnost pro vývoj ve strojírenské výrobě (CIRP - College International pour Recherche de la Production). Vedle výrazu nekonvenční se můžeme setkat také s výrazem progresivní. Tento název se zavedl z toho důvodu, že tyto netradiční technologie představovaly vždy technologický pokrok. Jejich progresivita spočívá v tom, že jsou založeny na různých energetických zdrojích. Vedle mechanické energie používá také další formy energie na odebrání materiálu. Částičky materiálu jsou oddělovány ve formě velmi malých částic (Mikro až nano částice). [1]

Využívá se hlavně pro materiály, které jsou běžným mechanickým způsobem těžce obrobitelné nebo jsou neobrobitelné. (např. kompozitní materiály s kovovou maticí, monolitické a kompozitní keramické materiály, některé polymery...) [2]

### 1.1 Porovnání s klasickými technologiemi obrábění.

Největší rozdíl mezi klasickými (konvenčními) a nekonvenčními metodami obrábění je ta skutečnost, že výkonnost obrábění nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu. Materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál, protože k přímému kontaktu nástroje a obrobku nedochází – v místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor a obrobek se nedeformuje mechanickým zatížením.



Obr. 1. Nástroj a obrobek [3]

Další odlišností proti klasickým technologiím je možnost provádění otvorů složitých tvarů, obrábění tvarových dutin a další technologicky složité operace.

Velkou výhodou je možnost zavedení plné mechanizace a automatizace. Díky tomu dochází k začlenění dané operace do výrobní linky.

Při aplikaci nekonvenčních technologií může také řízeně docházet k ovlivňování vlastností povrchové vrstvy obráběného materiálu, např. zvýšení únavové pevnosti, zvýšení odolnosti proti korozi a další. [3]

## 1.2 Rozdělení nekonvenčních technologií

Nekonvenční technologie se mohou členit z několika hledisek.

- 1) Podle hlavního energetického zdroje: Zřejmě nejpoužívanější a nejprehlednější dělení nekonvenčních technologií je právě podle hlavního energetického zdroje.

Tab. 1. Rozdělení nekonvenčních technologií [2]

MECHANICKÉ PROCESY	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Obrábění ultrazvukem (USM)</li> <li>● Obrábění proudem brusiva (AJM/AFM)</li> <li>● Obrábění vodním paprskem (WJM/AWJM)</li> </ul>
CHEMICKÉ PROCESY	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Chemické obrábění (CM)</li> <li>● Fotochemické obrábění (PCM)</li> </ul>
ELEKTROCHEMICKÉ NEBO ELEKTRICKÉ PROCESY	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Elektrochemické obrábění (ECM)</li> <li>● Elektrochemické broušení (ECG)</li> </ul>
ELEKTROTEPELNÉ NEBO TEPELNÉ PROCESY	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Elektrojisrové obrábění (EDM)</li> <li>● Obrábění laserem (LBM)</li> <li>● Obrábění paprskem elektronů (EBM)</li> <li>● Obrábění paprskem iontů (IBM)</li> <li>● Obrábění paprskem plasmy (PAM)</li> </ul>

- 2) podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa. Nástroj není v přímém kontaktu s obrobkem, ale v procesu úběru materiálu dochází k jeho opotřebení. V takovém případě slouží nástroj k zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny, otvoru či drážky. Nástroj jako tuhé geometrické těleso se používá v těchto procesech:

- Ultrazvukové obrábění
- Elektrochemické obrábění
- Elektrojiskrové obrábění

3) Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu:

- Procesy s brusným účinkem: ultrazvukové obrábění, obrábění proudem brusiva
- Procesy s erozivním účinkem: obrábění vodním paprskem
- Procesy založené na chemickém rozpouštění materiálu: fotochemické a elektrochemické obrábění
- Procesy s tepelným účinkem na úběr materiálu: elektrojiskrové obrábění, laserový, plasmový a elektronový paprsek [2].

## 2 PŘEHLED NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ

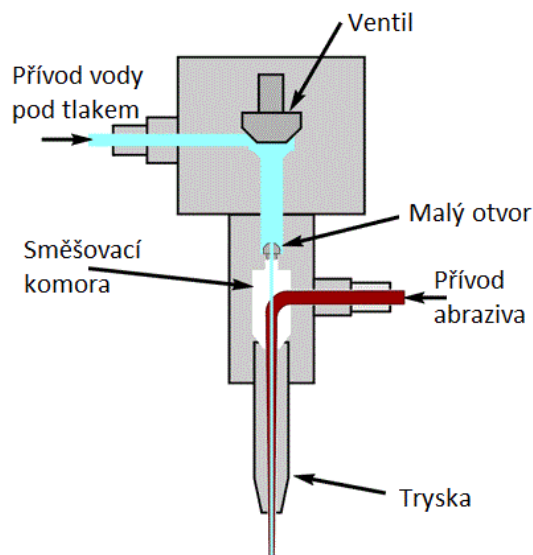
Zřejmě nepoužívanější a nejpřehlednější dělení nekonvenčních technologií je podle hlavního energetického zdroje. Třídí jednotlivé technologie do hlavních skupin podle převládající energie, která je zdrojem úběru materiálu.

### 2.1 Mechanické procesy úběru materiálu

Mechanismus úběru materiálu je zde charakterizován mikrovylamováním a mikrovyštepováním částec materiálu následkem nárazu drobných částic brusiva na povrch. [2]

#### 2.1.1 Obrábění vodním paprskem (WJM)

Principem řezání vodním paprskem je voda stlačená čerpadlem na tlak 400 MPa, která v podobě tenkého paprsku vystřikuje z trysky o průměru  $0,1 \div 0,5$  mm a dopadá na obráběný materiál. Pro vyšší účinnost řezání se přidává brusivo, které se mísí s vodou v řezací hlavě. Výhodou je, že obráběný materiál není nijak tepelně ovlivněn. Jeho velkou nevýhodou je vysoká hlučnost a vysoké náklady. Proto se používá pouze tam, kde není možné použít některý ze způsobů žárového dělení. [4]

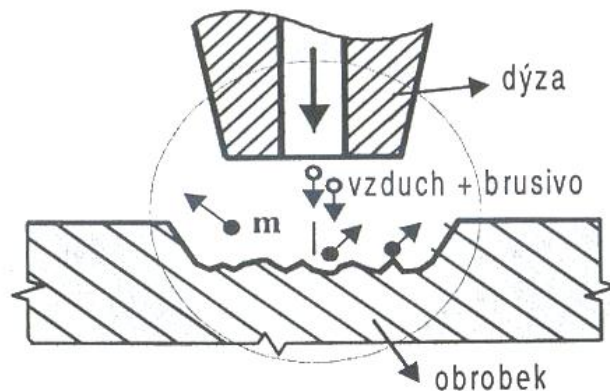


Obr. 2. Řezání vodním paprskem [5]

#### 2.1.2 Opracování abrazivním paprskem (AJM-AFM)

Patří k dokončovacím metodám ve výrobním procesu. Vysokotlaký plyn je směřován s abrazivem a dopadá na obráběný povrch (AJM). K oddělování částic materiálu dochází po dopadu mikročástic abraziva, které vylamují částičky materiálu obrobku. Rychlost pa-

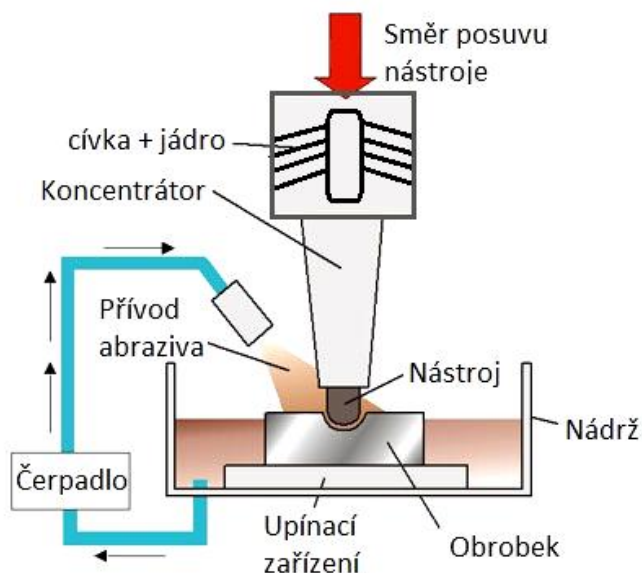
prsku je  $150\div 300$  m/s. K obrábění může také dojít pomocí polotuhého viskózního abrazivního média (AFM).



Obr. 3. Obrábění abrazivním paprskem [2]

### 2.1.3 Obrábění ultrazvukem (USM)

Nástroj kmitá o frekvenci  $20\div 30$  kHz a amplitudě  $10\div 100$   $\mu\text{m}$  kolmo na obráběný povrch materiálu. Při tom se mezi nástroj a obrobek přivádí brusná emulze. Brusná zrna přebírají od kmitajícího nástroje kmitavou kinetickou energii, která působí, že jejich rázy narušují povrch nejen obrobku, ale také nástroje. [6]



Obr. 4. Obrábění ultrazvukem [7]

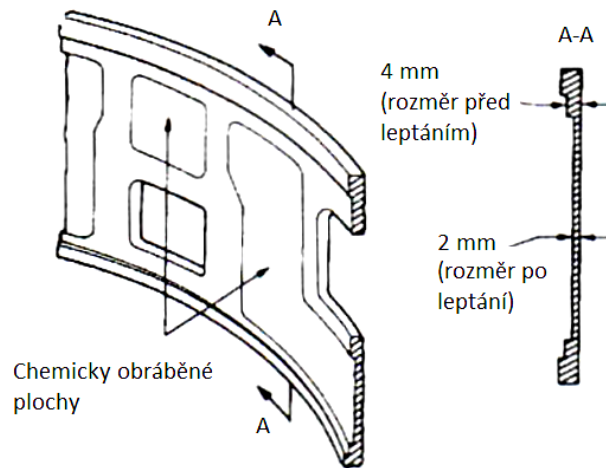
## 2.2 Chemické procesy úběru materiálu

Tyto procesy využívají chemické reakce v plynném anebo kapalném prostředí na odstranění částic (atomů anebo molekul) materiálu a vytvoření požadovaného tvaru dílce.



### 2.2.1 Chemické obrábění (CM)

Chemické obrábění je proces leptání povrchu kovových materiálů postupným rozpouštěním vrstev materiálu do hloubky několika milimetrů.



Obr. 5. Chemické obrábění [3]

### 2.2.2 Fotochemické obrábění (PCM)

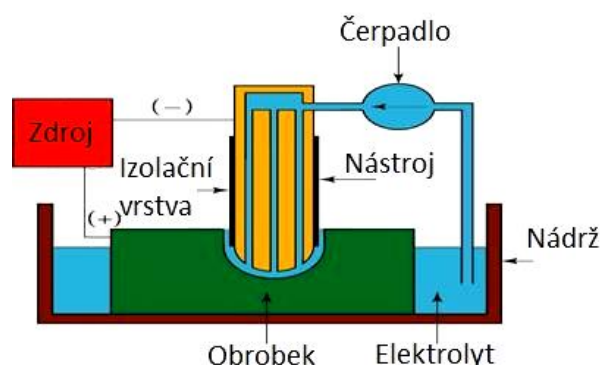
Je to technologie chemického leptání tvarových otvorů do velmi tenkých materiálů a do fólií využívající poznatků fotografické techniky.[2]

## 2.3 Elektrochemické nebo elektrické principy úběru materiálu

Primární zdroj energie je elektrická energie a její působení na kapalinový vodič - elektrolyt.

### 2.3.1 Elektrochemické obrábění (ECM)

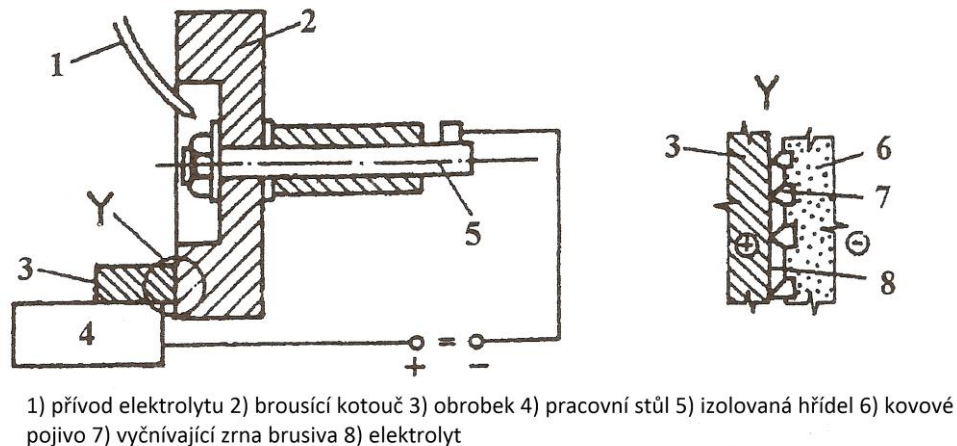
Proces, při kterém se úběr materiálu dosahuje elektrochemickým rozpouštěním anodicky polarizovaného obrobku. Základem procesu je elektrolyza. Obrobek je tedy anoda a nástroj, který nese tvar budoucího tvaru výrobku, je katoda. Elektrolyt protéká v mezeře mezi elektrodami zapojený do obvodu jednosměrného napětí. [2]



Obr. 6. Elektrochemické obrábění [8]

### 2.3.2 Elektrochemické broušení (ECG)

Obráběná součást je připojena ke kladnému pólu a brousící kotouč k zápornému pólu. Zdrojem je stejnosměrné napětí. Pracovní mezera je tvořena zrnny brusiva, které vystupují z elektricky vodivého pojiva. Do pracovní mezery je přiváděn elektrolyt. [3]



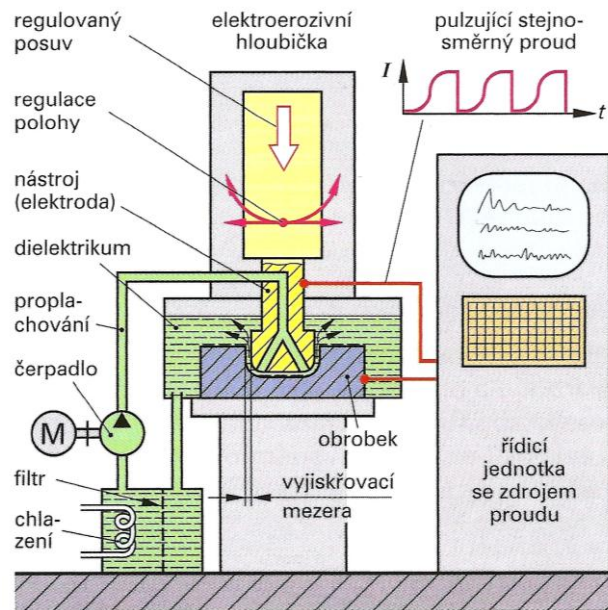
Obr. 7. Elektrochemické obrábění [3]

## 2.4 Elektrotepelné nebo tepelné procesy úběru materiálu

Principem je oddělování částic materiálu energetickým paprskem, který obráběný materiál taví a odpařuje. Energetický paprsek je definovaný jako usměrněný tok extrémně malých částic, jako jsou fotony, elektrony, ionty, plazma nebo chemicky a elektrochemicky reaktivní atomy.

### 2.4.1 Elektrojiskrové obrábění (EDM)

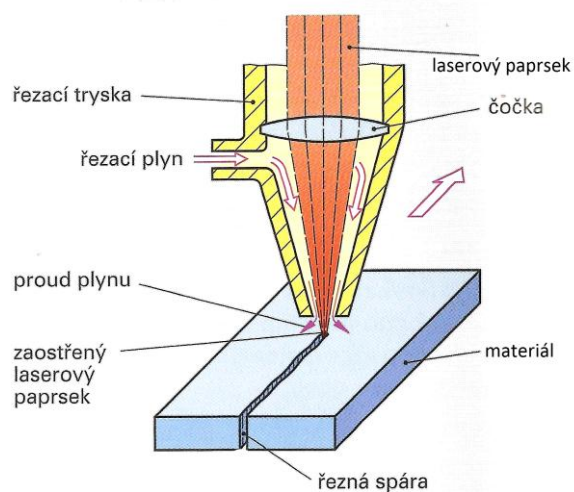
Elektroerozivním obráběním je možno obrábět všechny elektricky vodivé materiály nezávisle na jejich mechanických vlastnostech. Pohyb nástroje (elektrody) se děje přímočarým posuvem kolmo na obrobek. Částičky materiálu jsou odebírány účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Jako materiál elektrody se používá nejčastěji měď nebo grafit. Hodí se zejména na kusovou výrobu dílů se složitě tvarovanými dutinami, nebo na obrábění slinutých karbidů. Velmi rozšířená modifikace elektrojiskrového obrábění je řezání drátem. [6]



Obr. 8. Elektroerozivní obrábění [4]

#### 2.4.2 Obrábění laserem (LBM)

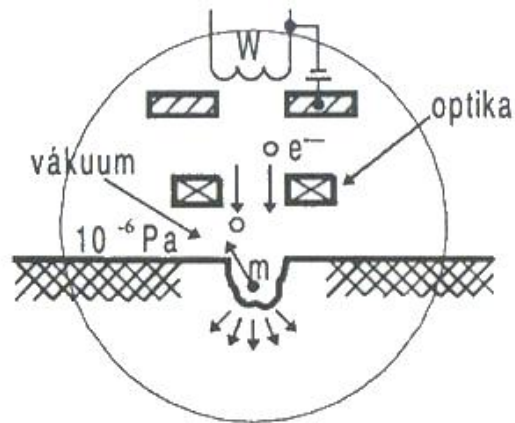
Podstata obrábění laserem spočívá ve spalování nebo protavování řezaného materialu. Řezný monochromatický paprsek je soustředěn do malé plošky o průměru 0,02 až 0,25 mm. Při dopadu na obrobek dochází ke změně energie světelného záření na tepelnou energii. Teplota, která se přitom vyvine je řádově v  $10^4$  °C. [9]



Obr. 9. Řezání laserem [4]

### 2.4.3 Obrábění paprskem elektronů (EBM)

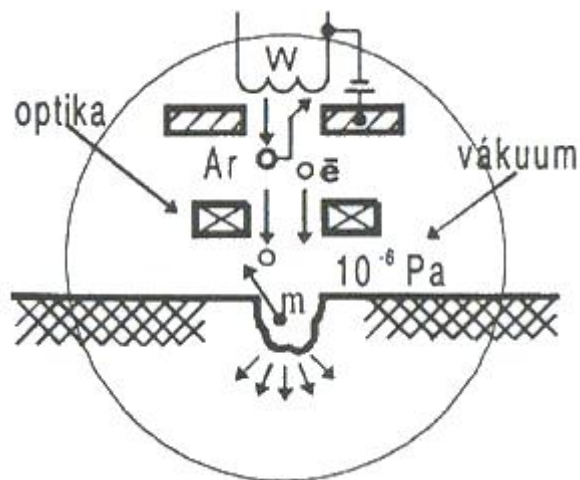
Soustředěný svazek elektronů dopadá vysokou rychlostí na obráběný materiál. Ten se natavuje a odpařuje. Proces probíhá ve vakuové komoře. Obrábění paprskem elektronů je velmi nákladné. [3]



Obr. 10. Obrábění paprskem elektronů [2]

### 2.4.4 Obrábění paprskem iontů (IBM)

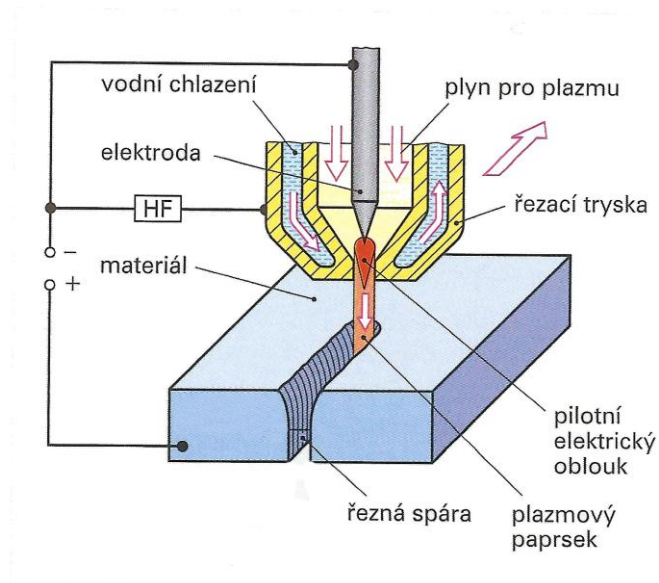
IBM je proces, který probíhá ve vakuu. Nabité atomy (ionty) ze zdroje iontů bombardují povrch obrobku pomocí urychlovacího napětí. Princip rozprašování je přenos hybnosti z iontů plynu na částici materiálu. Kinetická energie iontů při rozprašování překračuje energii vazby atomů a molekul v materiálu, což vede k jejich vypuzení z povrchu. [2]



Obr. 11. Obrábění iontovým paprskem [2]

### 2.4.1 Obrábění plazmovým paprskem (PAM)

Plazma – je elektricky vodivý stav plynu (Ar, Ar+H<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>...), který se na zemi vyskytuje pouze výjimečně. Vzniká při vysokých teplotách nad 20 000°C ionizací plynu nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou. Záporně nabitá elektroda a kladně nabitý obrobek tvoří elektrický oblouk. Při styku plazmy s povrchem tuhého materiálu nastává vlivem vysoké teploty tavení, odtékání, odstříkávání, sublimace nebo rozprašování. [2]



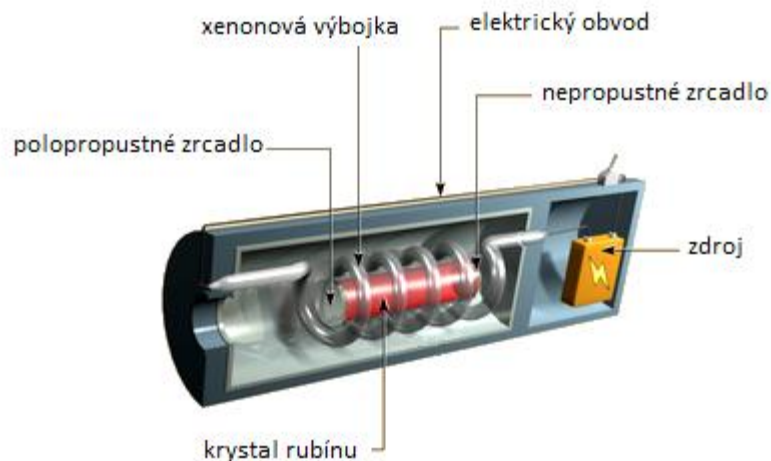
Obr. 12. Obrábění plazmovým paprskem [4]

### 3 OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPSREM

Jen těžko si dnes můžeme představit současnou vědu, techniku anebo dokonce způsob života bez laserových přístrojů. V novodobé historii se stal laser takřka nepostradatelným pomocníkem. Ať už si to uvědomujeme či ne, laser nám slouží téměř každý den. Doma při práci na počítači, relaxování při poslechu hudby, či v obchodě u pokladny v podobě čtečky čárových kódů.

#### 3.1 Historie laseru

První laserový paprsek se podařilo zažehnout 15. května 1960 v americké společnosti Hughes Aircraft Company. Tvůrcem průkopnického zařízení byl americký fyzik Theodore H. Maiman. První laser byl rubínový – rubínová tyčinka měla koncové plochy s vysokou přesností vybroušeny a vyleštěny tak, aby tvořily soustavu dvou rovinných dokonale rovnoběžných zrcadlových ploch. Obě plochy byly zároveň postříbřeny. Na jedné straně byla silnější vrstva stříbra a na druhé tenčí. Touto polopropustnou stěnou pak vyšlehl paprsek laseru ven. Čerpání rubínového laseru se provádí světelným výbojem výkonné xenonové výbojky, která krystal obklopuje. Rubínový laser vyzařuje na vlnové délce  $0,6943 \mu\text{m}$ , což odpovídá „pravé“ červené barvě.



Obr. 13. Laser s krystalem rubínu [10]

Tento Maimanův úspěch spustil lavinu dalších výzkumů a prací na nejrůznějších typech laserů. Ukázalo se totiž, že laserovou akci je možné vyvolat téměř v jakémkoliv prostředí.

Je přirozené, že brzy po úspěchu rubínového laseru byly realizovány lasery s jinými krystaly. Založené většinou na čtyřhladinovém principu (rubínový pracoval na tříhladinovém principu). Snahou bylo zvětšovat účinnost laseru. Rubínový pracoval s účinností zlomku

procenta. Zvyšování výkonu laseru se ubíralo dvěma cestami. Jednak cestou zkracování laserových pulzů a jednak cestou zvyšování celkové energie laseru. Za celou dobu vývoje laseru je charakteristická nesmírná různorodost typů laserů, laserových prostředí, způsobů čerpání, konstrukcí. Do výzkumu se zapojily tisíce laboratoří na celém světě. [11]

Nejvýkonnější laser na světě má vzniknout na území České republiky. Evropská komise schválila projekt za téměř sedm miliard korun. Laser ELI (Extreme Light Infrastructure) má být v provozu v roce 2014 a má pomoci řadě vědeckých oborů, například chemii, biologii, lékařským vědám či vývoji nových materiálů. Nejvýkonnější laser bude mít výkon 20 miliard wattů. [12]

### 3.2 Definice laseru a jeho vlastnosti

Název laser je akronym tvořený počátečními písmeny anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ což v českém překladu znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“. [11]

Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou  $E_2$  mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií  $E_1$  a při tom emitují kvantum světelného záření s frekvencí  $f$ , která se určí z rovnice:

$$E_2 - E_1 = h \cdot f \quad (1)$$

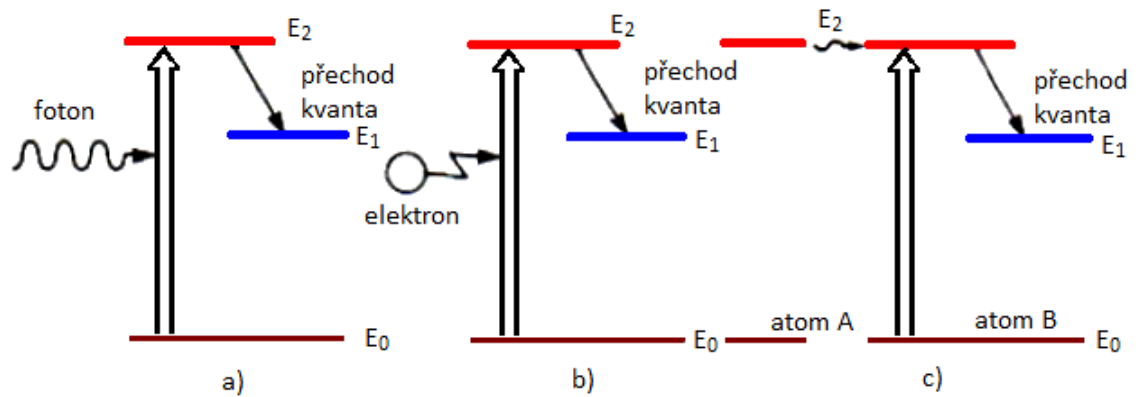
kde  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  je Planckova konstanta.

Atom vybuzený na hladinu 2 může na této hladině setrvat určitou dobu. Energie excitovaného stavu (hladina 2) je vyzářena ve formě fotonu spontánního záření. Jestliže se však atom, který je v excitovaném stavu, dostane do interakce s fotonem záření o energii rovné energetickému rozdílu hladiny 2 a hladiny 1, může dojít ke stimulovanému vyzáření fotonu.

Stimulovaný foton má stejnou energii, směr, fázi a polarizaci s fotonem iniciačním. Spontánně vyzářený foton má náhodou fázi, polarizaci i směr šíření. To je zásadní rozdíl, kterým lze vyjádřit rozdíl mezi spontánním a stimulovaným zářením. [13]

Při běžných podmínkách se atom nachází v základním stavu. Přejít elektronů ze základní hladiny na hladinu s vyšší energetickou hodnotou provází absorpce. Přejít z vyšší energetické hladiny na nižší se nazývá emise, při které vzniká energie ve formě záření

(Obr. 15). Atom je možné přinutit k emisi záření vybuzením. Dodání příslušné energie na dosažení vybuzeného stavu se nazývá čerpání.

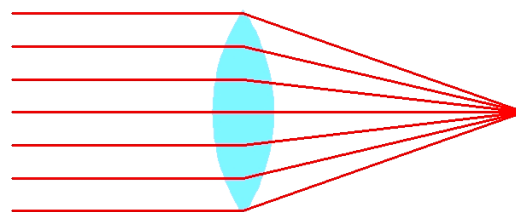


Obr. 14. Zdroje vybuzení atomů [1]

a) čerpání pomocí fotonů (rubínový laser) b) přímá excitace elektronů (argonový laser) c) vzájemná kolize atomů A a B (helium-neonový laser)

Laser neboli kvantový elektronický zesilovač a generátor světelných vln má tyto základní vlastnosti:

- Laser je vysoce monochromatický – to znamená, že je jednobarevný (má jen jednu vlnovou délku). Laserový paprsek je díky své monochromatickosti možné soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku.



Obr. 15. Fokuse laserového paprsku [1]

- Má vysoký stupeň prostorové a časové koherence – to znamená, že všechny částice světelné vlny kmitají v prostorově koherentním prostředí se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku a v časově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření paprsku.
- Laser má malou divergenci (rozbíhavost) – hodnota rozbíhavosti je charakterizována poloviční hodnotou vrcholového úhlu kužele, který vystupuje z rovinného okýn-



ka laseru s průměrem  $2r_0$ , vlnová délka laserového paprsku je  $\lambda_w$ . Divergence laserového paprsku je pak dána vztahem:

$$\Theta = \frac{\lambda_w}{\pi \cdot r_0} \quad (2)$$

- Má vysokou výstupní intenzitu  $I$  [ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ], která není omezena zákony záření absolutně černého tělesa. Pro intenzitu záření laserového paprsku platí:

$$I = I_0 \cdot \exp(-2r^2 / r_0^2) \quad (3)$$

Kde  $I_0$  je intenzita záření ve středu paprsku a  $r_0$  je poloměr, ve kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem  $e^2$ .

- Laser má módobou strukturu TEM – transverse electromagnetic mode – paprsek vytváří buď jednoduchou stopu – základní mód, anebo složitější obrazce. Tyto obrazce jsou buď pravoúhlé, nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód. Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití (řezání, svařování...).

Tento soubor vlastností je velmi důležitý pro fokusaci laserového paprsku. To znamená možnost soustředit do velmi malého bodu vysokou hustotu energie. Při dopadu této energie na materiál pak může dojít k natavení až odpaření materiálu. Tímto způsobem se pak dosahuje požadovaného efektu při zpracování. [1] Srovnání různých energetických zdrojů je v tabulce 2.

Tab. 2. Hustoty energie různých zdrojů energie [1]

Zdroje energie	Dosahovaná hustota výkonu [W.cm <sup>2</sup> ]
● Slunce (čočka f=50mm)	$5 \cdot 10^2$
● Elektrický oblouk	$1 \cdot 10^5$
● Acetylen-kyslíkový plamen	$1 \cdot 10^4$
● Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^5$
● Elektronový paprsek	$4 \cdot 10^8$
● CO <sub>2</sub> laser cw	$1 \cdot 10^9$
● Nd laser pw	$1 \cdot 10^{14}$

### 3.3 Druhy laserů a jejich dělení

Vzhledem k rozmanitosti dostupných laserů a jejich rozdílných vlastností je nutné lasery nějakým způsobem členit. Nejzákladnější rozdělení je podle skupenství materiálu, které se používá na generování záření. Jsou to:

1. Lasery v pevné fázi
2. Plynové lasery
3. Kapalinové lasery
4. Polovodičové lasery

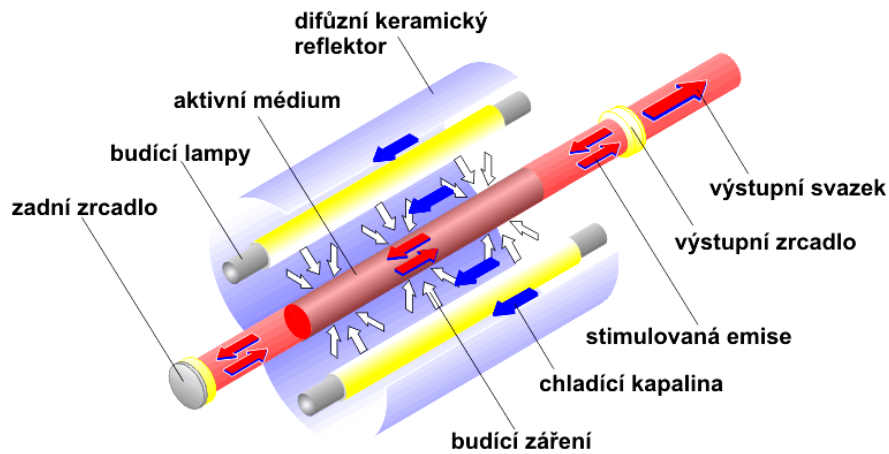
#### 3.3.1 Lasery v pevné fázi

Prvním kvantovým generátorem světla byl rubínový laser. Později se objevilo mnoho dalších laserových materiálů. Rubín je však díky svým fyzikálním a mechanickým vlastnostem stále jedním z nejlepších materiálů pro lasery. [14]

Lasery v pevné fázi mají atomy pracovního prvku rozmístěny v krystalové mřížce pevné látky. K buzení využívají obvykle optické čerpání. Atom přechází na horní laserovou hladinu v důsledku pohlcení světla budících výbojek.

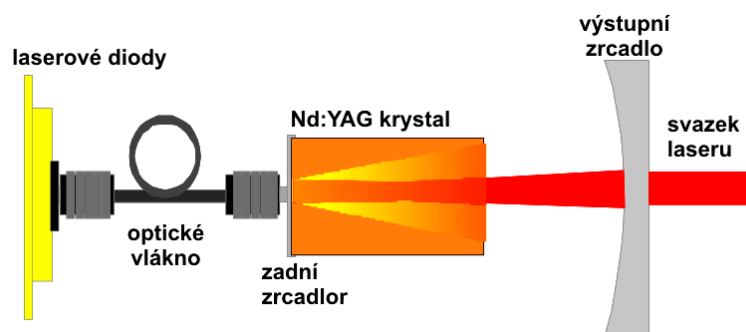
Nejrozšířenější a nejvyužívanější laser v pevné fázi je Nd-YAG laser, který se skládá z pevného Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (ytrium/hliník/kyslík) izometrického krystalu, který obsahuje asi 1% iontů neodymu (Nd<sup>3+</sup>). Tohoto typu laseru je na trhu nepřeborné množství, z nichž mnohé jsou použitelné pro průmyslové aplikace. Používají se Nd-YAG lasery buzené buď výbojkami (LPSS – *lamp pumped solid state*) nebo laserovými diodami (DPSS – *diode pumped solid state*). Konstrukce LPSS Nd-YAG laseru je na obrázku 17. LPSS Nd:YAG lasery

mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, neboť velká část energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo. Z toho důvodu je nutné chlazení.



Obr. 16. LPSS Nd-YAG - laser buzený výbojkami [15]

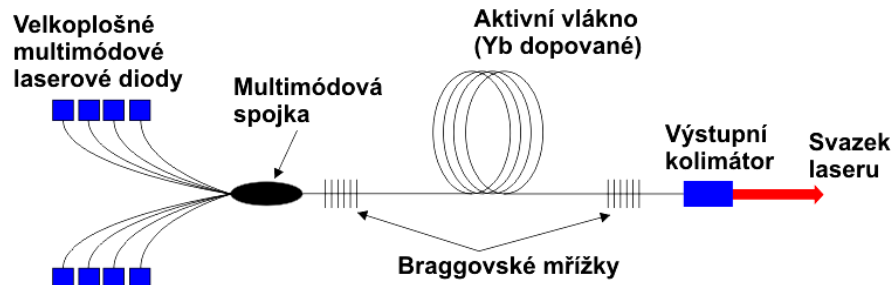
LPSS Nd:YAG lasery používají zejména v pulsním režimu pro laserové svařování (aplikace s požadavkem hlubokého průvaru a malé teplotně ovlivněné zóny) a vrtání (např. v leteckém průmyslu pro vrtání ušlechtilých ocelí a slitin). Výhodou těchto laserů je vysoká energie v pulsu, kterou tyto aplikace vyžadují. Nevýhodou je nízká účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek. Oproti laserům buzeným výbojkami je účinnější laser buzený diodami - DPSS Nd:YAG – obr. 18. Tyto lasery mají také lepší kvalitu svazku. DPSS Nd:YAG laser se používají hlavně v tzv. Q-spínaném pulsním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulsy v řádech ns a průměrný výkon se pohybuje do 100 W. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. V porovnání s LPSS lasery je zde vyšší účinnost, delší životnost a menší nároky na chlazení. [15]



Obr. 17. DPSS Nd-YAG - laser buzený diodami [15]

Dalším rozšířeným laserem v pevné fázi je vláknový (*fibře* či *fiber*) laser. Je technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivní prostředí je dlouhé optické vlákno do-

pované yterbiem (Obr. 19). Buzení z laserových diod je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna a namísto zrcadel jsou zde Braggovské mřížky, což jsou struktury vytvořené přímo na optickém vlákne. Záření je pak z vlákna „vyvázáno“ pomocí optického kolimátoru. [15]

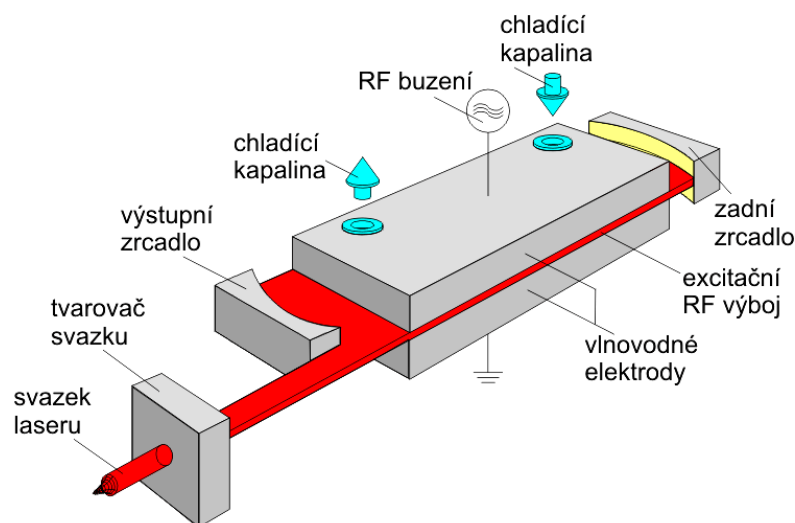


Obr. 18. Vláknový laser [15]

### 3.3.2 Plynové lasery

Z plynových laserů je nejpoužívanější laser na bázi molekuly  $\text{CO}_2$ . Ostatní plynové lasery nemají dostatečný výkon kromě argonového laseru a excimerových laserů. Argonový laser se používá ve fototechnice jako zdroj záření. Excimerové lasery pracují v oblasti UV vlnových délek na bázi molekul.  $\text{CO}_2$  lasery dosahují absolutně největších výkonů. [16]

Využití  $\text{CO}_2$  laserů je pro značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, kůže, papír, skla, apod.) Zde se používají výkony do 1,5 kW. Další průmyslovou aplikací je řezání a svařování kovů (výkony až do 20 kW), kde jsou  $\text{CO}_2$  lasery zavedeny ve velkém množství. Příklad konstrukce  $\text{CO}_2$  laseru je na obrázku 20.



Obr. 19.  $\text{CO}_2$  laser [15]

Laser na obrázku je DC RF CO<sub>2</sub> laser (difúzně chlazený, RF buzený), který se používá do výkonu 5 kW. Buzení aktivního plynu se provádí radio-frekvenčním vlněním, které probíhá mezi dvěma elektrodami, které současně zajišťují díky své velké ploše difúzní chlazení plynu v rezonátoru. Tyto lasery vynikají vysokou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady. [15]

### 3.3.3 Kapalinové lasery

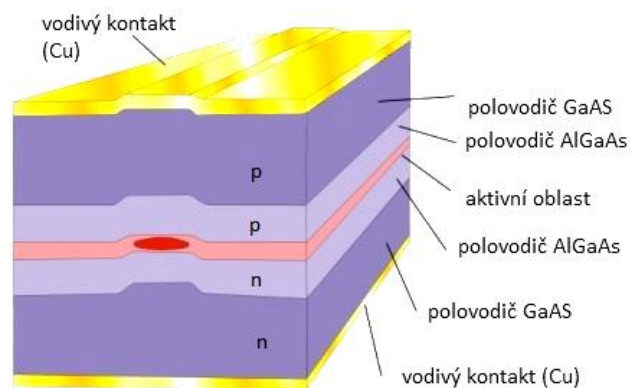
Kapalinové lasery mají řadu výhod, které vylepšují charakteristiky laserů. Jejich hlavní výhodou je velká optická homogenita při velké koncentraci aktivační příměsi. To umožňuje získat velkou hustotu indukovaného záření a značně zmenšit vnitřní ztráty v aktivní látce.

Kapalinové lasery lze rozdělit do dvou skupin. První tvoří lasery s anorganickými aktivními látkami a druhou lasery s organickým aktivními látkami. Hlavní nevýhodou, která brání rozšíření používání kapalinových laserů je jejich divergence. Je totiž o dva řády vyšší než u tuhofázových laserů. [17]

### 3.3.4 Polovodičové lasery

Pro použití polovodičů je typická miniaturizace a snížení energetické náročnosti. Výhodou je, že pro generaci koherentního záření stačí rezonátor o rozměrech několika desetín milimetrů. U polovodičových laserů je možnost plynulého přeladění frekvence záření v poměrně široké spektrální oblasti.

Aktivní prostředí polovodičových laserů se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsemi. K buzení se nejčastěji využívá injektování proudu přes přechod PN polovodiče. Může se však použít i optické buzení. [13]



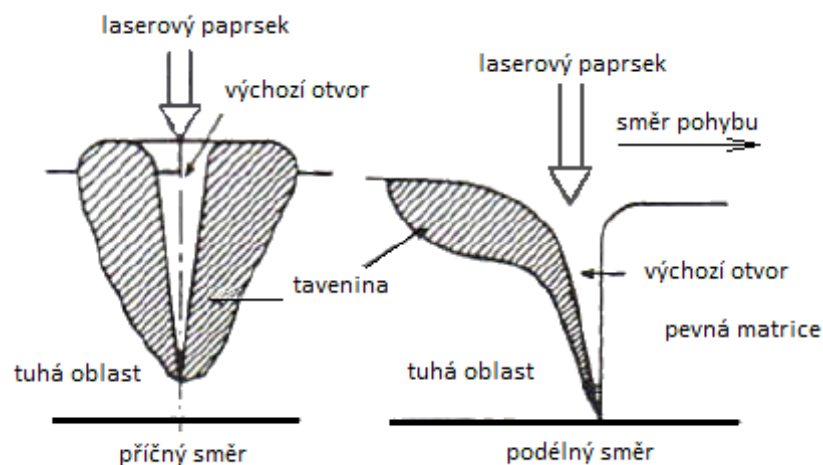
Obr. 20. Polovodičový laser [13]

### 3.4 Působení laseru na materiál

Při styku laserového paprsku s materiálem dochází k jejich vzájemné interakci a efektům, které jsou závislé na vlastnostech materiálů a jejich schopnostech pohlcovat a odrážet laserové záření.

Po dopadu paprsku na materiál se část intenzivního fokusovaného paprsku odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde skrz materiál. Absorbovaná část paprsku způsobuje ohřev materiálu, který se nataví a následně odpaří v dané oblasti působení laserového paprsku. V natavené zóně při odpařování částic materiálu vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je vytlačována ze vznikajícího otvoru tlakem páry. V místě dopadu paprsku se následkem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do materiálu.

Odrazivost paprsku je tak nežádoucí. Dá se snížit například zdrsněním povrchu, vytvořením krycí nekovové vrstvy nebo ohřátím materiálu. Se zvyšováním teploty povrchu materiálu tedy odrazivost klesá a minimální hodnoty dosahuje při dosažení teploty tavení materiálu.



Obr. 21. Působení laseru na materiál [1]

V závislosti na použité technologii obrábění (vrtání, řezání, hloubení...), tepelně ovlivněná zóna může být dvojrozměrná nebo trojrozměrná.

Řezání laserem se charakterizuje jako ustálený proces, při kterém se tepelně ovlivněná zóna tvoří pouze na stěnách řezu. Vrtání pomocí laseru se charakterizuje jako proces nestacionární, protože čelo eroze se pohybuje s ohledem na pevný laserový paprsek a tepelně ovlivněná zóna se tvoří na stěně otvoru. [1]

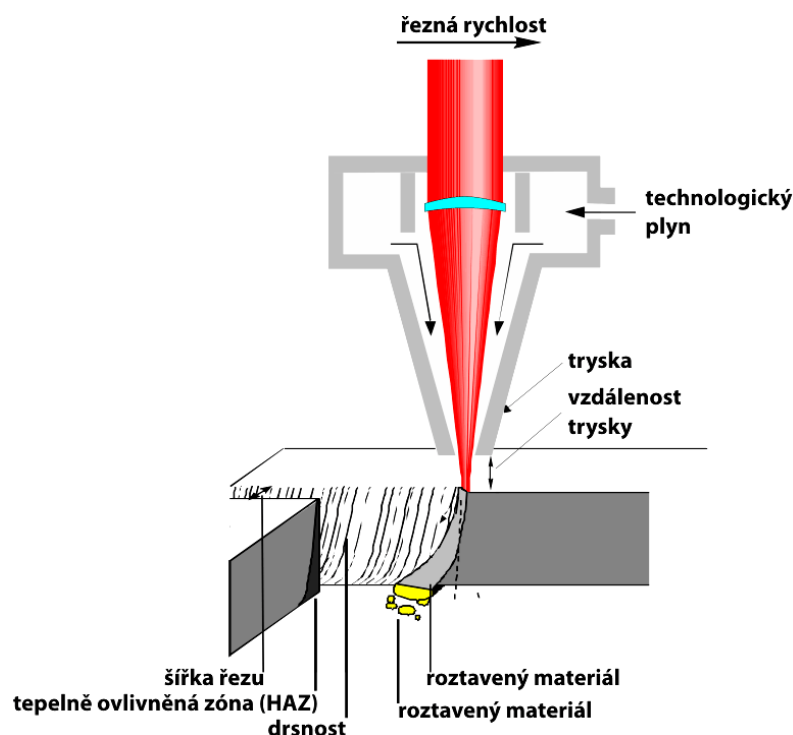
### 3.5 Aplikace laserového paprsku pro opracování materiálů

Díky možnosti zaměřit laserový paprsek do velmi malé plošky, umožňuje laser kvalitním způsobem opracovávat materiál. Využívá se toho v řadě nejen strojírenských aplikací. Nejdůležitější oblasti použití laserového paprsku ve strojírenství jsou shrnuty v následujících odstavcích.

#### 3.5.1 Řezání laserovým paprskem

Podle způsobu řezání se rozlišuje tavné řezání a spalovací řezání. Při tavném laserovém řezání je laserovým paprskem roztavená látka odfukována z místa řezu inertním plynem. Nejčastěji používaným inertním plynem je argon nebo dusík. Tento postup se hodí především pro řezání kovů, které mají teplotu tání nižší než teplotu, při které hoří. To znamená pro vysocelegované oceli, hliníkové slitiny, polovodičové materiály, plasty, keramické materiály...

Při spalovacím laserovém řezání zahřívá laserový paprsek materiál na zápalnou teplotu. Materiál se spaluje v proudu přiváděného kyslíku, který zároveň odfukuje vznikající oxidy. Pomocí laserových zařízení s vodním chlazením lze obrábět například součástky, které jsou citlivé na poškození teplem. Řezací hlavice může být umístěna ve větší vzdálenosti nad řezaným materiálem, což umožňuje trojrozměrné řezání. [4]



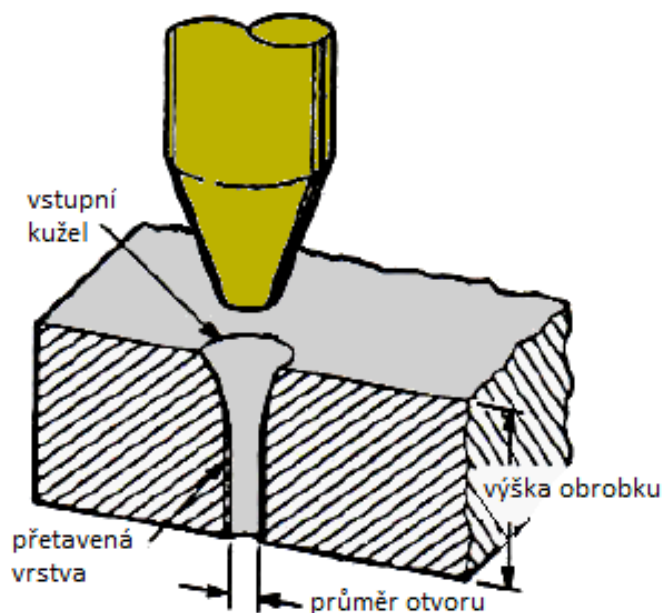
Obr. 22. Laserové řezání materiálu [15]

Při řezání laserem se dosahuje velké rozměrové i tvarové přesnosti a dobré jakosti řezných ploch. [9]

### 3.5.2 Vrtání laserem

Při vrtání zahřívá paprsek laseru materiál rychlostí  $10^{10}$  °C/s. Materiál se odpaří a umožňuje tak průnik paprsku hlouběji. V průběhu vrtání se natavovaný materiál akumuluje v otvoru, vlivem eroze částic se rozstříkuje po stěnách otvoru. Tlak v otvoru dosahuje hodnot kolem  $10^3 \div 10^4$  MPa a způsobí, že proud natavovaného kovu proudí ven z otvoru rychlostí ultrazvuku.

Při vrtání se používá postup „ablation“. To znamená postupné rychlé odstraňování materiálu z řezu bez jeho ohřátí nad odpařovací teplotu. Pouze malá část materiálu, která e nachází uprostřed laserového paprsku je odpařena. Materiál se tedy při vrtání odstraňuje především ve formě kapaliny a pouze malá část také odpařováním. [1]



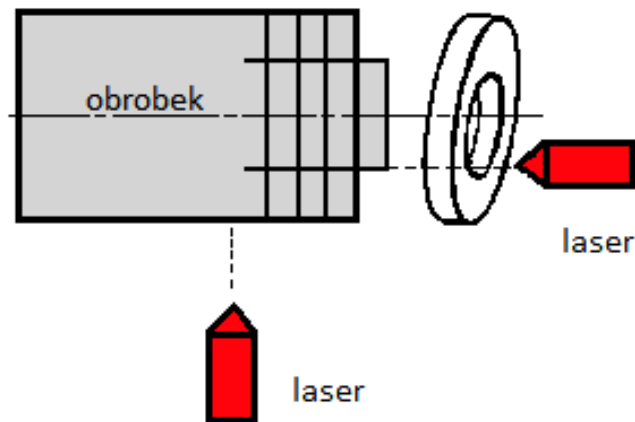
Obr. 23. Typický tvar otvoru vrtaného laserem [1]

### 3.5.3 Soustružení laserem

Výhodou laserové soustružení je absence mechanického namáhání obrobku. Na obráběný materiál působí pouze laserový paprsek. Díky tomu nedochází ke chvění obrobku vlivem nástroje. Další výhodou oproti konvenčnímu soustružení je možnost obrábět těžkoobrobitelné materiály. Nevýhodou je však menší úběr materiálu. Laserem lze také soustružit trojrozměrně. Používají se k tomu dva paprsky laseru, které obrábí současně. Jeden paprsek je



kolmý na osu rotace obrobku a druhý je s ní rovnoběžný. Takto se dá soustružit mezikruží (Obr.25).



Obr. 24. Soustružení mezikruží laserem [1]

#### 3.5.4 Mikroobrábění laserem

Na mikroobrábění se používají excimerové lasery a Nd-YAG lasery. S pulzním režimem paprsku s ultrakrátkým trváním jednoho impulsu. Využívá se obvykle na opracování elektronických součástí či označování výrobků. [1]

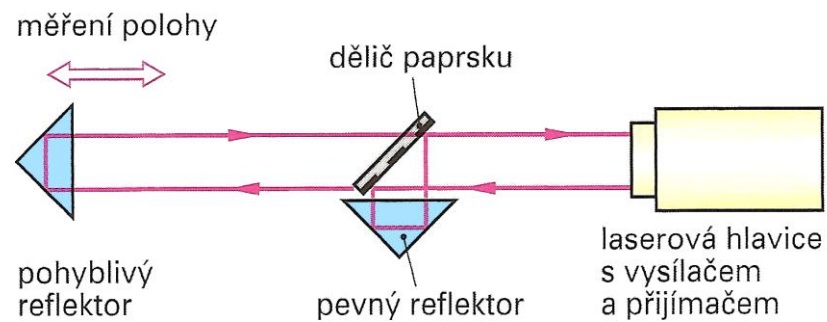
#### 3.5.5 Dokončování povrchů laserem

Dokončování povrchu pomocí laseru funguje na principu tangenciálního směřování paprsku na rotačně pohybující se materiál. Dochází tak k zahlazování mikronerovností po předcházející operaci. K úběru materiálu dochází buď odpařením, nebo natavením a následným odstraněním taveniny pomocí proudícího plynu.

#### 3.5.6 Další aplikace laseru ve strojírenství

Další oblastí, kde se laser hojně využívá je svařování materiálů (Obr. 26.). Hloubka svaru závisí na svařovaném materiálu, výkonu laseru, průměru jeho paprsku a na rychlosti posuvu. Svařovat lze všechny svařitelné materiály. Výhodou jsou malé tepelné deformace svařovaných dílů, možnost automatizace, či velká pevnost svaru. Nevýhodou pak vysoké investiční i provozní náklady. [4]

Laserové přístroje se také používají v metrologii. Pro kontrolu nastavení polohy souřadnicových strojů se používají laserové interferometry (Obr. 27.). Ten dělí vysílaný laserový paprsek polopropustným zrcadlem na měřicí paprsek, který směřuje k reflektoru (umístěn na pohyblivé části stroje, jehož vzdálenost se měří) a na porovnávací paprsek, který se přes pevný hranolový reflektor a polopropustné zrcadlo vrací do přijímače měřící hlavičky [4].



Obr. 25. Laserový interferometr [4]

## 4 OBRÁBĚNÍ PAPERSEM PLASMY

Obrábění paprskem plazmy je dnes velmi rozšířená technologie, která nachází uplatnění nejen při dělení materiálů, ale také při jejich tavení, svařování, povlakování a dalších technologických operacích.

### 4.1 Historie plasmového obrábění

Plazmové způsoby řezání (PBM - Plasma Beam Machining nebo taky PAM – Plasma Arc Machining) se začaly používat začátkem 50. tých let 20. století jako alternativní způsoby řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů. Sloužily tak jako náhrada za řezání kyslíkovým plamenem. Samotný pojem „plazma“ zavedl americký chemik a fyzik Irving Langmuir v roce 1923.

Plazma, jako čtvrté skupenství látky, je elektricky vodivý stav plynu, který se na Zemi vyskytuje jen výjimečně. Vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách, které se pohybují nad 20 000 °C, nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou.

Termín plazma se používá pro označení velkého počtu částic (atomů, molekul, iontů, elektronů) bez pevné vzájemné vazby, ze kterých aspoň některé mají elektrický náboj a v dostatečně velkém objemu je součet kladných a záporných elektrických nábojů nulový. Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům elektrického a magnetického pole.

### 4.2 Vznik plazmy

Plasma je výjimečný stav plynů. Díky ionizaci atomů se stává vodivým. Je to směs elektronů a kladných iontů, která je většinou rozložena uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může však být částečně nebo úplně ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy se pohybuje kolem 5000÷15000 °C. Teplota zcela ionizované plazmy je asi 100 000 °C.

Plazma může vzniknout ohřevem látky na vysokou teplotu nebo elektricky obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, případně mechanicky kompenzovaným iontovým svazkem.

Jako zdroj tepla se pro ionizaci plynů nejčastěji používá elektrický oblouk. Samotný oblouk je plazmou s nízkým stupněm ionizace. [1]

Vznik plazmy je zobrazen na obrázku 13. Mezi wolframovou elektrodou a řezací tryskou se nejprve zapálí pilotní elektrický oblouk. Přiváděný plyn se při průchodu elektrickým obloukem přemění na plazmu – vznikne rozkladem molekul řezných plynů. Pohyb tohoto

plynu je urychlován elektrickým polem, vytvořeným mezi wolframovou elektrodou a obráběným materiálem. Jakmile dopadne paprsek plazmatu na material dojde k okamžitému tavení a odpařování materiálu. [4]

Důležité je, aby byl plazmový oblouk stabilizovaný. To znamená usměrnění paprsku do požadovaného tvaru (jeho zúžení). Tuto funkci je možné zabezpečit několika způsoby:

- Tvarem dýzy plazmového hořáku
- Proudícím plynem
- Vodou

Abychom vytvořili technicky kvalitní plazmu, je nezbytné sledovat její technologické parametry. Mezi ně patří zejména teplota plazmy a její elektrická vodivost, průměr paprsku plazmy, hustota proudu plazmy či stupeň fokusace paprsku po výstupu z trysky. [1]

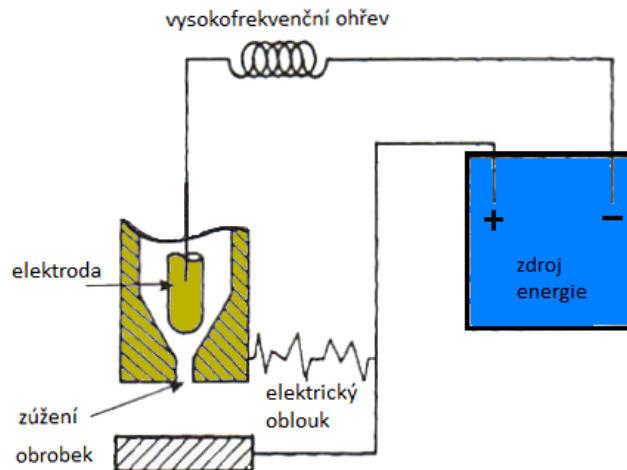
### 4.3 Plazmové zařízení a používané plyny

Při používání technologie plazmového obrábění se využívá řada plynů, které mají zásadní vliv na obráběcí proces. Podle funkce můžeme plyny rozdělit na:

- Plazmové plyny – argon (Ar), argon a vodík (Ar + H<sub>2</sub>), helium (He), dusík (N<sub>2</sub>), oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), vzduch – tyto plyny jsou přiváděny přímo do elektrického oblouku a následně vytvářejí plazmu.
- Fokusační plyny – tyto plyny slouží k zúžení plazmového paprsku. Nejčastěji se používá argon (Ar), argon a vodík (Ar + H<sub>2</sub>), argon a dusík (Ar + N<sub>2</sub>), dusík (N<sub>2</sub>)
- Ochranné plyny – slouží k ochraně plazmového paprsku a místa řezu před účinky atmosféry. Nejčastěji se používá argon (Ar). [1]

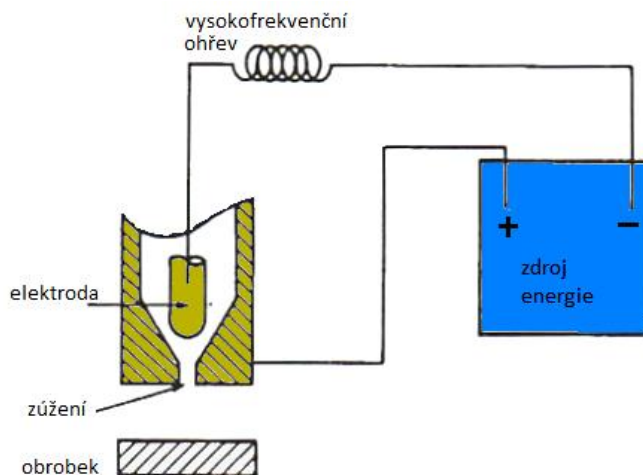
Plazmové zařízení se skládá ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky. V dnešní době se běžně využívá NC nebo CNC řízení. Plazmové zařízení se dělí na dva typy:

- Zařízení využívající přenesený (transferovaný) oblouk – oblouk se tvoří mezi wolframovou elektrodou uvnitř plazmového hořáku a obráběným materiálem – obr. 14. Používá se pro vodivé materiály.



Obr. 26. Transferovaný oblouk [1]

- Zařízení využívající nepřenesený (netransferovaný) oblouk – oblouk se tvoří mezi dvěma elektrodami uvnitř plazmového hořáku. Používá se pro nevodivé materiály.



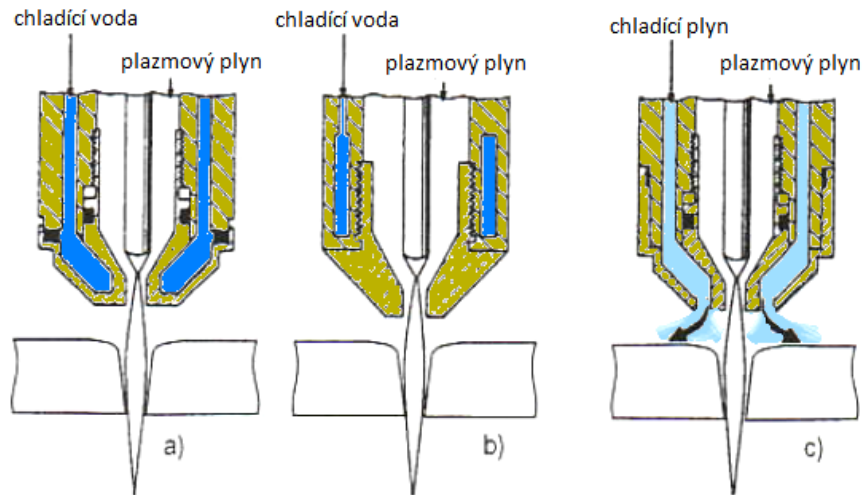
Obr. 27. Netransferovaný oblouk [1]

Plazmový hořák zabezpečuje:

- přívod proudu na elektrodu
- přívod všech pracovních plynů
- tvarování plazmového paprsku a usměrňuje paprsek do místa obrábění.

Plazmové hořáky se dají členit podle výkonu, způsobu chlazení, složení plazmového plynu, druhu materiálu katody, pracovního systému hořáků či použití (ruční, strojní).

Chlazení hořáků je velmi důležitá funkce v oblasti technologie plazmového obrábění. Chlazení bývá zabezpečeno právě konstrukcí hořáků. Může být chlazen vodou buď přímo anebo nepřímo. Chlazení může být také zabezpečeno proudícím plynem – obr. 16. [1]

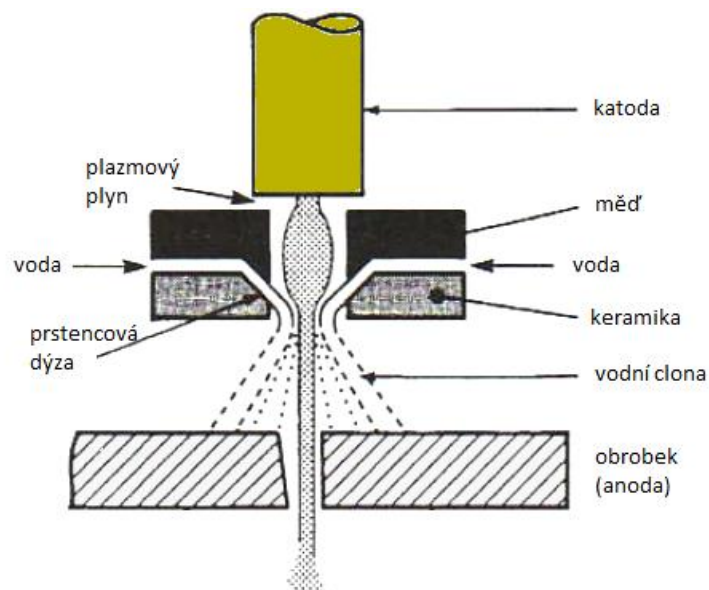


Obr. 28. Způsoby chlazení plazmového hořáku [1]

*Přímé chlazení vodou b) nepřímé chlazení vodou c) chlazení plynem*

Pro stabilizaci plazmového oblouku se používá voda nebo směs plynů. Nejčastěji se používá směs argonu, dusíku, vodíku a stlačeného vzduchu. Nevýhodou tohoto způsobu stabilizace je vznik dýmu, prachu, hluku a ultrafialového záření. Při stabilizaci směsí plynů se také uvolňuje velké množství zdraví škodlivých oxidů dusíku, které se musejí odsávat. To znamená další náklady na zařízení.

Stabilizace pomocí vody je tak méně nákladnější. Voda zde nahrazuje fokusační plyn a je vstříkovávána do plazmového paprsku. Voda vytváří také ochrannou vrstvu kolem místa řezu. Ovlivňuje tak příznivě šířku řezu a samotnou kvalitu řezu.

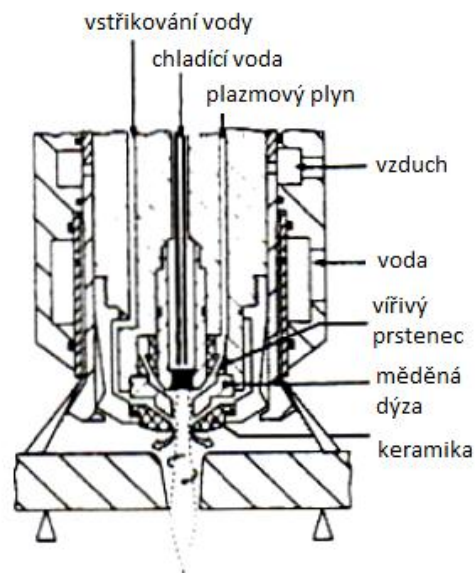


Obr. 29. Stabilizace plazmového oblouku vodou [1]

Výhody stabilizace plazmového oblouku vodou oproti stabilizaci pomocí směsi plynů je:

- Vyšší stabilita oblouku
- Vyšší trvanlivost trysky
- Zvýšení rychlosti řezání
- Zvýšení kvality řezu

Příklad plazmového hořáku se vstřikováním vody je na obrázku 18.



Obr. 30. Plazmový hořák se vstřikováním vody [1]

#### 4.4 Mechanismus plazmového řezání materiálů

Princip plazmového dělení materiálu spočívá v tavení materiálu extrémně vysokými teplotami, které se tvoří vnikem plazmy. Přenos tepla do materiálu je zhruba  $24,1 \div 68,7 \text{ MW/m}^2$ .

Působením vysokých teplot ( $15\,000 \div 33\,000 \text{ °C}$ ) nastává tavení materiálu, odtékání, odstříkávání, odpařování, sublimace nebo rozprašování. Tyto jevy lze využít u dalších technologiích jako například svařování či nanášení povlaků.

Teorie principu úběru materiálu je založena na předpokladu, že materiál obrobku absorbuje veškerou tepelnou energii, kterou plazma uvolňuje při styku s materiálem. Následně pak dojde k jeho tavení a odtékání nebo odpaření.

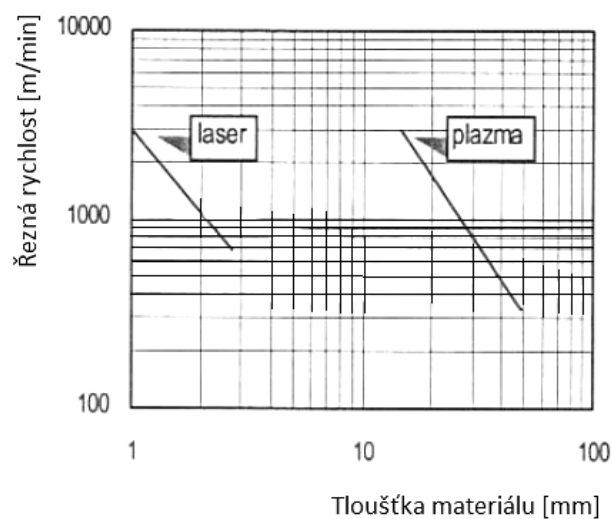
Proces úběru materiálu je ovlivněn následujícími parametry:

- Průměr trysky – žádoucí je, aby průměr trysky byl velmi malý. Ovšem čím menší je průměr trysky, tím je její životnost nižší – dochází k opálení výtokového otvoru trysky. Používané průměry trysek jsou v rozsahu 0,79 mm÷6,35 mm.



Obr. 31. Trysky plazmového hořáku [18]

- Výkon pro tvorbu oblouku – pohybuje se kolem 250 kW pro proudy v rozsahu 50÷1000 A a napětí 100 ÷250 V. Výkon se mění s materiálem a jeho tloušťkou.
- Použité plazmové plyny – argon, helium, dusík... Tyto plyny ovlivňují kvalitu řezu, rychlost řezání a náklady na řezání.
- Vzdálenost mezi hořákem a materiálem – velmi důležitý parametr, který má vliv na rovinnost řezu. Tryska nesmí být ani moc blízko ani moc daleko od obráběného materiálu. Tato vzdálenost se rovněž mění s tloušťkou řezaného materiálu.
- Řezná rychlost – má velký vliv na jakost obrobené plochy, velikost plochy ovlivněné tepelným účinkem, velikost řezné spáry.



Obr. 32. Řezné rychlosti plazmového a laserového řezání [1]

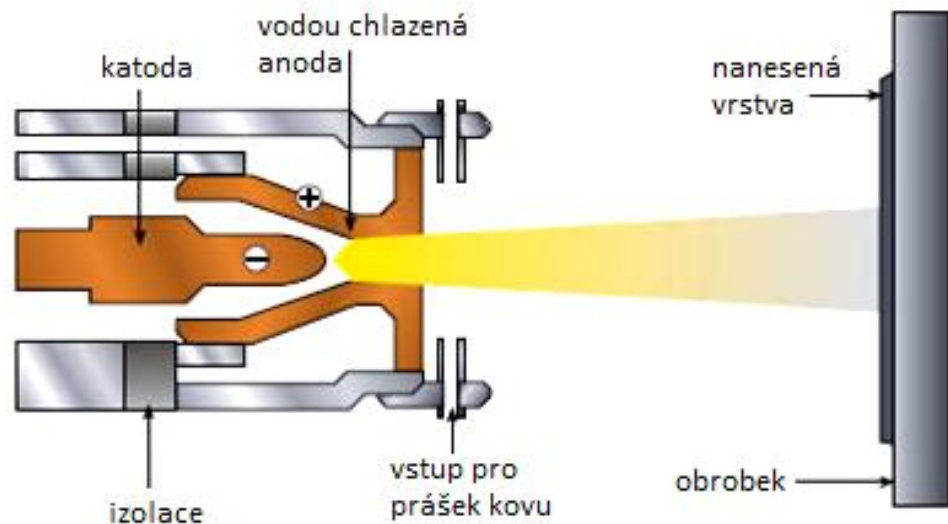


- Tloušťka řezné spáry a kolmost hran – v porovnání s laserem je tloušťka řezné spáry mnohem tlustší. Pohybuje se v řádech milimetrů. Také řezné hrany nejsou kolmé. Jejich zešíkmení je až  $10^\circ$ . To může být výhodou při svařování plechů. [1]

## 4.5 Hlavní aplikace plazmového paprsku

### 4.5.1 Plazmové nanášení povlaků

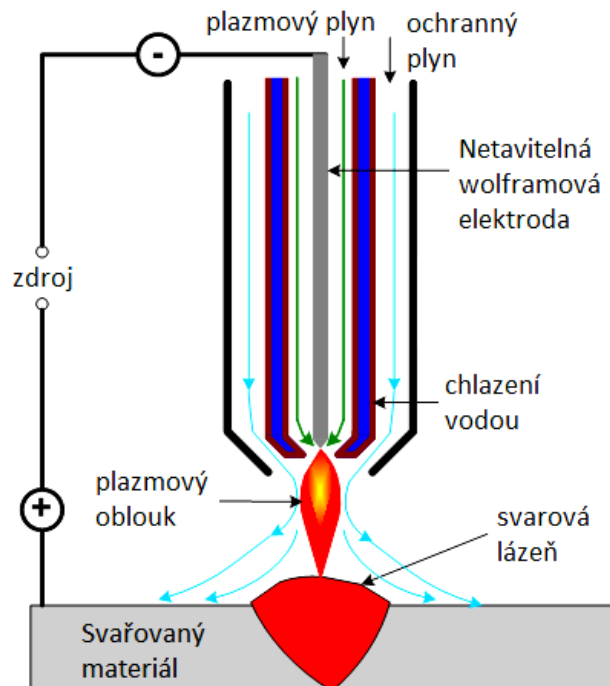
Plazmovou technologií se nanáší například vysoce kvalitní kovové a keramické povlaky o tloušťce 0,1 mm odolné vůči korozi, teplotě a opotřebení. Obecně nanášení povlaků slouží ke zlepšení vlastností výrobku. Materiál, který chceme nanášet je přiváděn do plazmového paprsku v podobě prášku. Při styku s plazmovým obloukem dojde k jeho natavení a nanesení na povrch materiálu. Povlakování lze provádět ručně nebo strojně. [19]



Obr. 33. Plazmové nanášení povlaků [19]

### 4.5.2 Plazmové svařování

Představuje poměrně širokou oblast použití plazmy. Výhodou je například zvýšení rychlosti svařování. Odpadá také nutnost upravovat svařované hrany před samotným svařováním.



Obr. 34. Plazmové svařování [20]

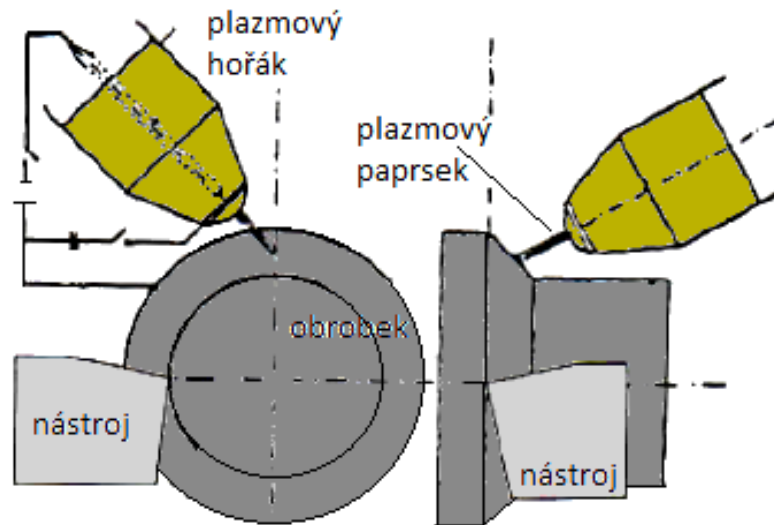
#### 4.5.3 Plazmové dělení materiálu

Řezání (dělení) materiálů, např. řezání plechů, hliníkových plátů, korozivzdorných ocelí – Obr. 12. Má-li plazma vlivem většího tlaku a množství přiváděného plynu do hořáku větší výstupní rychlost, má i větší dynamický účinek a dochází k dělení materiálu. Vysoká teplota plazmy umožňuje řezat prakticky všechny kovové materiály. Výkon řezání je v porovnání s řezáním kyslíkovým plamenem až pětinasobný. Řezací stroje jsou často vybaveny systémem číslicového řízení. Jednotlivé díly bývají navrhovány počítačovým softwarem pro CNC systém, který ovládá plazmový hořák. [9] Řezané díly mohou být také pro snadnější pozdější identifikaci popisovány plazmovým popisovačem. Plazmové řezací stroje bývají také vybaveny více pracovními hlavami. Například vrtací hlavou, která obsahuje vrtací nástroje. To se používá při zhotovování malých otvorů do materiálu o větších tloušťkách.

#### 4.5.4 Plazmové obrábění

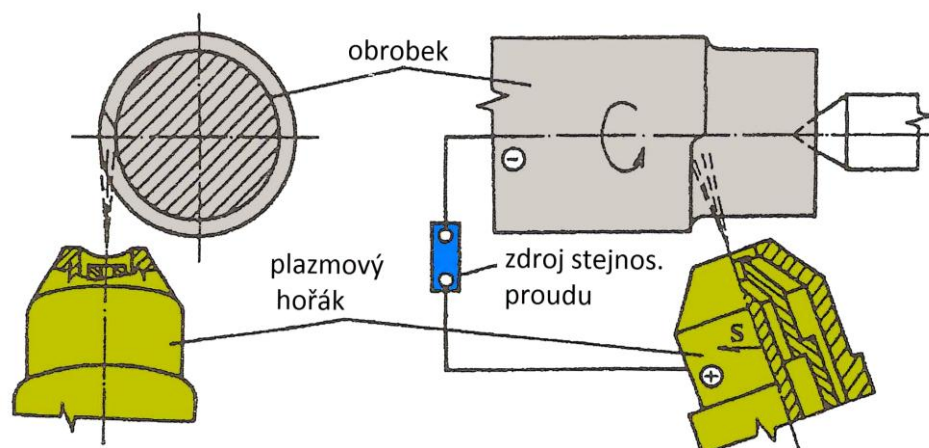
Obrábění (soustružení) pomocí plazmového paprsku se může vyskytovat ve dvou podobách. Plazmový hořák může sloužit jako přídavný nástroj sloužící k ohřevu materiálu. Dochází tak ke zlepšení obrobitelnosti opracovávaného materiálu. Ohřev je dobře regulovatelný a lze snadno umístit do oblasti před řeznou hranu nástroje. Díky tomu jsou omezeny případné strukturální změny v povrchu obrobku. Výhodou této technologie je prodloužení

životnosti obráběcího nástroje a zvýšení rychlosti úběru materiálu. Nevýhodou je vznik dlouhé třísky, která může být nebezpečná.



Obr. 35. Plazmové soustružení s klasickým nástrojem [1]

Soustružení plazmovým paprskem může probíhat také bez klasického nástroje. K úběru materiálu dochází působením samotného plazmového paprsku. Paprsek dopadá na obráběný povrch v tangenciálním směru a ubírá povrchovou vrstvu materiálu. Obrobek koná rotační pohyb jako u klasického soustružení. Tento typ soustružení je vhodný pro těžkoobrobitelné materiály jako jsou žáruvzdorné oceli. Výhodou je až desetinásobná rychlost úběru materiálu v porovnání s konvenčním soustružením pomocí nástroje ze slinutých karbidů. Nevýhodou je tepelné ovlivnění povrchové vrstvy obrobku. Obrábění pomocí plazmového paprsku se využívá především při hrubování rozměrově velkých předmětů, nebo pro rotační součásti z tvrdokovu. [1]



Obr. 36. Plazmové svařování bez klasického nástroje [1]

## CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části bude porovnat laserový a plazmový paprsek při řezání materiálu.

- Závislost řezné rychlosti na kvalitě řezných ploch při obrábění laserovým paprskem
- Závislost řezné rychlosti na kvalitě řezných ploch při obrábění plazmovým paprskem
- Závislost řezné rychlosti na rozměrovou přesnost při obrábění laserovým paprskem
- Závislost řezné rychlosti na rozměrovou přesnost při obrábění plazmovým paprskem
- Závěrečné porovnání výsledků dvou použitých technologií

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CHARAKTERISTIKA VZORKŮ A POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

### 5.1 Obráběné materiály

Pro vyhodnocení výsledků obrábění laserovým a plazmovým paprskem byla použita klasická konstrukční ocel 11 375 (EN S235JR) a nerezová ocel 17 349 (EN X2CrNiMo17-12-2)

Chemické složení materiálu **11 375** je:

*Tab. 3. Chemické složení oceli 11 375 [21]*

Uhlík (C)	max 0,19%
Mangan (Mn)	max 1,5%
Fosfor (P)	max 0,45%
Síra (S)	max 0,045%
Dusík (N)	max 0,014%

Tato ocel je neušlechtilá, obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Nejčastěji se používá na součásti konstrukcí a strojů. Především dílce středních tloušťek, které jsou namáhané staticky i dynamicky. Dále pro součásti vyráběné z plechů, podélně svařovaných dutých profilů a součásti kované pro tepelná energetická zařízení a tlakové nádoby pracující s omezeným přetlakem a teplotou do 300 °C.

Chemické složení materiálu **17 349** je:

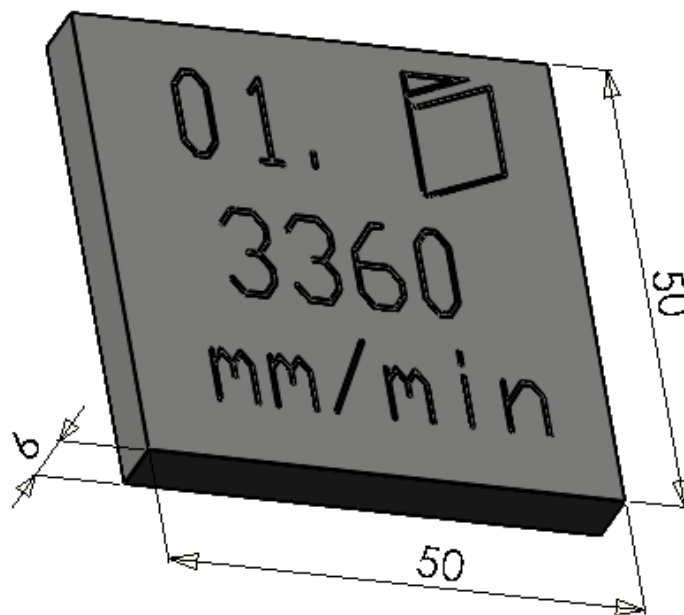
*Tab. 4. Chemické složení oceli 17 349 [21]*

Uhlík (C)	max 0,03%
Chrom (Cr)	16,5-18,5%
Mangan (Mn)	max 2%
Molybden (Mo)	2-2,5%
Níkl (Ni)	11-14%
Fosfor (P)	max 0,045%
Síra (S)	max 0,03%
Křemík (Si)	max 1%

Tato ocel má zvýšenou odolnost proti korozi v chemickém prostředí. Používá se pro konstrukční díly, přístroje a aparáty chemického průmyslu s vysokým chemickým namáháním,

především kyseliny mravenčí, octová, sírová a fosforečná. Používá se pro zařízení přicházející do kontaktu s mořskou vodou a průmyslových barev, laků, sulfidů...

Následně bylo laserovou a plazmovou technologií vyrobeno osm vzorků od každého materiálu. Vzorky byly z plechu tloušťky 6 mm a rozměrech 50 x 50 mm.



Obr. 37. 3D Model obráběného vzorku

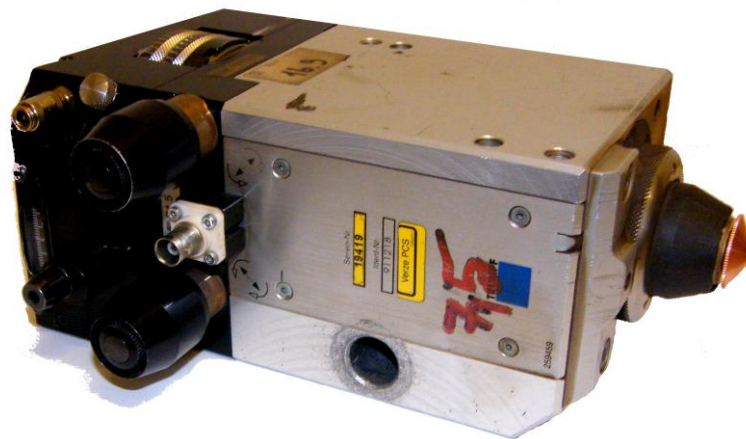
## 5.2 Zařízení pro laserové obrábění

K laserovému obrábění byl použit stroj TRUMPF TRAUMATIC L 3030 o maximálním výkonu 3,2 kW. Toto zařízení je určeno k laserovému řezání kovových materiálů a opracování rovných plechů. Stroj má integrovaný CO<sub>2</sub> laser třídy 4. Jako řezné plyny se používá kyslík (O<sub>2</sub>) nebo dusík (N<sub>2</sub>). Frekvence impulzu laseru se pohybuje v rozmezí 100 Hz – 100 kHz. Elektrické napájení stroje je 400 V při frekvenci 50 Hz. Chladicí médium zařízení je voda. O pohon se starají třífázové bezúdržbové servomotory. Maximální tloušťka obráběného materiálu je 20 mm (pro neušlechtilý materiál). Pracovní rozsah stroje je 1500 x 3000 mm. Rozměry stroje 9800 x 5300 x 2000 (d x š x v).



*Obr. 38. Laserový obráběcí stroj TRUMPF TRAUMATIC L3030*

Obráběcí nástroj byl: řezací hlava TRUMPF PCS 19419 (Hlava 7,5'', průměr trysky 1,4 mm pro materiál 11 375. Pro materiál 17 349 byl průměr trysky 2,3 mm.)



*Obr. 39. Laserová hlava TRUMPF*

### **5.3 Zařízení pro plazmové obrábění**

K plazmovému obrábění byl použit stroj MGM OMNICUT 4000 o výkonu 2,5 kVA. Toto zařízení je určené k plazmovému řezání kovových materiálů a opracování rovných plechů.

Konstrukce stroje je opatřena přesně opracovaným lineárním vedením s broušenými ocelovými tyčemi a broušenými ozubenými hřebeny v bez mazném provedení. Portál jezdí po



robustní a přesně opracované dráze a jeho pojezd zaručují výkonné servomotory na obou stranách portálu. Řezný proud se pohybuje v rozmezí 10-360 A. Maximální rychlost stroje je 20 m/min. Pracovní rozměry stroje jsou 3000x12000 mm. Elektrické napájení stroje je 400 V při frekvenci 50 Hz. Chladicí médium je chladicí kapalina Kjellfrost (směs etylenu, glykolu ...). Jako plazmový plyn se používá vzduch, kyslík ( $O_2$ ), dusík ( $N_2$ ), argon (Ar), vodík ( $H_2$ ). Ochranným plynem je kyslík ( $O_2$ ), dusík ( $N_2$ ), dusík/vodík ( $N_2/H_2$ ). Elektroda se používá wolframová. Maximální tloušťka obráběného materiálu je 70 mm (pro neušlechtilou ocel). Řezací hlava byla od výrobce KJELLBERG. Stroj obsahuje také přestavovací nástroj vrtačku.



Obr. 40. Plazmový obráběcí stroj MGM OMNICUT 4000



Obr. 41. Pálící hlava Kjellberg

#### 5.4 Zařízení pro vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení rozměrové přesnosti obrobků byl použit digitální třmenový mikrometr značky Mitutoyo s rozlišením 1  $\mu\text{m}$ . Měřicí rozsah měřidla byl 25-50 mm. Výrobní číslo 106034. Mezní chyba měřidla: 4  $\mu\text{m}$ .



*Obr. 42. Měření mikrometrem Mitutoyo*

Pro hodnocení kvality řezné plochy byl použit univerzální dílenský mikroskop CARL ZEISS, jehož optický systém je opatřen mikrometrickým posuvným šroubem hodnotou dělení 0,01 mm. Nasvícení pomocí externí diodové lampičky. Ustavení vzorků bylo realizováno pomocí speciální plastelíny.

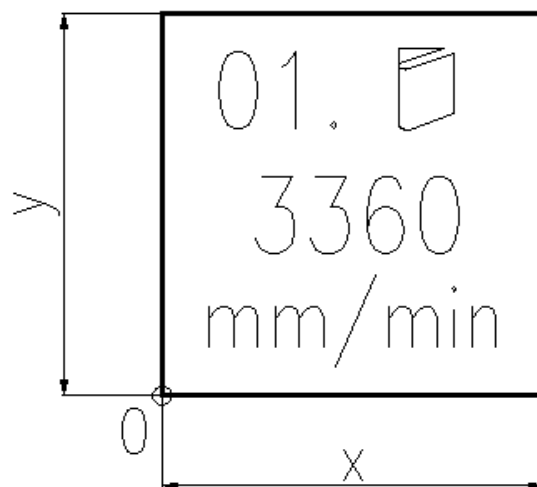


*Obr. 43. Univerzální dílenský mikroskop – snímání povrchu vzorků*

## 6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM

### 6.1 Vyhodnocení rozměrové přesnosti u oceli 11 375

Proměnným technologickým parametrem byla řezná rychlost, která se pohybovala od 1,4 m/min do 3,36 m/min. Pro přehlednost byla na vzorek vygravírována řezná rychlost. Obrobek byl měřen 10x ve směru x ( $x_1-x_{10}$ ) a 10x ve směru y ( $y_1-y_{10}$ ) digitálním třmenovým mikrometrem značky Mitutoyo s rozlišením 1  $\mu\text{m}$ .



Obr. 44. Schéma měření obrobku (17 349)

Pro všechny vzorky byly naměřené hodnoty vyhodnocovány v softwaru pro analýzu dat – Minitab 15. Naměřené hodnoty byly testovány na vychýlené hodnoty pomocí box plotu. Na závěr byl použit graf pro interval spolehlivosti 95%.

Jako řezný plyn byl použit kyslík. Obráběcí nástroj byl: TRUMPF PCS 19419 (Hlava 7,5''; průměr trysky 1,4 mm).

Použité vzorečky do výsledkové tabulky:

Aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Směrodatná odchylka:

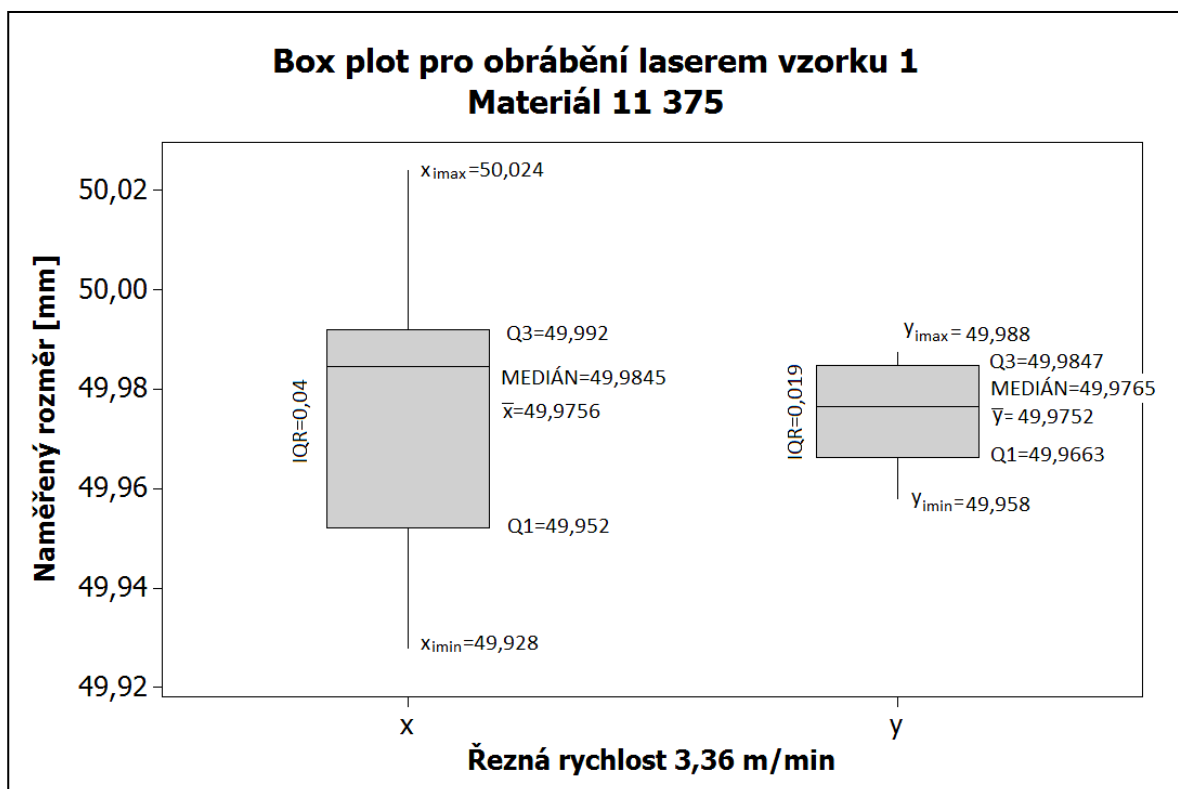
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Variační koeficient:

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}}$$

Tab. 5. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 11 375 – obrábění laserem

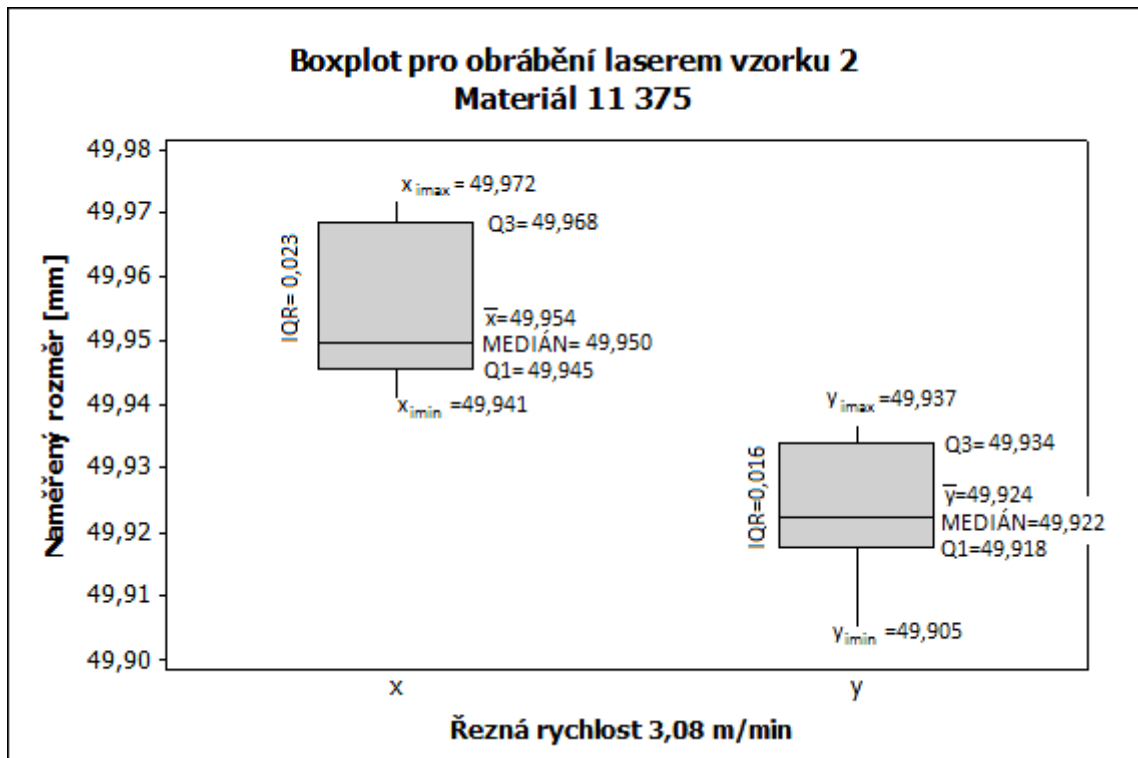
LASER vzorek 1 - 11 375 - 3,36m/min							
1.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,959	49,9756	-0,0166	0,00028	0,0284	0,0568
	2	49,928		-0,0476	0,00227		
	3	49,954		-0,0216	0,00047		
	4	49,982		0,0064	0,00004		
	5	49,946		-0,0296	0,00088		
	6	49,998		0,0224	0,00050		
	7	50,024		0,0484	0,00234		
	8	49,987		0,0114	0,00013		
	9	49,99		0,0144	0,00021		
	10	49,988		0,0124	0,00015		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,961	49,9752	-0,0142	0,00020	0,0106	0,0212
	12	49,979		0,0038	0,00001		
	13	49,984		0,0088	0,00008		
	14	49,958		-0,0172	0,00030		
	15	49,987		0,0118	0,00014		
	16	49,974		-0,0012	0,00000		
	17	49,982		0,0068	0,00005		
	18	49,968		-0,0072	0,00005		
	19	49,971		-0,0042	0,00002		
	20	49,988		0,0128	0,00016		



Obr. 45. Box plot pro obrábění laserem vzorku 1 - materiál 11 375

Tab. 6. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 11 375 – obrábění laserem

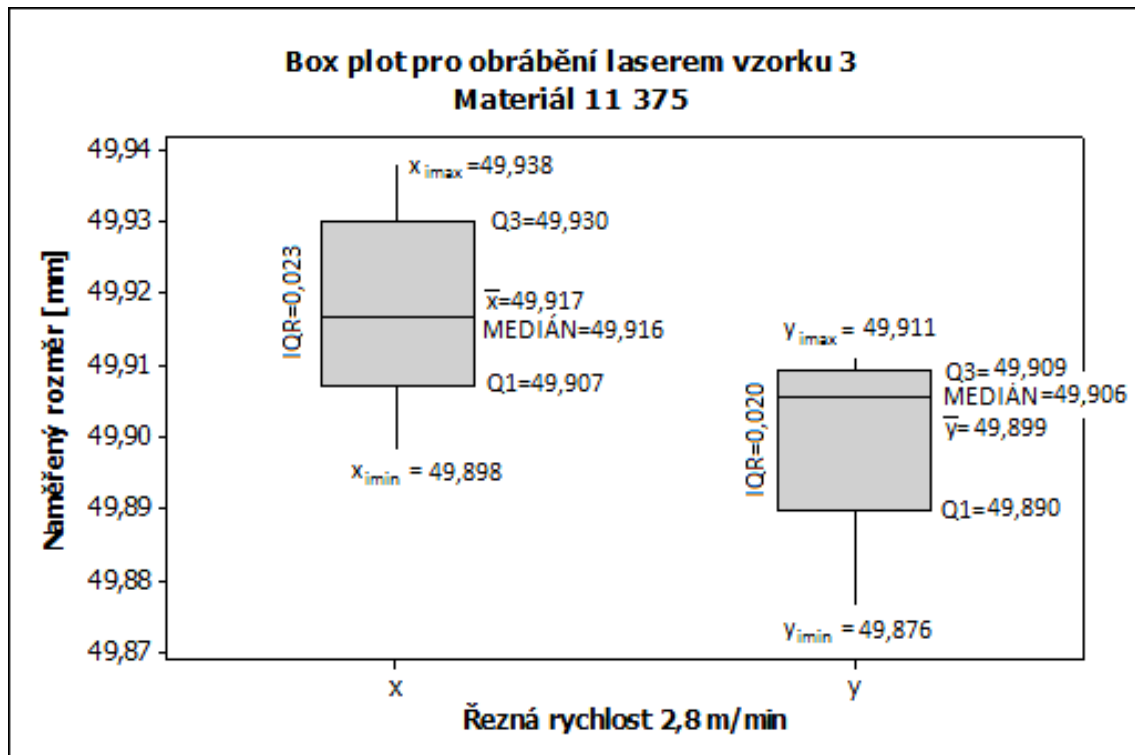
LASER vzorek 2 - 11 375 - 3,08m/min							
2.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,968	49,9538	0,0142	0,00020	0,0114	0,0229
	2	49,969		0,0152	0,00023		
	3	49,948		-0,0058	0,00003		
	4	49,972		0,0182	0,00033		
	5	49,944		-0,0098	0,00010		
	6	49,951		-0,0028	0,00001		
	7	49,952		-0,0018	0,00000		
	8	49,947		-0,0068	0,00005		
	9	49,941		-0,0128	0,00016		
	10	49,946		-0,0078	0,00006		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,905	49,9243	-0,0193	0,00037	0,0101	0,0202
	12	49,917		-0,0073	0,00005		
	13	49,923		-0,0013	0,00000		
	14	49,918		-0,0063	0,00004		
	15	49,921		-0,0033	0,00001		
	16	49,93		0,0057	0,00003		
	17	49,933		0,0087	0,00008		
	18	49,937		0,0127	0,00016		
	19	49,922		-0,0023	0,00001		
	20	49,937		0,0127	0,00016		



Obr. 46. Box plot pro obrábění laserem vzorku 2 - materiál 11 375

Tab. 7. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 11 375 – obrábění laserem

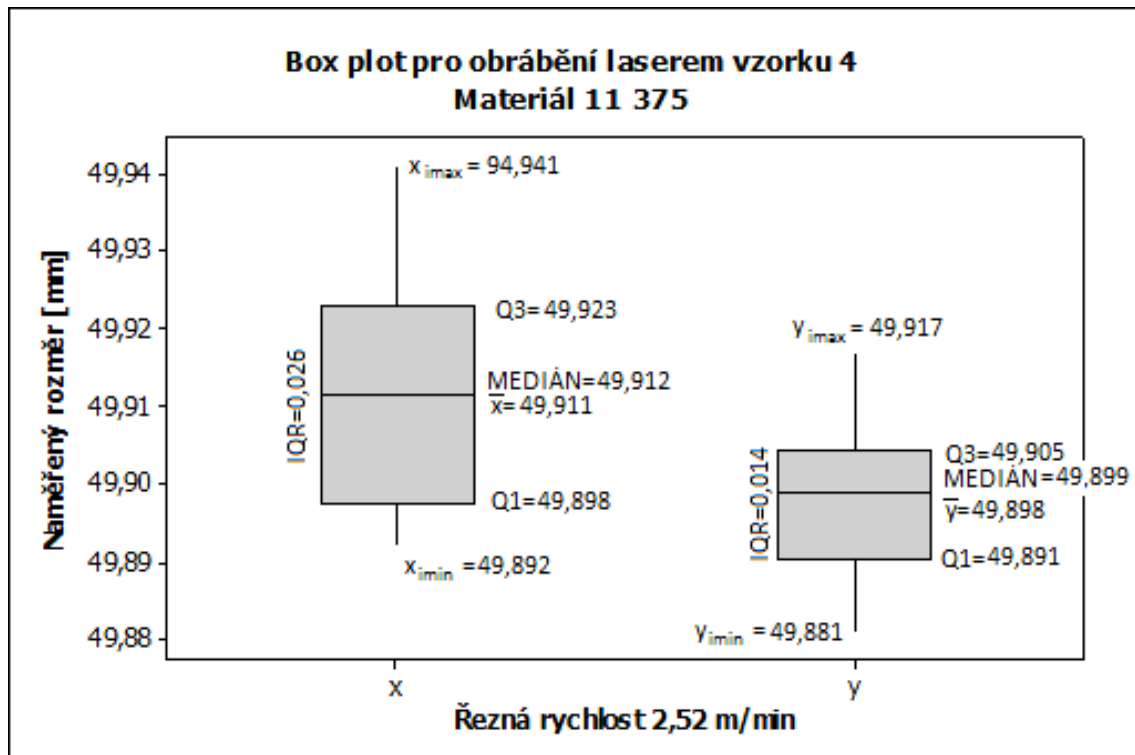
LASER vzorek 3 - 11 375 - 2,8m/min							
3.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,898	49,9173	-0,0193	0,00037	0,0137	0,0274
	2	49,902		-0,0153	0,00023		
	3	49,918		0,0007	0,00000		
	4	49,928		0,0107	0,00011		
	5	49,937		0,0197	0,00039		
	6	49,938		0,0207	0,00043		
	7	49,909		-0,0083	0,00007		
	8	49,919		0,0017	0,00000		
	9	49,915		-0,0023	0,00001		
	10	49,909		-0,0083	0,00007		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,907	49,8994	0,0076	0,00006	0,0118	0,0237
	12	49,909		0,0096	0,00009		
	13	49,893		-0,0064	0,00004		
	14	49,89		-0,0094	0,00009		
	15	49,906		0,0066	0,00004		
	16	49,911		0,0116	0,00013		
	17	49,905		0,0056	0,00003		
	18	49,876		-0,0234	0,00055		
	19	49,888		-0,0114	0,00013		
	20	49,909		0,0096	0,00009		



Obr. 47. Box plot pro obrábění laserem vzorku 3 - materiál 11 375

Tab. 8. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 11 375 – obrábění laserem

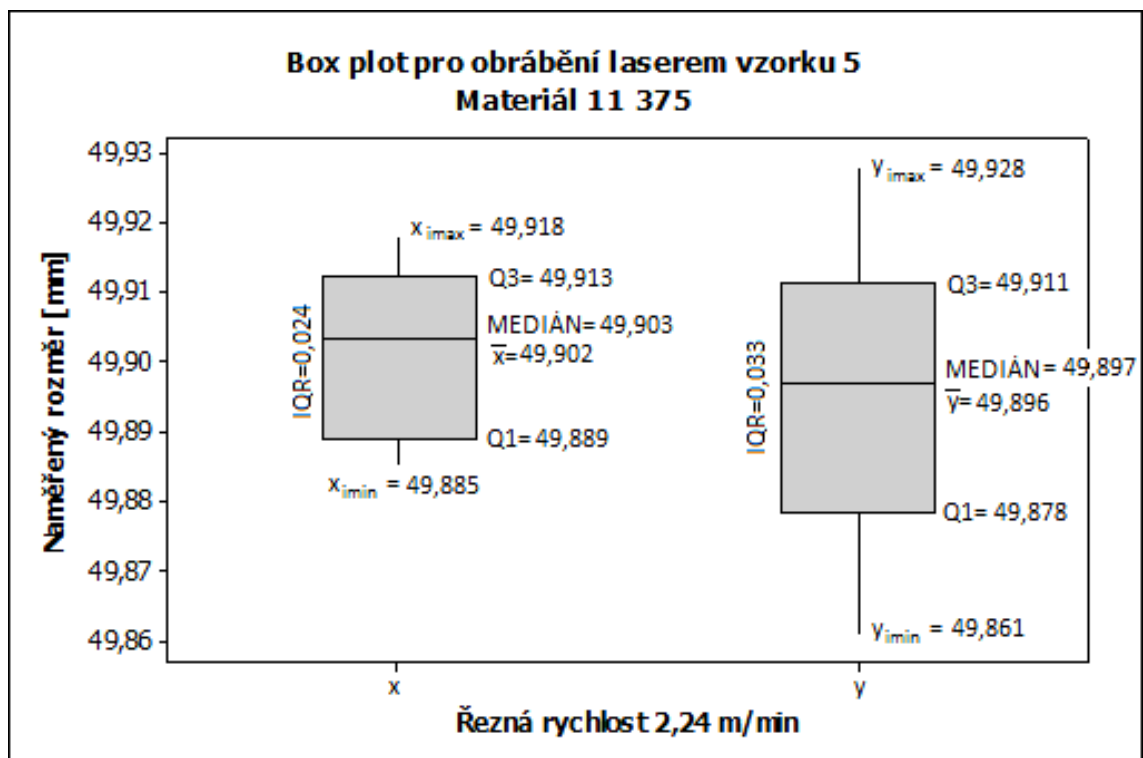
LASER vzorek 4 - 11 375 - 2,52m/min							
4.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,898	49,9114	-0,0134	0,00018	0,0159	0,0318
	2	49,915		0,0036	0,00001		
	3	49,896		-0,0154	0,00024		
	4	49,892		-0,0194	0,00038		
	5	49,921		0,0096	0,00009		
	6	49,915		0,0036	0,00001		
	7	49,941		0,0296	0,00088		
	8	49,929		0,0176	0,00031		
	9	49,899		-0,0124	0,00015		
	10	49,908		-0,0034	0,00001		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,886	49,8983	-0,0123	0,00015	0,0102	0,0205
	12	49,917		0,0187	0,00035		
	13	49,904		0,0057	0,00003		
	14	49,901		0,0027	0,00001		
	15	49,881		-0,0173	0,00030		
	16	49,899		0,0007	0,00000		
	17	49,898		-0,0003	0,00000		
	18	49,899		0,0007	0,00000		
	19	49,892		-0,0063	0,00004		
	20	49,906		0,0077	0,00006		



Obr. 48. Box plot pro obrábění laserem vzorku 4 - materiál 11 375

Tab. 9. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 11 375 – obrábění laserem

LASER vzorek 5 - 11 375 - 2,24m/min							
5.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,908	49,9017	0,0063	0,00004	0,0122	0,0245
	2	49,899		-0,0027	0,00001		
	3	49,889		-0,0127	0,00016		
	4	49,911		0,0093	0,00009		
	5	49,893		-0,0087	0,00008		
	6	49,885		-0,0167	0,00028		
	7	49,889		-0,0127	0,00016		
	8	49,917		0,0153	0,00024		
	9	49,9077		0,0060	0,00004		
	10	49,918		0,0163	0,00027		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,907	49,8960	0,0110	0,00012	0,0223	0,0448
	12	49,892		-0,0040	0,00002		
	13	49,895		-0,0010	0,00000		
	14	49,899		0,0030	0,00001		
	15	49,861		-0,0350	0,00122		
	16	49,864		-0,0320	0,00102		
	17	49,883		-0,0130	0,00017		
	18	49,928		0,0320	0,00102		
	19	49,924		0,0280	0,00078		
	20	49,907		0,0110	0,00012		

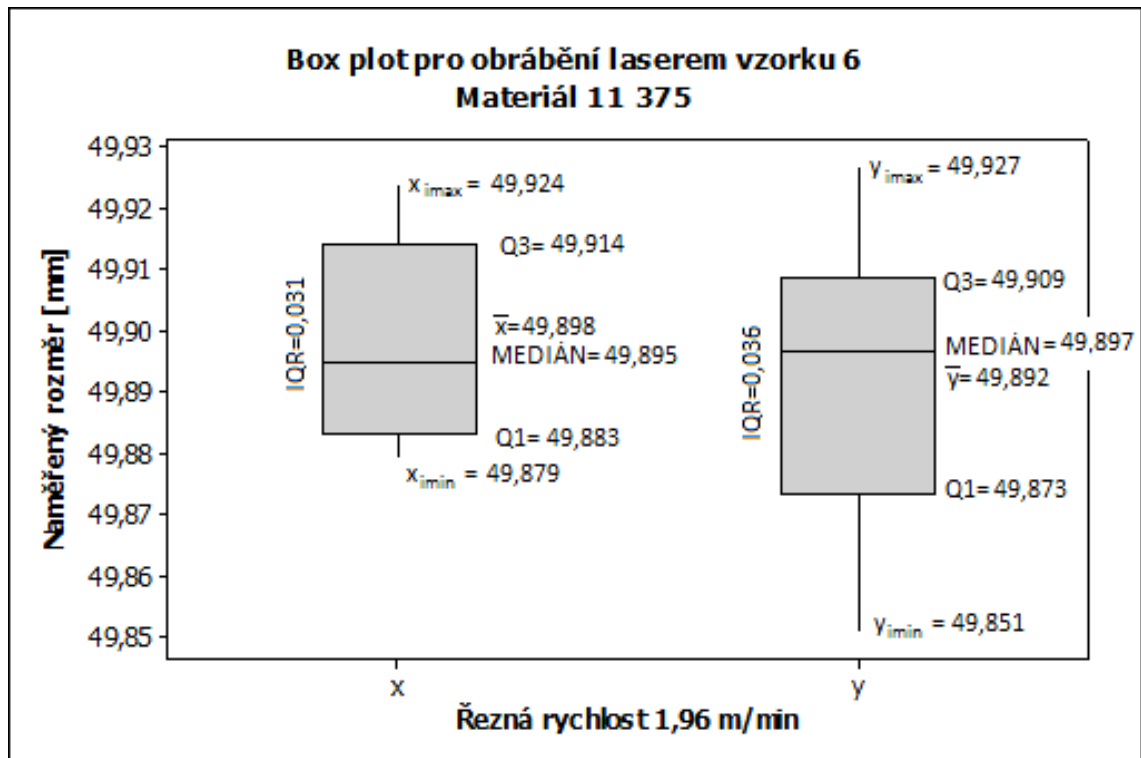


Obr. 49. Box plot pro obrábění laserem vzorku 5 - materiál 11 375



Tab. 10. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 11 375 – obrábění laserem

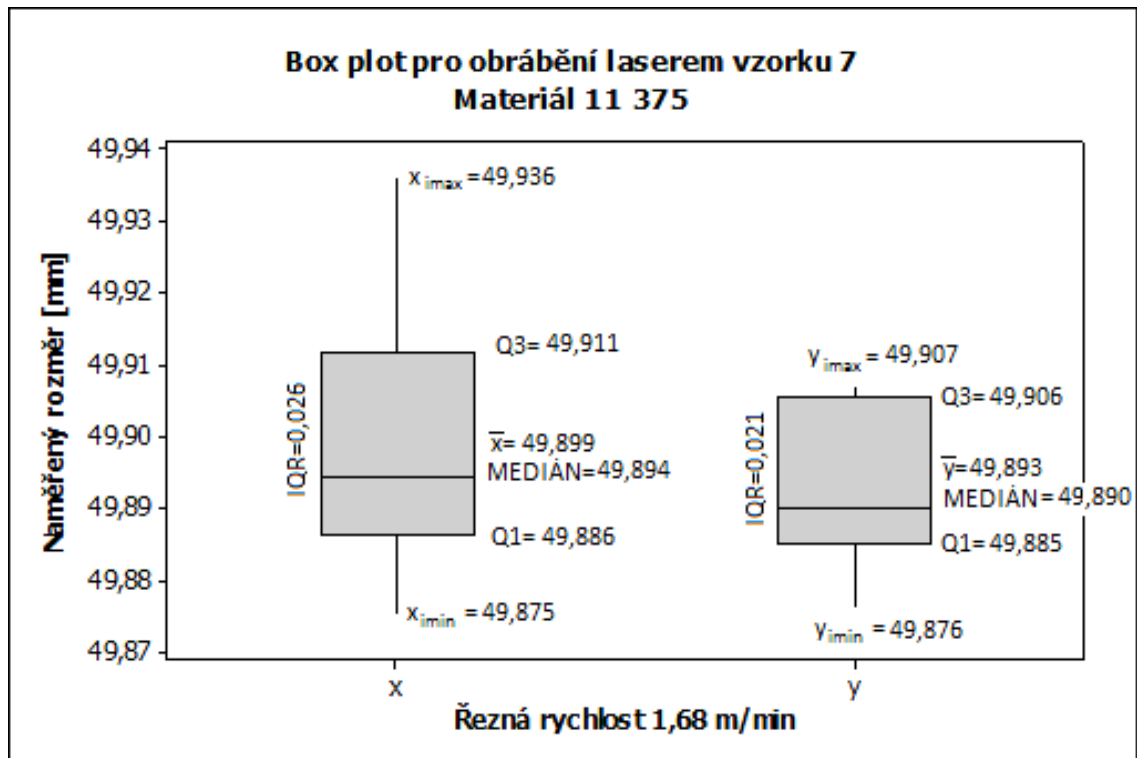
LASER vzorek 6 - 11 375 - 1,96m/min							
6.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,886	49,8975	-0,0115	0,00013	0,0162	0,0325
	2	49,912		0,0145	0,00021		
	3	49,881		-0,0165	0,00027		
	4	49,879		-0,0185	0,00034		
	5	49,92		0,0225	0,00051		
	6	49,924		0,0265	0,00070		
	7	49,884		-0,0135	0,00018		
	8	49,897		-0,0005	0,00000		
	9	49,893		-0,0045	0,00002		
	10	49,899		0,0015	0,00000		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,912	49,8917	0,0203	0,00041	0,0231	0,0462
	12	49,897		0,0053	0,00003		
	13	49,908		0,0163	0,00027		
	14	49,877		-0,0147	0,00022		
	15	49,897		0,0053	0,00003		
	16	49,862		-0,0297	0,00088		
	17	49,888		-0,0037	0,00001		
	18	49,927		0,0353	0,00125		
	19	49,851		-0,0407	0,00166		
	20	49,898		0,0063	0,00004		



Obr. 50. Box plot pro obrábění laserem vzorku 6 - materiál 11 375

Tab. 11. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 11 375 – obrábění laserem

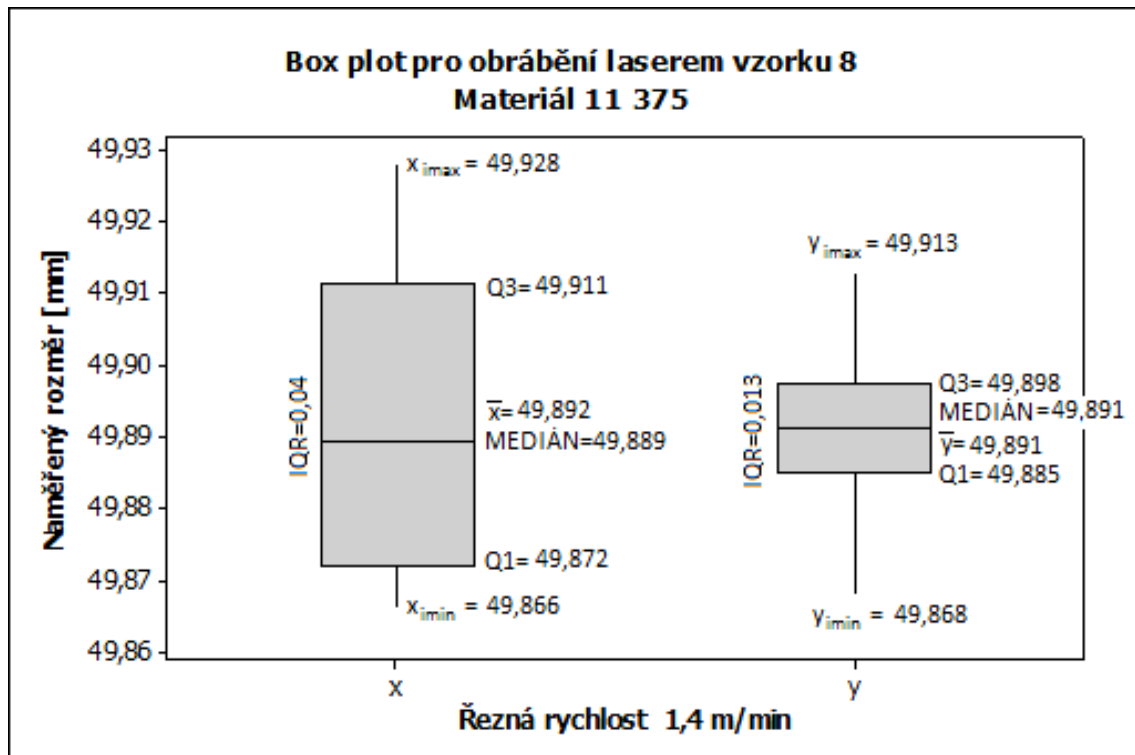
LASER vzorek 7 - 11 375 - 1,68m/min							
7.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,936	49,8988	0,0372	0,00138	0,0187	0,0374
	2	49,883		-0,0158	0,00025		
	3	49,908		0,0092	0,00008		
	4	49,901		0,0022	0,00000		
	5	49,922		0,0232	0,00054		
	6	49,888		-0,0108	0,00012		
	7	49,896		-0,0028	0,00001		
	8	49,887		-0,0118	0,00014		
	9	49,892		-0,0068	0,00005		
	10	49,875		-0,0238	0,00057		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,879	49,8929	-0,0139	0,00019	0,0112	0,0224
	12	49,889		-0,0039	0,00002		
	13	49,899		0,0061	0,00004		
	14	49,905		0,0121	0,00015		
	15	49,889		-0,0039	0,00002		
	16	49,907		0,0141	0,00020		
	17	49,891		-0,0019	0,00000		
	18	49,876		-0,0169	0,00029		
	19	49,907		0,0141	0,00020		
	20	49,887		-0,0059	0,00003		



Obr. 51. Box plot pro obrábění laserem vzorku 7 - materiál 11 375

Tab. 12. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 11 375 – obrábění laserem

LASER vzorek 8 - 11 375 - 1,4m/min							
8.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,909	49,8915	0,0175	0,00031	0,0210	0,0421
	2	49,893		0,0015	0,00000		
	3	49,871		-0,0205	0,00042		
	4	49,888		-0,0035	0,00001		
	5	49,866		-0,0255	0,00065		
	6	49,918		0,0265	0,00070		
	7	49,928		0,0365	0,00133		
	8	49,872		-0,0195	0,00038		
	9	49,879		-0,0125	0,00016		
	10	49,891		-0,0005	0,00000		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,896	49,8912	0,0048	0,00002	0,0120	0,0241
	12	49,879		-0,0122	0,00015		
	13	49,891		-0,0002	0,00000		
	14	49,868		-0,0232	0,00054		
	15	49,899		0,0078	0,00006		
	16	49,891		-0,0002	0,00000		
	17	49,887		-0,0042	0,00002		
	18	49,913		0,0218	0,00048		
	19	49,891		-0,0002	0,00000		
	20	49,897		0,0058	0,00003		



Obr. 52. Box plot pro obrábění laserem vzorku 8 - materiál 11 375

**Přehled výsledků po obrábění laserem materiálu 11 375 v ose x:**

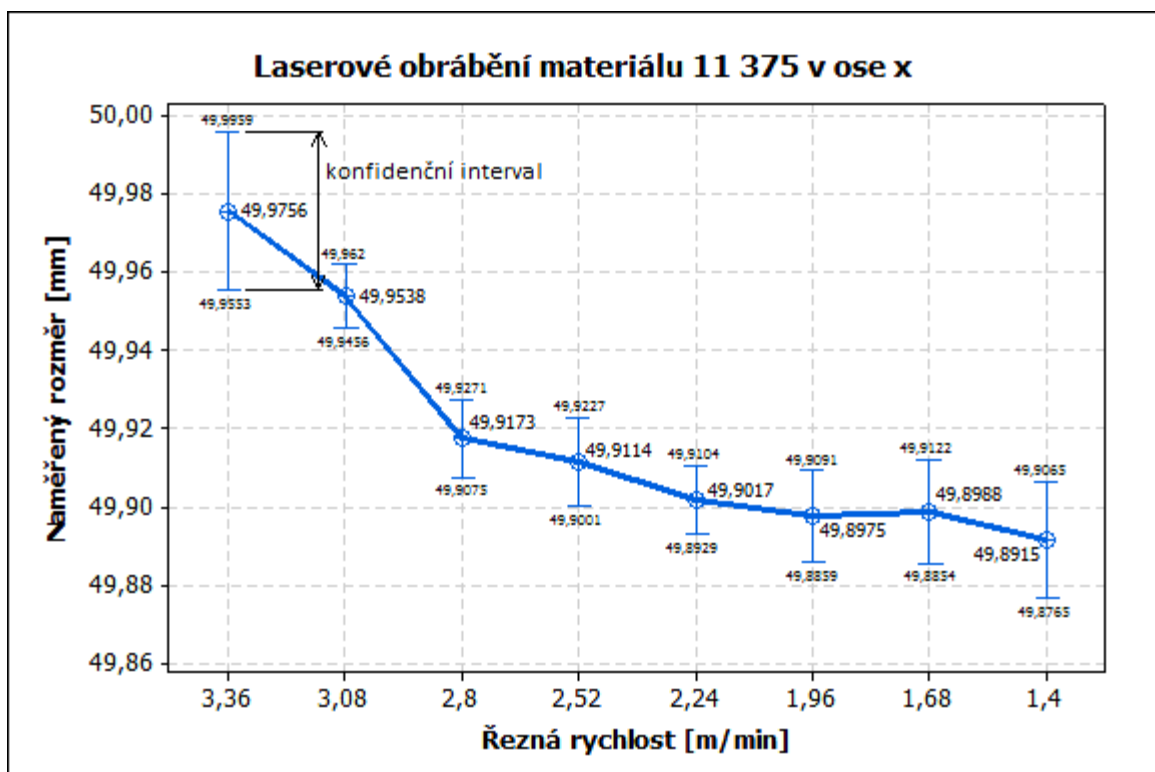
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
3,36	49,976	0,0284	0,06	49,928	49,952	49,984	49,992	50,024	0,040
3,08	49,954	0,0114	0,02	49,941	49,945	49,950	49,968	49,972	0,023
2,8	49,917	0,0137	0,03	49,898	49,907	49,916	49,930	49,938	0,023
2,52	49,911	0,0159	0,03	49,892	49,898	49,912	49,923	49,941	0,026
2,24	49,902	0,0122	0,02	49,885	49,889	49,903	49,913	49,918	0,024
1,96	49,898	0,0162	0,03	49,879	49,883	49,895	49,914	49,924	0,031
1,68	49,899	0,0187	0,04	49,875	49,886	49,894	49,911	49,936	0,026
1,4	49,892	0,0210	0,04	49,866	49,872	49,889	49,911	49,928	0,040

**Přehled výsledků po obrábění laserem materiálu 11 375 v ose y:**

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
3,36	49,975	0,0106	0,02	49,958	49,966	49,977	49,985	49,988	0,019
3,08	49,924	0,0101	0,02	49,905	49,918	49,922	49,934	49,937	0,016
2,8	49,899	0,0118	0,02	49,876	49,890	49,906	49,909	49,911	0,020
2,52	49,898	0,0102	0,02	49,881	49,891	49,899	49,905	49,917	0,014
2,24	49,896	0,0223	0,04	49,861	49,878	49,897	49,911	49,928	0,033
1,96	49,892	0,0231	0,05	49,851	49,873	49,897	49,909	49,927	0,036
1,68	49,893	0,0112	0,02	49,876	49,885	49,890	49,906	49,907	0,021
1,4	49,891	0,0120	0,02	49,868	49,885	49,891	49,898	49,913	0,013

Kde:

Variable – proměnná (řezná rychlost [m/min]), Mean – aritmetický průměr, StDev – směrodatná odchylka, CoefVar – Variační koeficient, Minimum – nejnižší naměřená hodnota, Q1 – první kvartil, Median – Medián, Q3 – třetí kvartil, Maximum – nejvyšší naměřená hodnota, IQR – rozdíl mezi prvním a třetím kvartilem



Obr. 53. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose x vyrobených laser. obráběním

Pro vyhodnocení všech měření se použil následující postup:

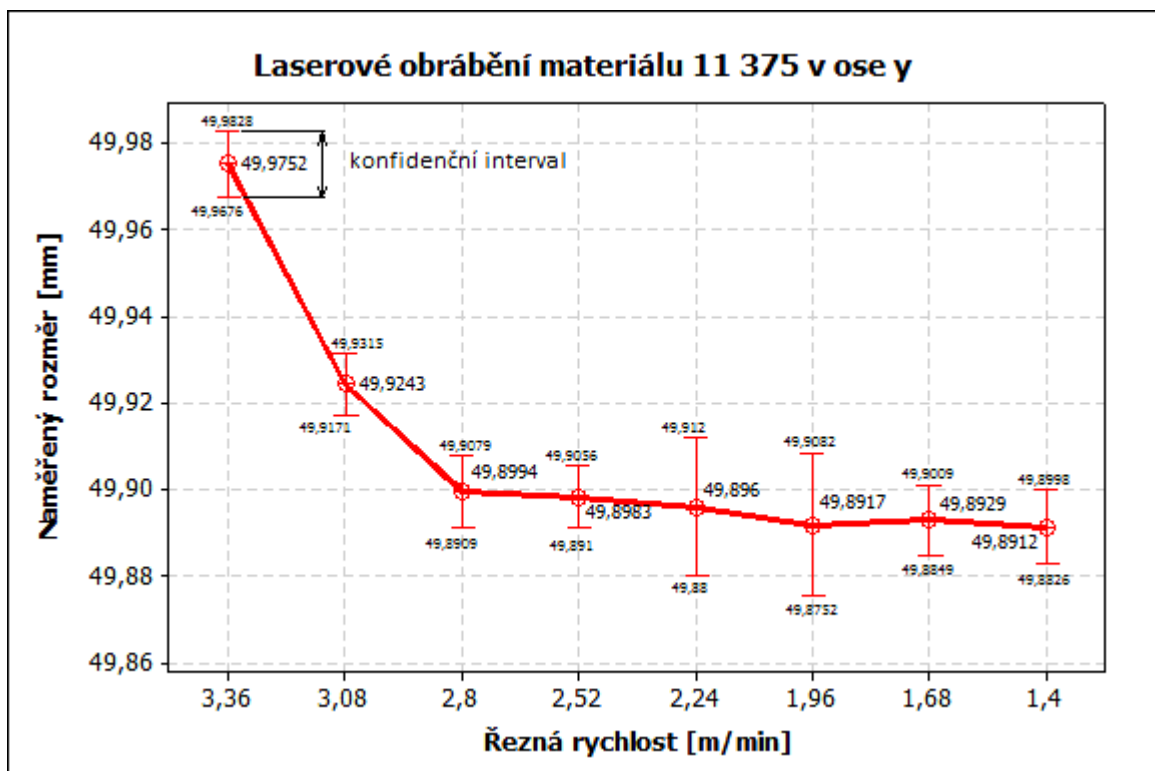
$n=10$

$\mu \rightarrow \bar{x}$  aritm. průměr zákl. souboru neznáme, nahrazujeme jej odhadem aritm. průměru

$\sigma \rightarrow s$  směr. odchylku zákl. souboru neznáme, nahrazujeme ji odhadem směr. odchylky

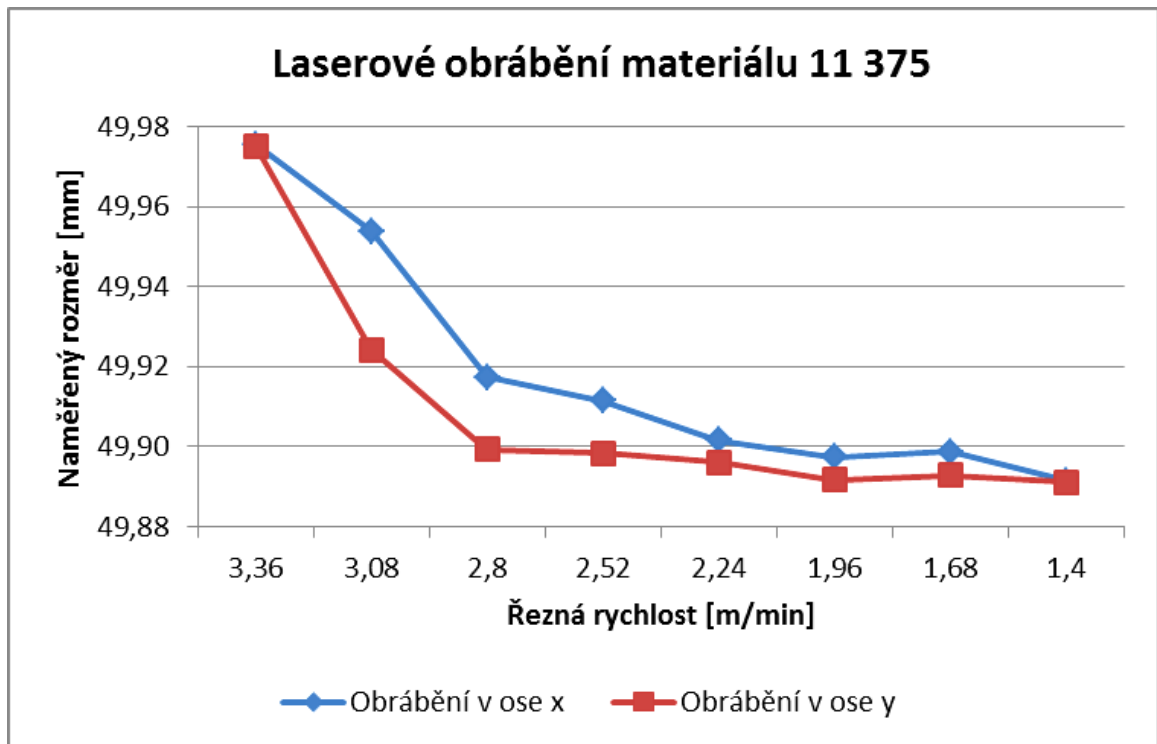
Konfidenční interval se vypočítá:  $\bar{x} \pm \frac{t_{1-\alpha/2}}{\sqrt{n}} \cdot s$  → tabulková hodnota pro dvoustranný interval = 0,715

Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose x: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 49,9553 mm do 49,9959 mm na základě  $n=10$  měření.



Obr. 54. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose y vyrobených laser. obráběním

Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose y: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 49,9676 mm do 49,9828 mm na základě  $n=10$  měření.



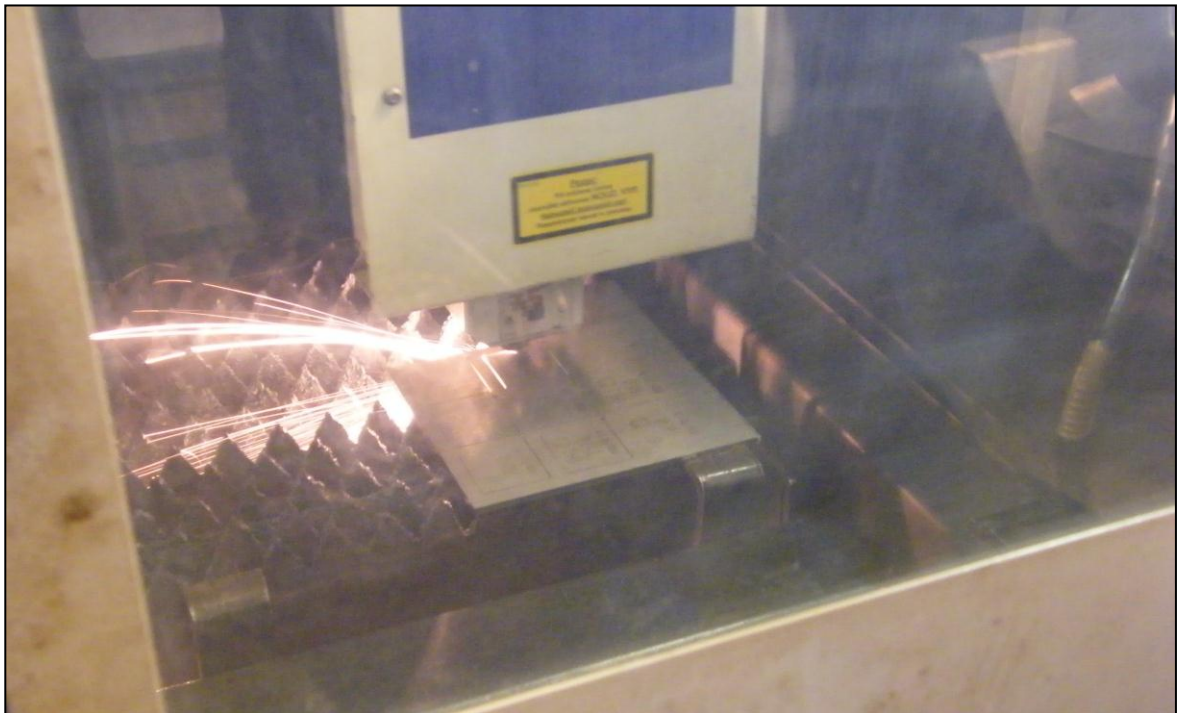
Obr. 55. Srovnání výsledků měření vzorků z oceli 11 375 vyrobených laser. obráběním

**Závěr:** Z výsledných grafů je patrné, že se snižující se řeznou rychlostí stoupá množství odebíraného materiálu, což je způsobeno delší dobou interakce laserového paprsku a obrábku. Do obráběného vzorku přechází větší množství tepla a odpařuje tak větší vrstvu materiálu. Dále vidíme, že výsledné hodnoty měření v ose y byly vždy nižší pro daný vzorek. To může znamenat mírou nepřesnost v souřadnicovém řízení stroje. Tento rozdíl je však pro statisticky nevýznamný.

## 6.2 Vyhodnocení rozměrové přesnosti u oceli 17 349

Proměnným technologickým parametrem byla řezná rychlost, která se pohybovala od 0,85 m/min do 2,04 m/min. Pro přehlednost byla na každý vzorek vygravírována řezná rychlost.

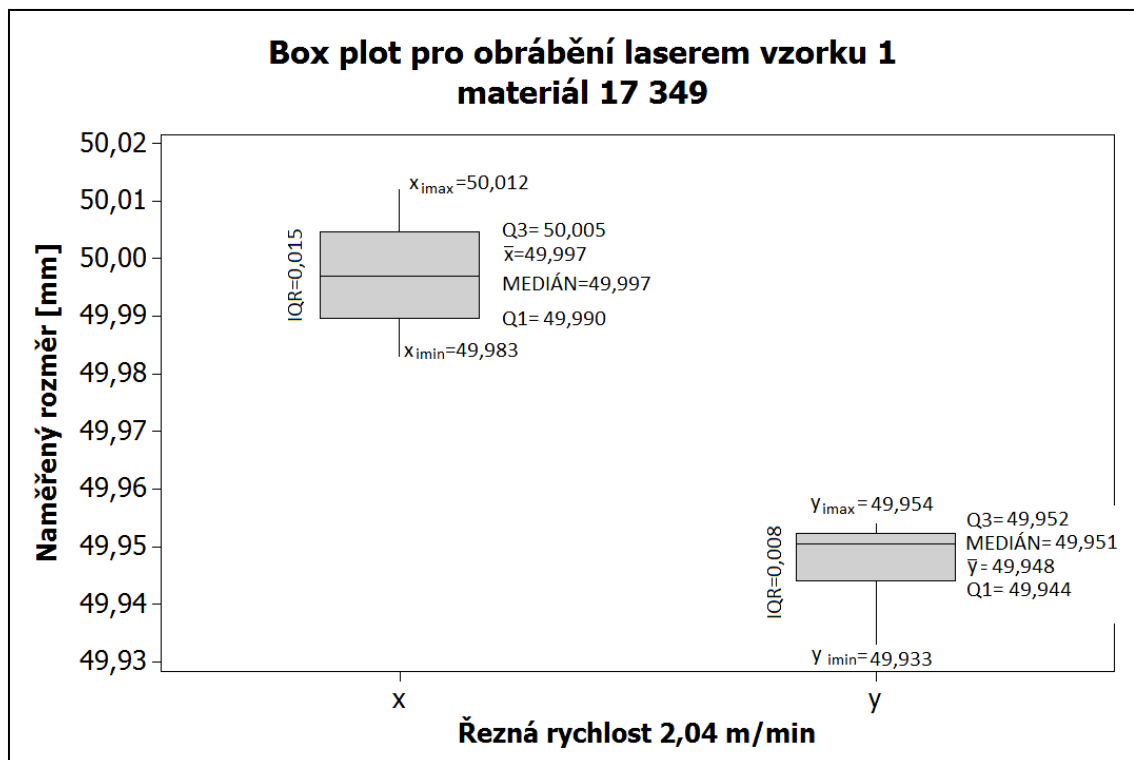
Jako řezný plyn byl použit dusík. Obráběcí nástroj byl: TRUMPF PCS 19419 (Hlava 7,5''; průměr trysky 2,3 mm)



*Obr. 56. Obrábění laserovým paprskem*

Tab. 13. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 17 349 – obrábění laserem

LASER vzorek 1 - 17 349 - 2,04m/min							
1.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,989	49,9971	-0,0081	0,00007	0,0092	0,0184
	2	49,997		-0,0001	0,00000		
	3	49,992		-0,0051	0,00003		
	4	49,997		-0,0001	0,00000		
	5	50,003		0,0059	0,00003		
	6	49,998		0,0009	0,00000		
	7	50,012		0,0149	0,00022		
	8	50,01		0,0129	0,00017		
	9	49,99		-0,0071	0,00005		
	10	49,983		-0,0141	0,00020		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,951	49,9481	0,0029	0,00001	0,0063	0,0127
	12	49,948		-0,0001	0,00000		
	13	49,944		-0,0041	0,00002		
	14	49,953		0,0049	0,00002		
	15	49,944		-0,0041	0,00002		
	16	49,952		0,0039	0,00002		
	17	49,933		-0,0151	0,00023		
	18	49,952		0,0039	0,00002		
	19	49,954		0,0059	0,00003		
	20	49,95		0,0019	0,00000		

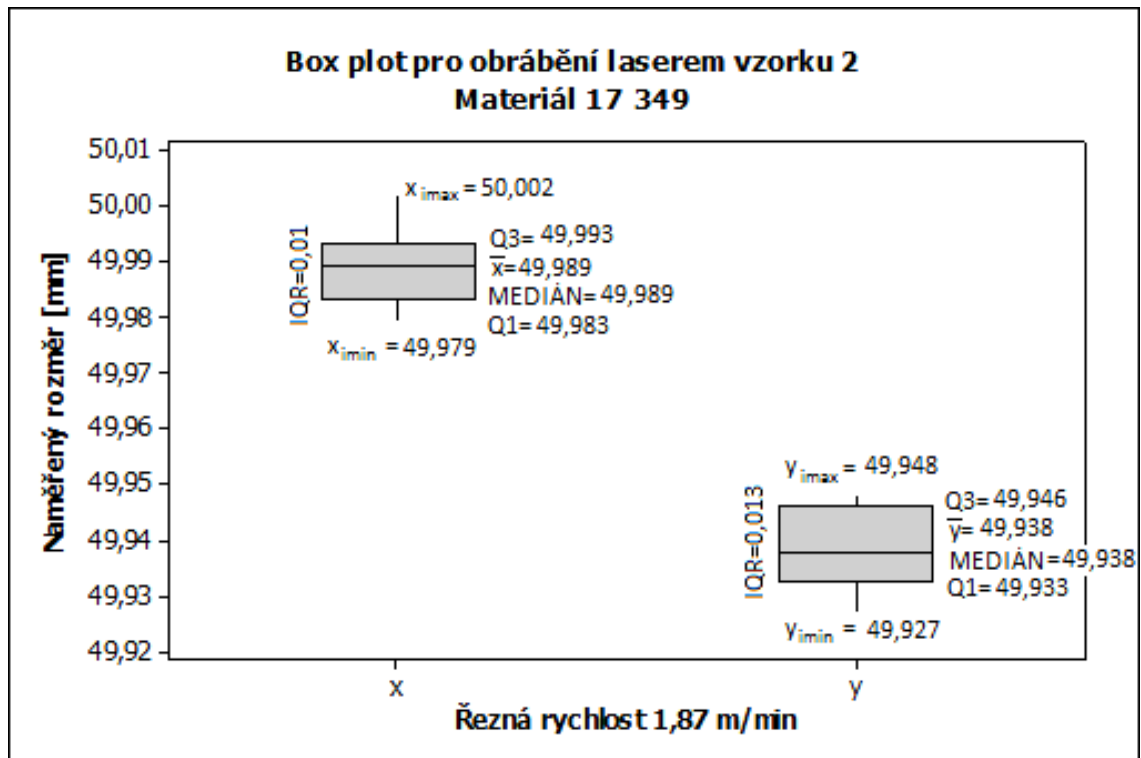


Obr. 57. Box plot pro obrábění laserem vzorku 1 - materiál 17 349



Tab. 14. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 17 349 – obrábění laserem

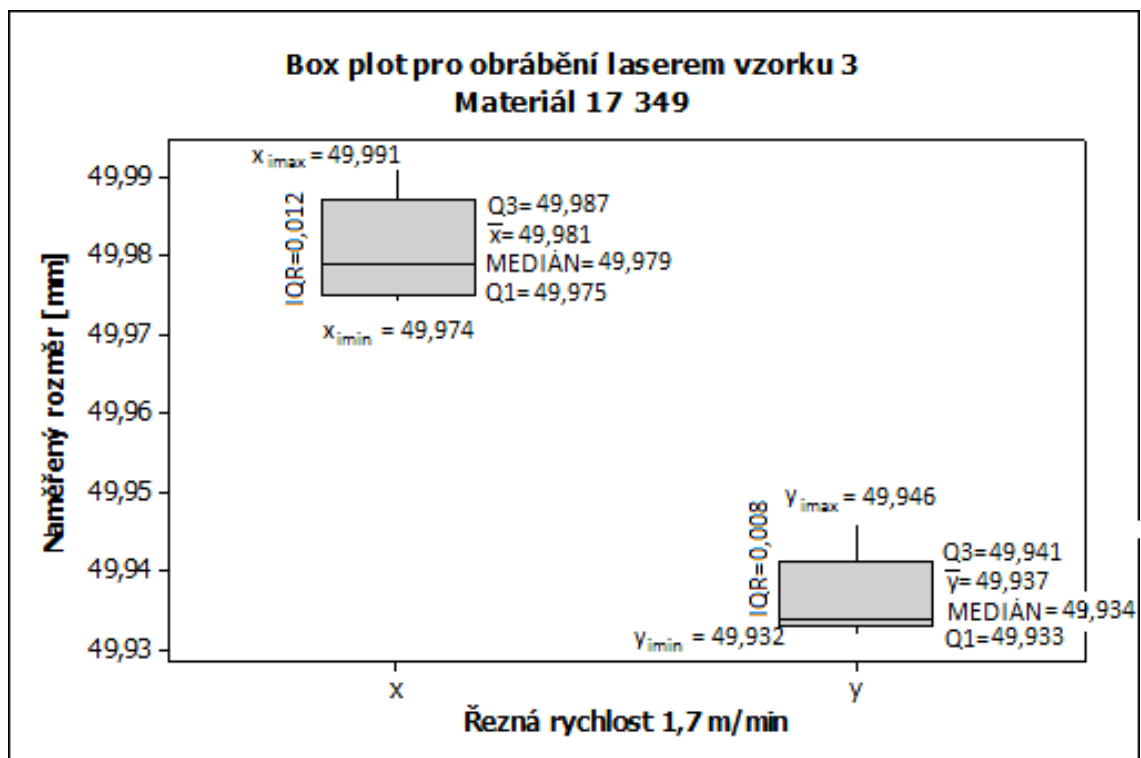
LASER vzorek 2 - 17 349 - 1,87m/min							
2.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,979	49,9887	-0,0097	0,00009	0,0070	0,0140
	2	49,985		-0,0037	0,00001		
	3	49,984		-0,0047	0,00002		
	4	49,98		-0,0087	0,00008		
	5	49,992		0,0033	0,00001		
	6	49,993		0,0043	0,00002		
	7	49,994		0,0053	0,00003		
	8	50,002		0,0133	0,00018		
	9	49,99		0,0013	0,00000		
	10	49,988		-0,0007	0,00000		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,934	49,9380	-0,0040	0,00002	0,0069	0,0138
	12	49,933		-0,0050	0,00003		
	13	49,937		-0,0010	0,00000		
	14	49,948		0,0100	0,00010		
	15	49,927		-0,0110	0,00012		
	16	49,946		0,0080	0,00006		
	17	49,932		-0,0060	0,00004		
	18	49,939		0,0010	0,00000		
	19	49,938		0,0000	0,00000		
	20	49,946		0,0080	0,00006		



Obr. 58. Box plot pro obrábění laserem vzorku 2 - materiál 17 349

Tab. 15. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 17 349 – obrábění laserem

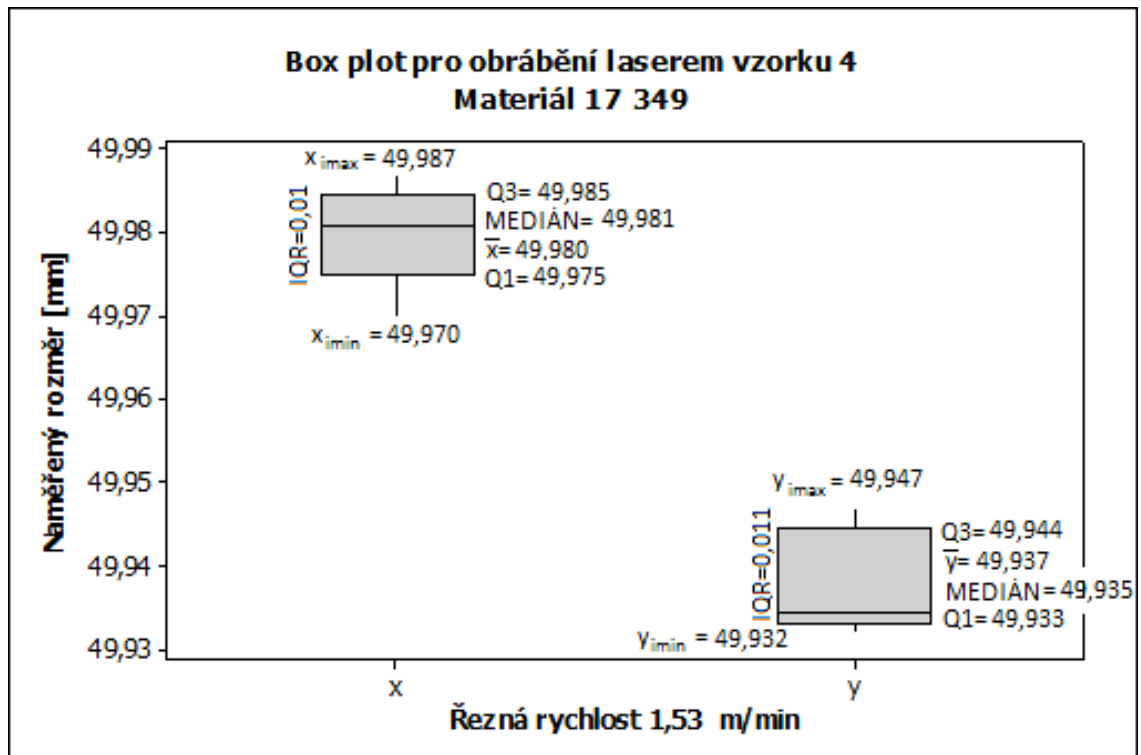
LASER vzorek 3 - 17 349 - 1,7m/min							
3.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,985	49,9808	0,0042	0,00002	0,0062	0,0125
	2	49,975		-0,0058	0,00003		
	3	49,977		-0,0038	0,00001		
	4	49,987		0,0062	0,00004		
	5	49,981		0,0002	0,00000		
	6	49,974		-0,0068	0,00005		
	7	49,991		0,0102	0,00010		
	8	49,975		-0,0058	0,00003		
	9	49,976		-0,0048	0,00002		
	10	49,987		0,0062	0,00004		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,946	49,9369	0,0091	0,00008	0,0053	0,0106
	12	49,945		0,0081	0,00007		
	13	49,933		-0,0039	0,00002		
	14	49,932		-0,0049	0,00002		
	15	49,933		-0,0039	0,00002		
	16	49,939		0,0021	0,00000		
	17	49,933		-0,0039	0,00002		
	18	49,94		0,0031	0,00001		
	19	49,935		-0,0019	0,00000		
	20	49,933		-0,0039	0,00002		



Obr. 59. Box plot pro obrábění laserem vzorku 3 - materiál 17 349

Tab. 16. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 17 349 – obrábění laserem

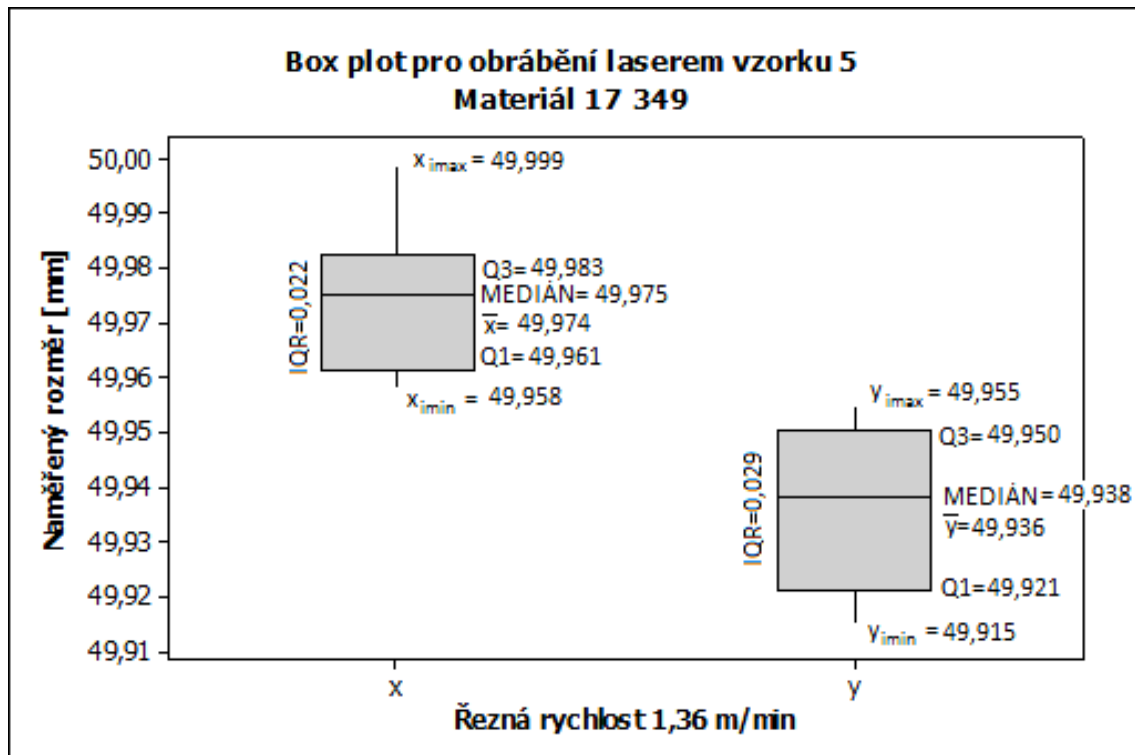
4. LASER vzorek 4 - 17 349 - 1,53m/min							
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,987	49,9797	0,0073	0,00005	0,0059	0,0117
	2	49,972		-0,0077	0,00006		
	3	49,981		0,0013	0,00000		
	4	49,982		0,0023	0,00001		
	5	49,976		-0,0037	0,00001		
	6	49,97		-0,0097	0,00009		
	7	49,984		0,0043	0,00002		
	8	49,987		0,0073	0,00005		
	9	49,977		-0,0027	0,00001		
	10	49,981		0,0013	0,00000		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,934	49,9374	-0,0034	0,00001	0,0057	0,0114
	12	49,933		-0,0044	0,00002		
	13	49,937		-0,0004	0,00000		
	14	49,934		-0,0034	0,00001		
	15	49,933		-0,0044	0,00002		
	16	49,947		0,0096	0,00009		
	17	49,932		-0,0054	0,00003		
	18	49,944		0,0066	0,00004		
	19	49,945		0,0076	0,00006		
	20	49,935		-0,0024	0,00001		



Obr. 60. Box plot pro obrábění laserem vzorku 4 - materiál 17 349

Tab. 17. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 17 349 – obrábění laserem

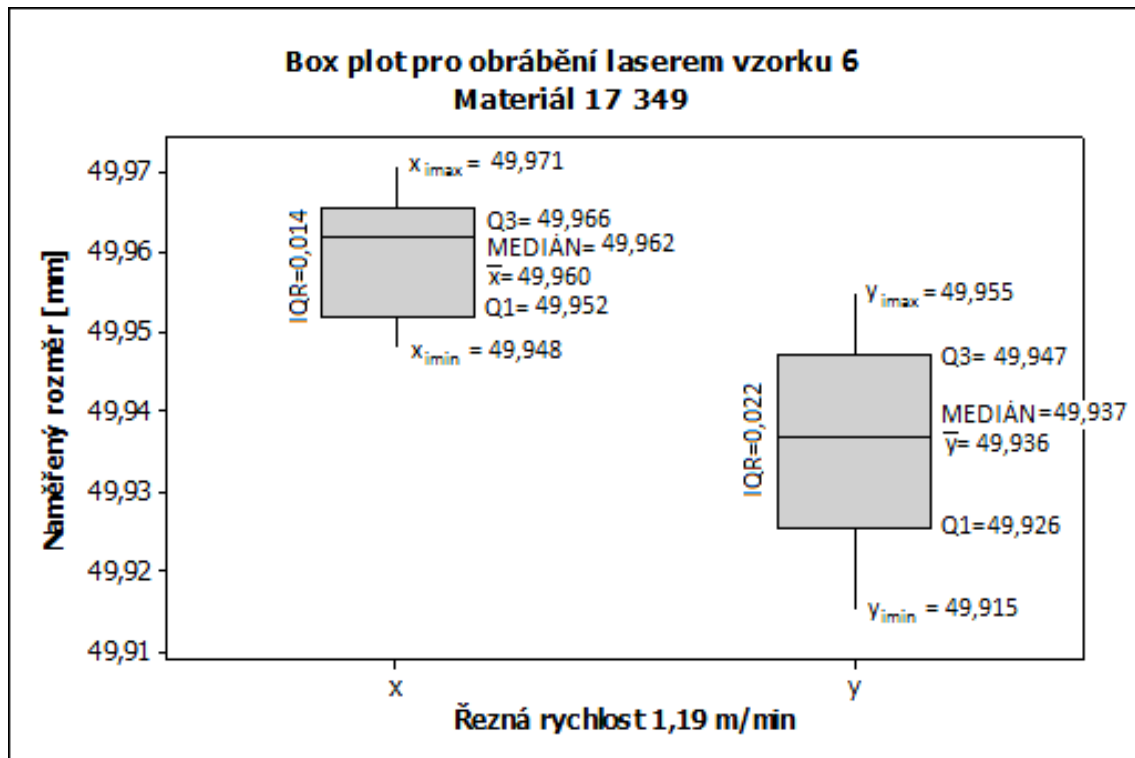
LASER vzorek 5 - 17 349 - 1,36m/min							
5.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,973	49,9743	-0,0013	0,00000	0,0132	0,0264
	2	49,959		-0,0153	0,00023		
	3	49,982		0,0077	0,00006		
	4	49,999		0,0247	0,00061		
	5	49,981		0,0067	0,00004		
	6	49,978		0,0037	0,00001		
	7	49,966		-0,0083	0,00007		
	8	49,962		-0,0123	0,00015		
	9	49,958		-0,0163	0,00027		
	10	49,985		0,0107	0,00011		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,915	49,9358	-0,0208	0,00043	0,0148	0,0297
	12	49,943		0,0072	0,00005		
	13	49,923		-0,0128	0,00016		
	14	49,93		-0,0058	0,00003		
	15	49,95		0,0142	0,00020		
	16	49,943		0,0072	0,00005		
	17	49,933		-0,0028	0,00001		
	18	49,951		0,0152	0,00023		
	19	49,955		0,0192	0,00037		
	20	49,915		-0,0208	0,00043		



Obr. 61. Box plot pro obrábění laserem vzorku 5 - materiál 17 349

Tab. 18. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 17 349 – obrábění laserem

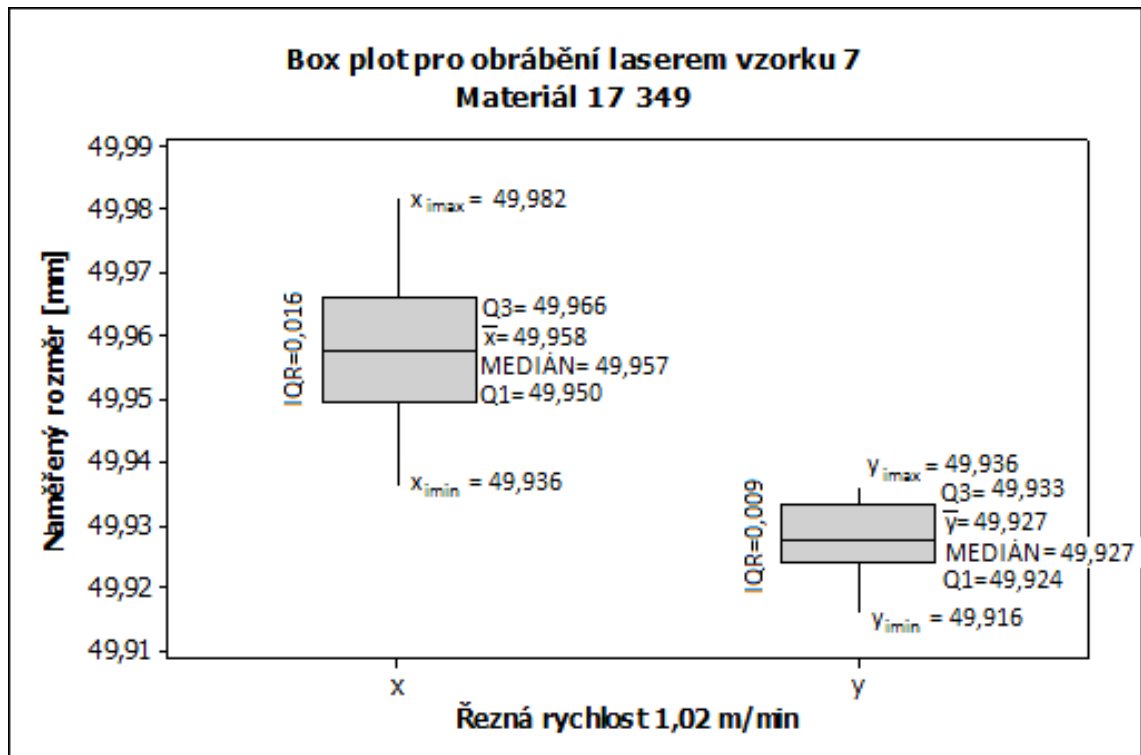
LASER vzorek 6 - 17 349 -1,19m/min							
6.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,962	49,9601	0,0019	0,00000	0,0076	0,0152
	2	49,952		-0,0081	0,00007		
	3	49,962		0,0019	0,00000		
	4	49,951		-0,0091	0,00008		
	5	49,963		0,0029	0,00001		
	6	49,959		-0,0011	0,00000		
	7	49,948		-0,0121	0,00015		
	8	49,968		0,0079	0,00006		
	9	49,971		0,0109	0,00012		
	10	49,965		0,0049	0,00002		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,927	49,9361	-0,0091	0,00008	0,0125	0,0250
	12	49,933		-0,0031	0,00001		
	13	49,947		0,0109	0,00012		
	14	49,921		-0,0151	0,00023		
	15	49,915		-0,0211	0,00045		
	16	49,947		0,0109	0,00012		
	17	49,955		0,0189	0,00036		
	18	49,936		-0,0001	0,00000		
	19	49,938		0,0019	0,00000		
	20	49,942		0,0059	0,00003		



Obr. 62. Box plot pro obrábění laserem vzorku 6 - materiál 17 349

Tab. 19. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 17 349 – obrábění laserem

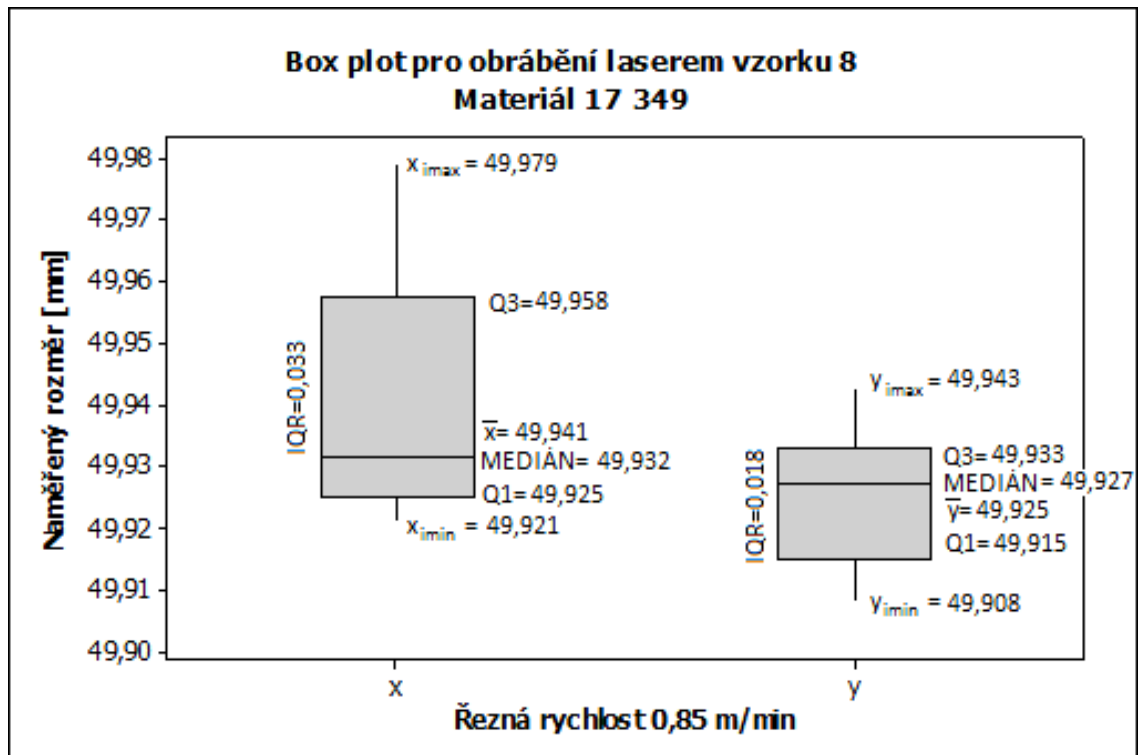
7. LASER vzorek 7 - 17 349 -1,02m/min							
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,954	49,9579	-0,0039	0,00002	0,0141	0,0283
	2	49,977		0,0191	0,00036		
	3	49,982		0,0241	0,00058		
	4	49,952		-0,0059	0,00003		
	5	49,962		0,0041	0,00002		
	6	49,961		0,0031	0,00001		
	7	49,942		-0,0159	0,00025		
	8	49,936		-0,0219	0,00048		
	9	49,952		-0,0059	0,00003		
	10	49,961		0,0031	0,00001		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,928	49,9273	0,0007	0,00000	0,0061	0,0122
	12	49,928		0,0007	0,00000		
	13	49,927		-0,0003	0,00000		
	14	49,936		0,0087	0,00008		
	15	49,916		-0,0113	0,00013		
	16	49,921		-0,0063	0,00004		
	17	49,933		0,0057	0,00003		
	18	49,925		-0,0023	0,00001		
	19	49,934		0,0067	0,00004		
	20	49,925		-0,0023	0,00001		



Obr. 63. Box plot pro obrábění laserem vzorku 7 - materiál 17 349

Tab. 20. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 17 349 – obrábění laserem

LASER vzorek 8 - 17 349 - 0,85m/min							
8.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,966	49,9414	0,0246	0,00061	0,0206	0,0413
	2	49,979		0,0376	0,00141		
	3	49,955		0,0136	0,00018		
	4	49,928		-0,0134	0,00018		
	5	49,925		-0,0164	0,00027		
	6	49,955		0,0136	0,00018		
	7	49,921		-0,0204	0,00042		
	8	49,924		-0,0174	0,00030		
	9	49,926		-0,0154	0,00024		
	10	49,935		-0,0064	0,00004		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,917	49,9254	-0,0084	0,00007	0,0114	0,0229
	12	49,938		0,0126	0,00016		
	13	49,924		-0,0014	0,00000		
	14	49,908		-0,0174	0,00030		
	15	49,928		0,0026	0,00001		
	16	49,93		0,0046	0,00002		
	17	49,943		0,0176	0,00031		
	18	49,931		0,0056	0,00003		
	19	49,926		0,0006	0,00000		
	20	49,909		-0,0164	0,00027		



Obr. 64. Box plot pro obrábění laserem vzorku 8 - materiál 17 349

**Přehled výsledků po obrábění laserem materiálu 17 349 v ose x:**

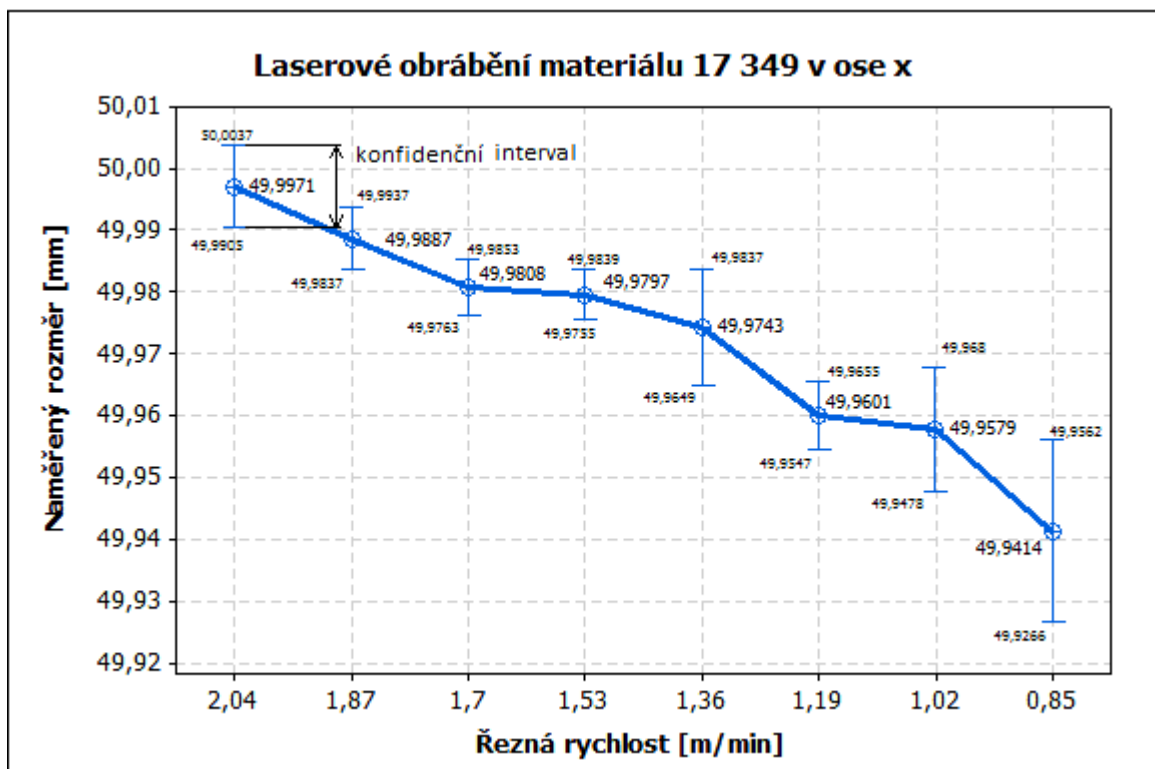
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
2,04	49,997	0,00922	0,02	49,983	49,990	49,997	50,005	50,012	0,015
1,87	49,989	0,00701	0,01	49,979	49,983	49,989	49,993	50,002	0,010
1,7	49,981	0,00623	0,01	49,974	49,975	49,979	49,987	49,991	0,012
1,53	49,980	0,00585	0,01	49,970	49,975	49,981	49,985	49,987	0,010
1,36	49,974	0,0132	0,03	49,958	49,961	49,975	49,983	49,999	0,022
1,19	49,960	0,00758	0,02	49,948	49,952	49,962	49,966	49,971	0,014
1,02	49,958	0,0141	0,03	49,936	49,950	49,957	49,966	49,982	0,016
0,85	49,941	0,0206	0,04	49,921	49,925	49,932	49,958	49,979	0,033

**Přehled výsledků po obrábění laserem materiálu 17 349 v ose y:**

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
2,04	49,948	0,00635	0,01	49,933	49,944	49,951	49,952	49,954	0,008
1,87	49,938	0,00690	0,01	49,927	49,933	49,938	49,946	49,948	0,013
1,7	49,937	0,00528	0,01	49,932	49,933	49,934	49,941	49,946	0,008
1,53	49,937	0,00568	0,01	49,932	49,933	49,935	49,944	49,947	0,011
1,36	49,936	0,0148	0,03	49,915	49,921	49,938	49,950	49,955	0,029
1,19	49,936	0,0125	0,02	49,915	49,926	49,937	49,947	49,955	0,022
1,02	49,927	0,00607	0,01	49,916	49,924	49,927	49,933	49,936	0,009
0,85	49,925	0,0114	0,02	49,908	49,915	49,927	49,933	49,943	0,018

Kde:

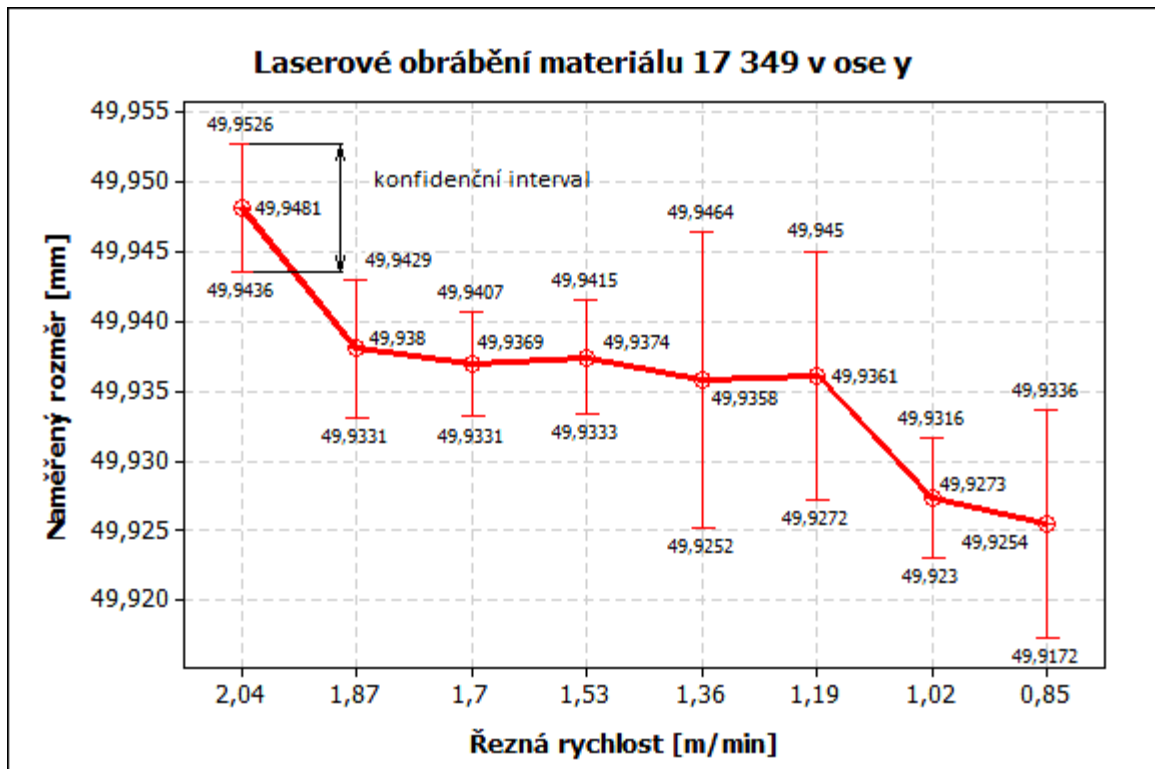
Variable – proměnná (řezná rychlost [m/min]), Mean – aritmetický průměr, StDev – směrodatná odchylka, CoefVar – Variační koeficient, Minimum – nejnižší naměřená hodnota, Q1 – první kvartil, Median – Medián, Q3 – třetí kvartil, Maximum – nejvyšší naměřená hodnota, IQR – rozdíl mezi prvním a třetím kvartilem



Obr. 65. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose x vyrobených laser. obráběním

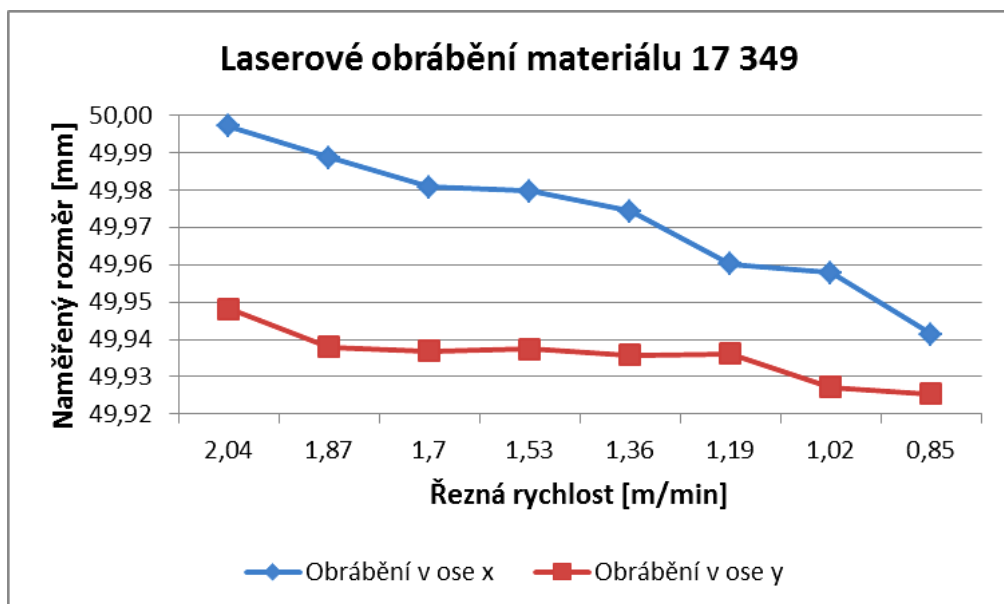
Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose x: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 49,9905 mm do 50,0037 mm na základě  $n=10$  měření.





Obr. 66. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose y vyrobených laser. obráběním

Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose y: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 49,9436 mm do 49,9526 mm na základě  $n=10$  měření.



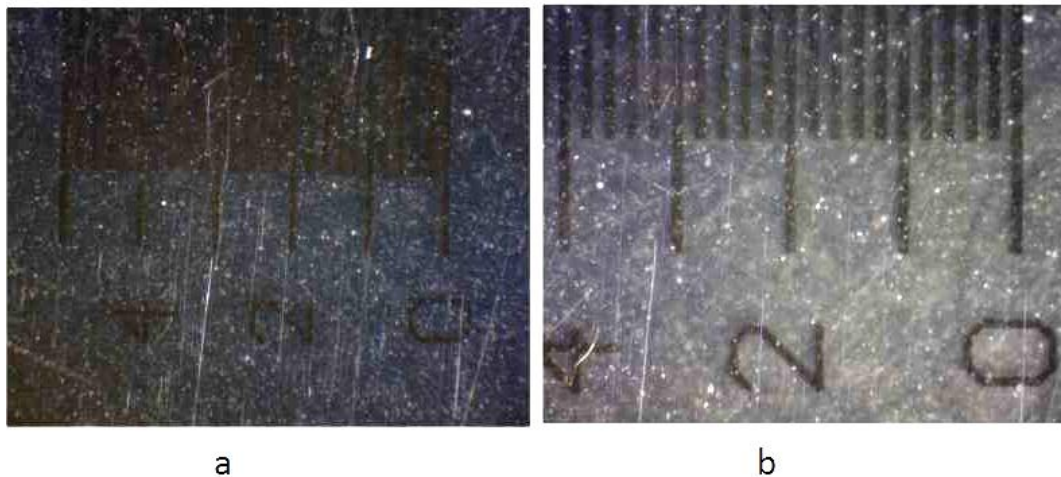
Obr. 67. Srovnání výsledků měření vzorků z oceli 11 375 vyrobených laser. obráběním

**Závěr:** Z výsledných grafů je opět patrné, že se snižující se řeznou rychlostí stoupá množství odebraného materiálu. Do obráběného vzorku přechází větší množství tepla a odpařuje

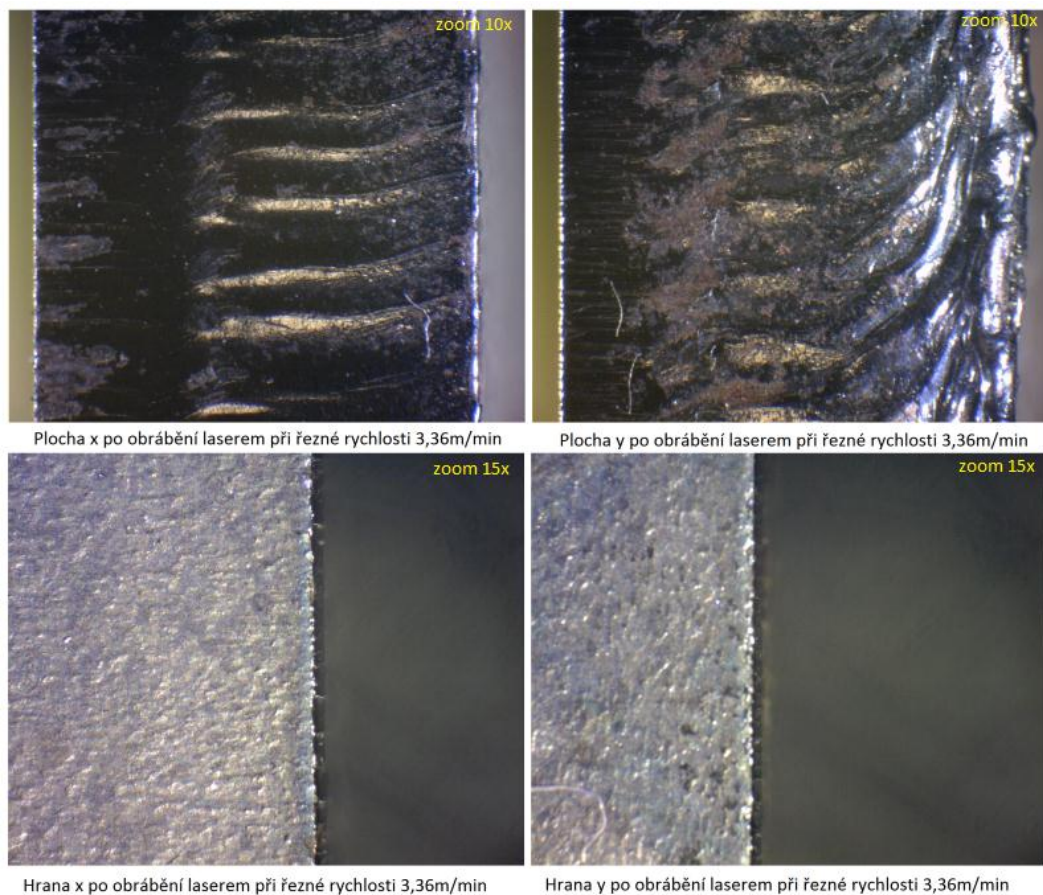
tak větší vrstvu materiálu. Dále znovu vidíme, že výsledné hodnoty měření v ose y byly vždy nižší pro daný vzorek. Tento rozdíl je však statisticky nevýznamný.

### 6.3 Vyhodnocení kvality obráběného povrchu u oceli 11 375

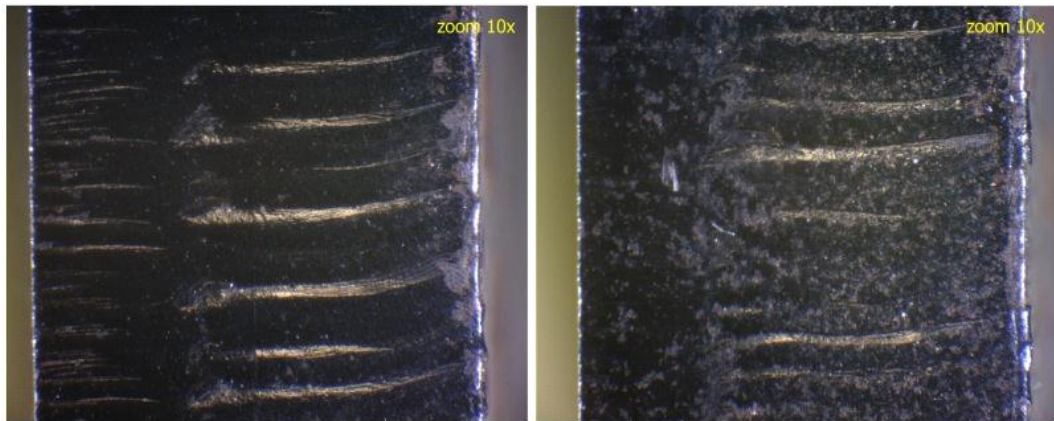
Každý vzorek byl nasnímán univerzálním mikroskopem. Snímány byly plochy po obrábění v ose x i v ose y. Zvětšení řezných ploch bylo 10x. Dále pak byly snímány hrany vzorků po obrábění v ose x a y. Zvětšení bylo 15x.



Obr. 68. Snímek kalibračního pásku a) zvětšení 10x b) zvětšení 15x

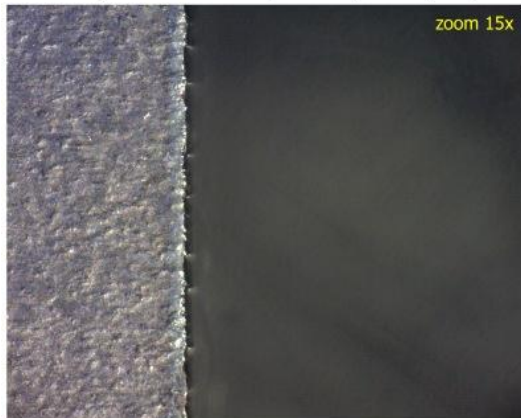


Obr. 69. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného laserem - materiál 11 375

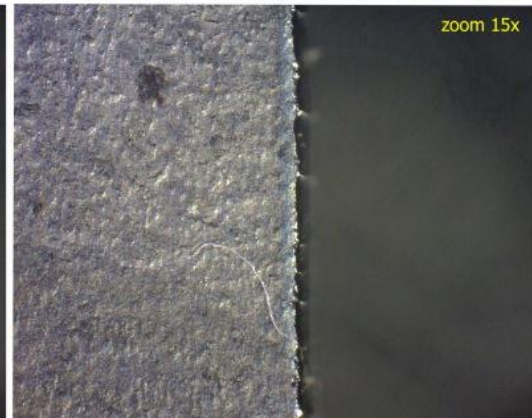


Plocha x po obrábění laserem při řezné rychlosti 3,08 m/min

Plocha y po obrábění laserem při řezné rychlosti 3,08 m/min

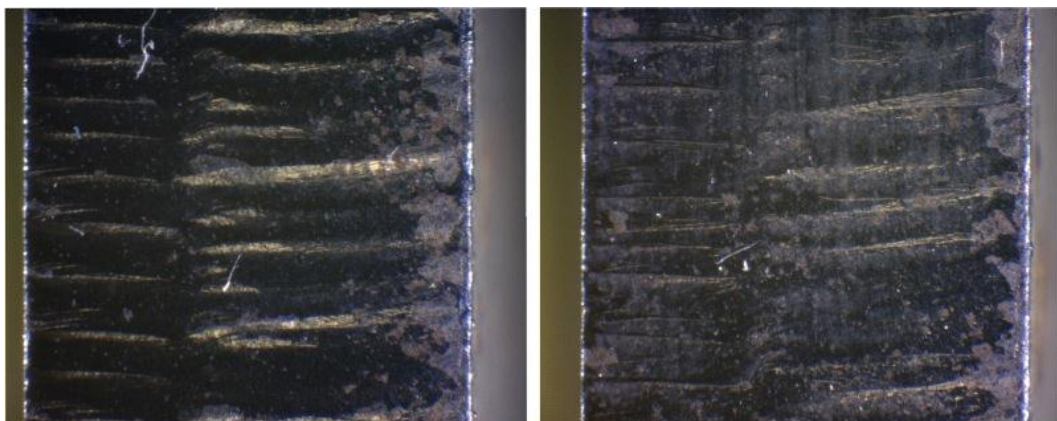


Hrana x po obrábění laserem při řezné rychlosti 3,08 m/min



Hrana y po obrábění laserem při řezné rychlosti 3,08 m/min

*Obr. 70. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného laserem - materiál 11 375*

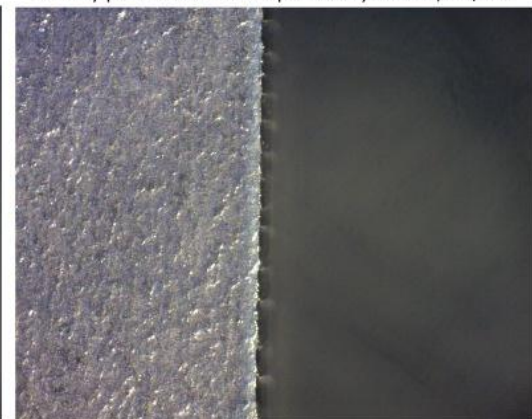


Plocha x po obrábění laserem při řezné rychlosti 2,8 m/min

Plocha y po obrábění laserem při řezné rychlosti 2,8 m/min

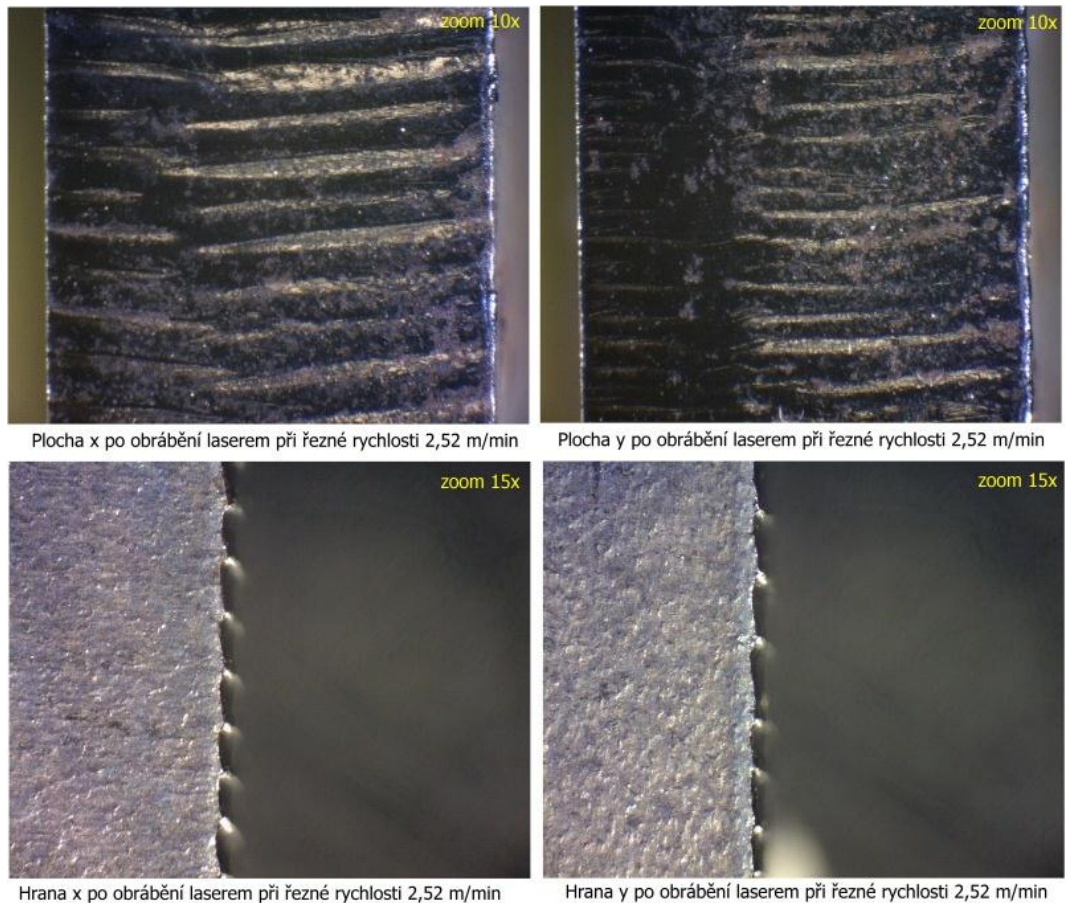


Hrana x po obrábění laserem při řezné rychlosti 2,8 m/min

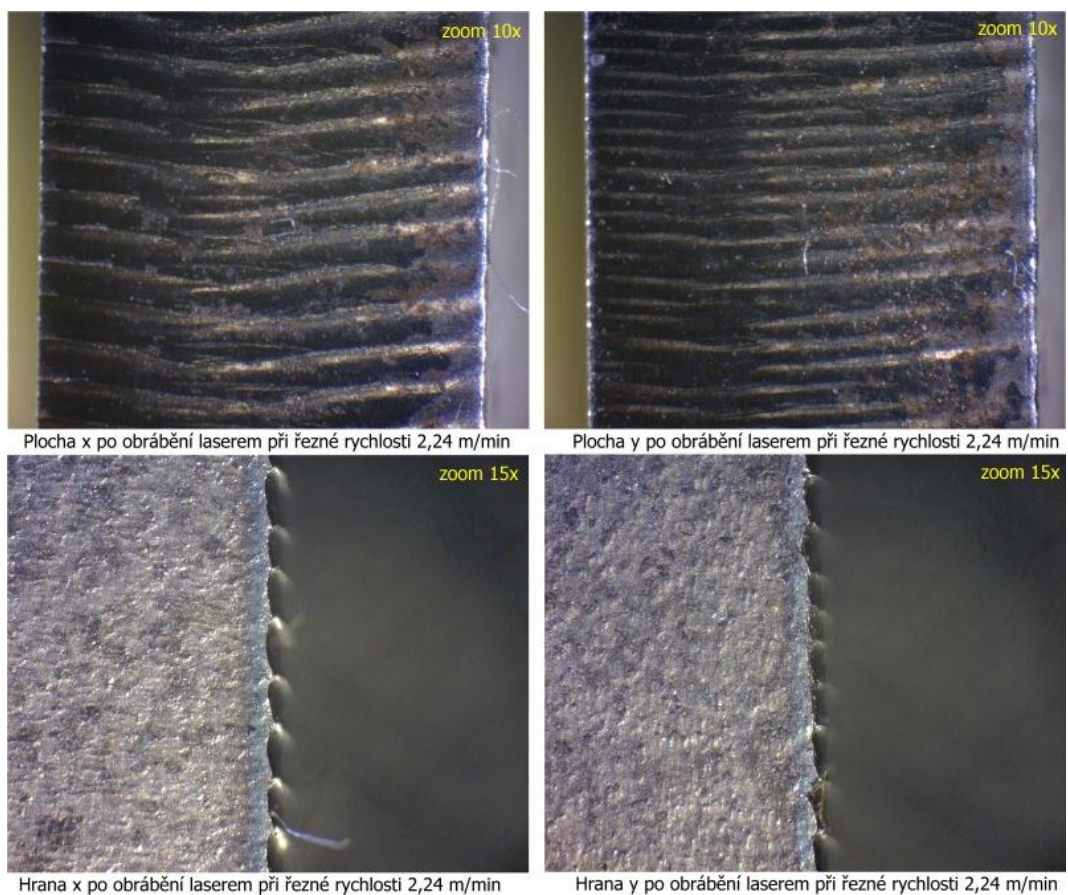


Hrana y po obrábění laserem při řezné rychlosti 2,8 m/min

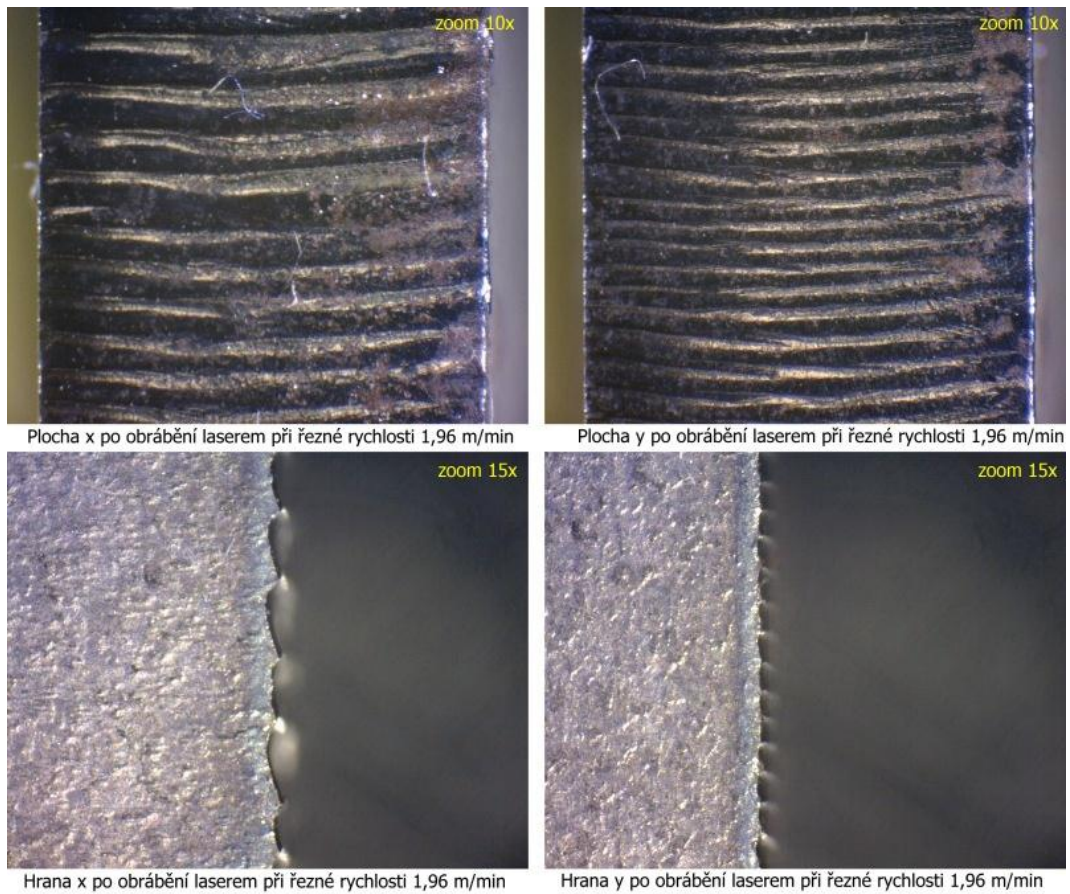
*Obr. 71. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného laserem - materiál 11 375*



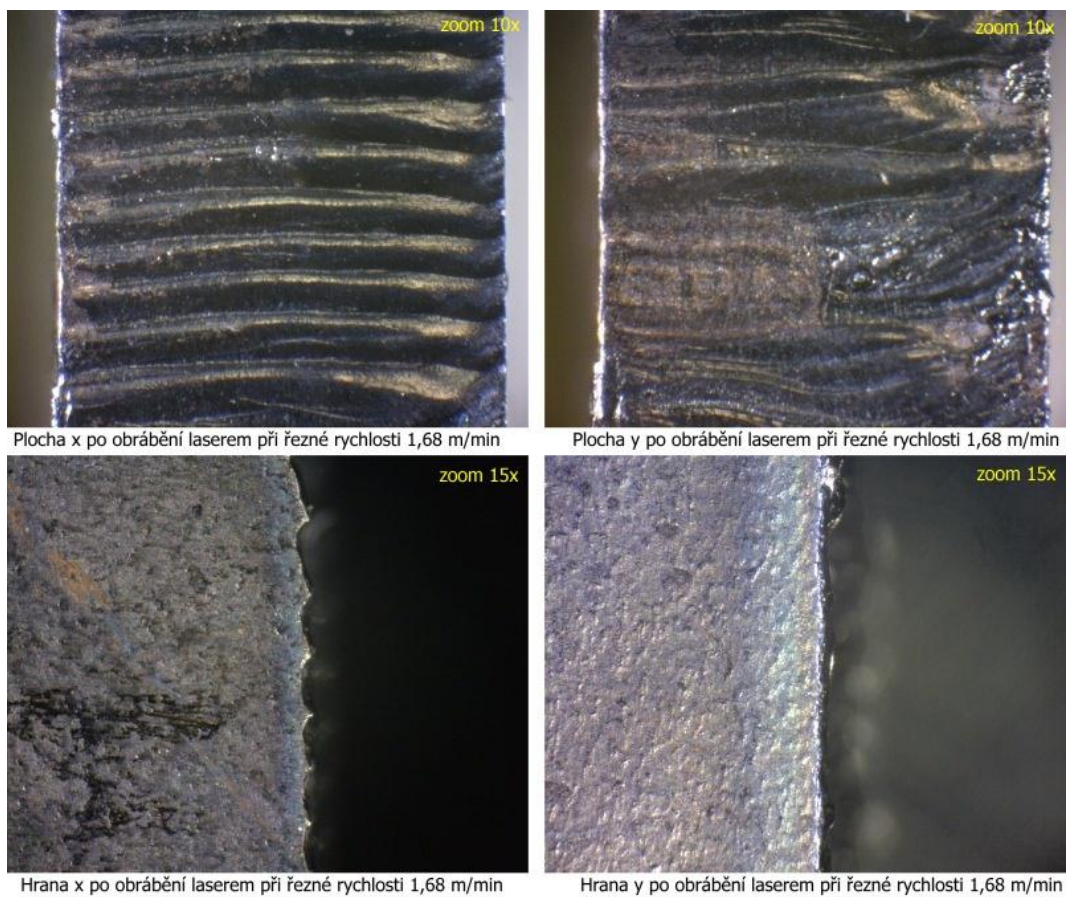
*Obr. 72. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného laserem - materiál 11 375*



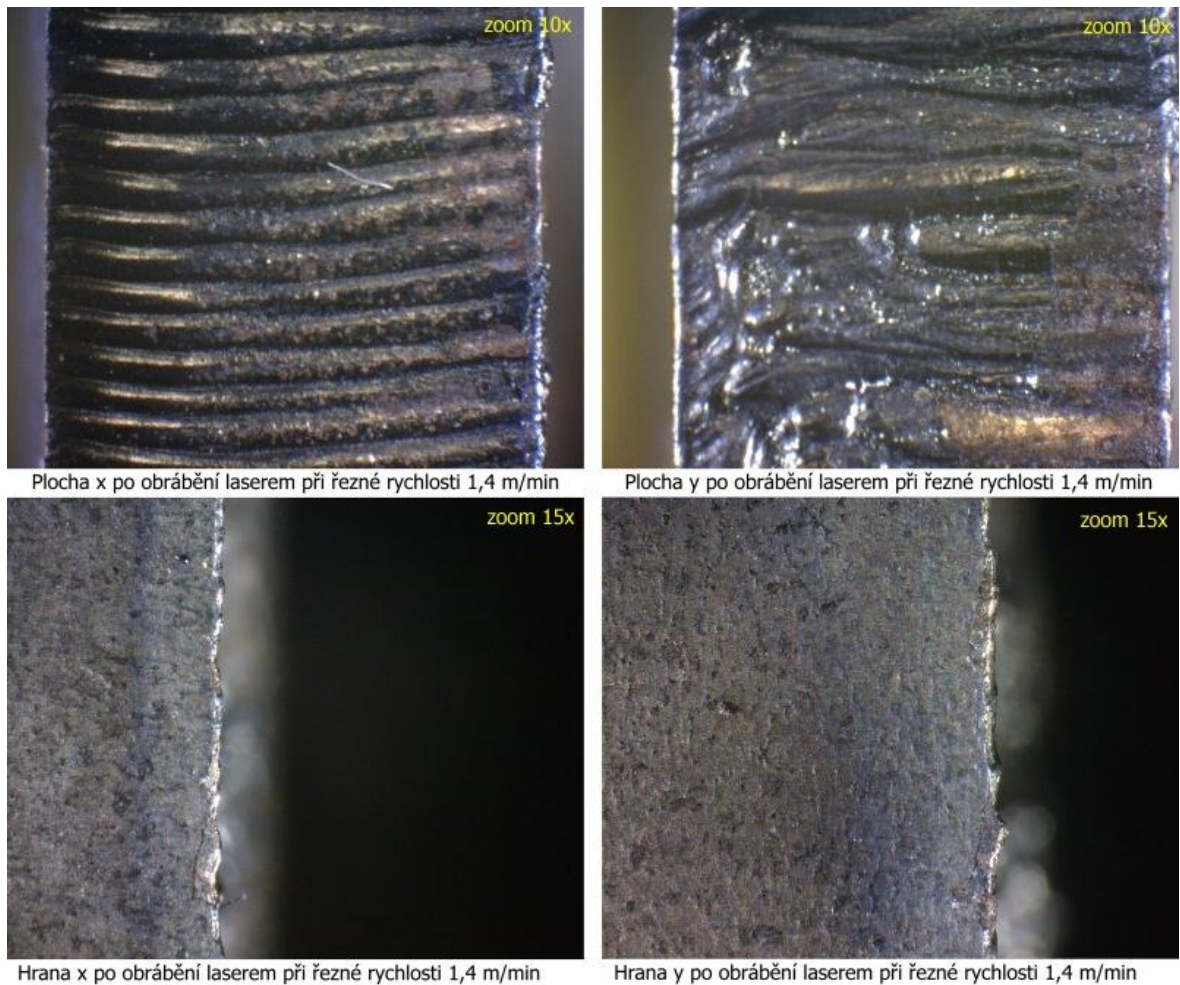
*Obr. 73. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného laserem - materiál 11 375*



*Obr. 74. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného laserem - materiál 11 375*



*Obr. 75. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného laserem - materiál 11 375*



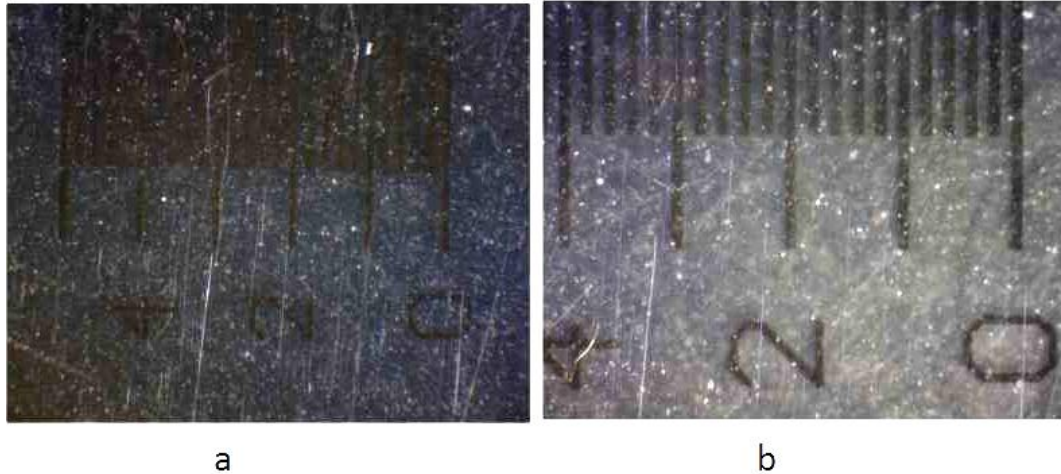
Obr. 76. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného laserem - materiál 11 375

### Závěr:

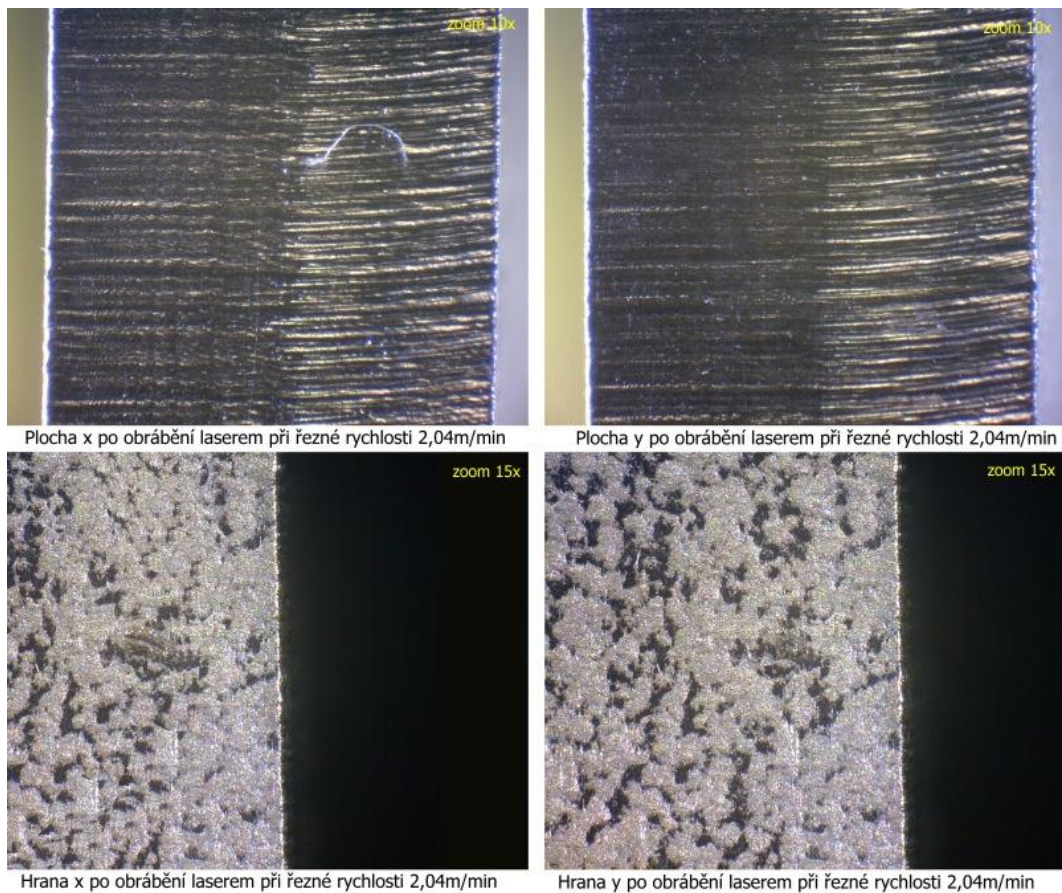
Na snímcích z mikroskopu Zeiss můžeme na řezné hraně vidět projevující se pulzování laserového paprsku. Se snižující se řeznou rychlostí se stopy po pulzujícím paprsku zvětšují. Stopy po laserovém paprsku, řezné žlábků, se zakřivují proti směru posuvu řezné hlavy laserového zařízení. Toto zakřivení je však díky nižší tloušťce materiálu méně patrné, než by tomu bylo například u plechu tloušťky 15 mm. Kdybychom chtěli zvolit optimální řeznou rychlost z hlediska optického hodnocení kvality, volili bychom rychlost 3,08 m/min, což představuje 10% navýšení řezné rychlosti oproti výchozímu nastavení stroje pro konstrukční ocel tloušťky 6 mm.

## 6.4 Vyhodnocení kvality obráběného povrchu u oceli 17 349

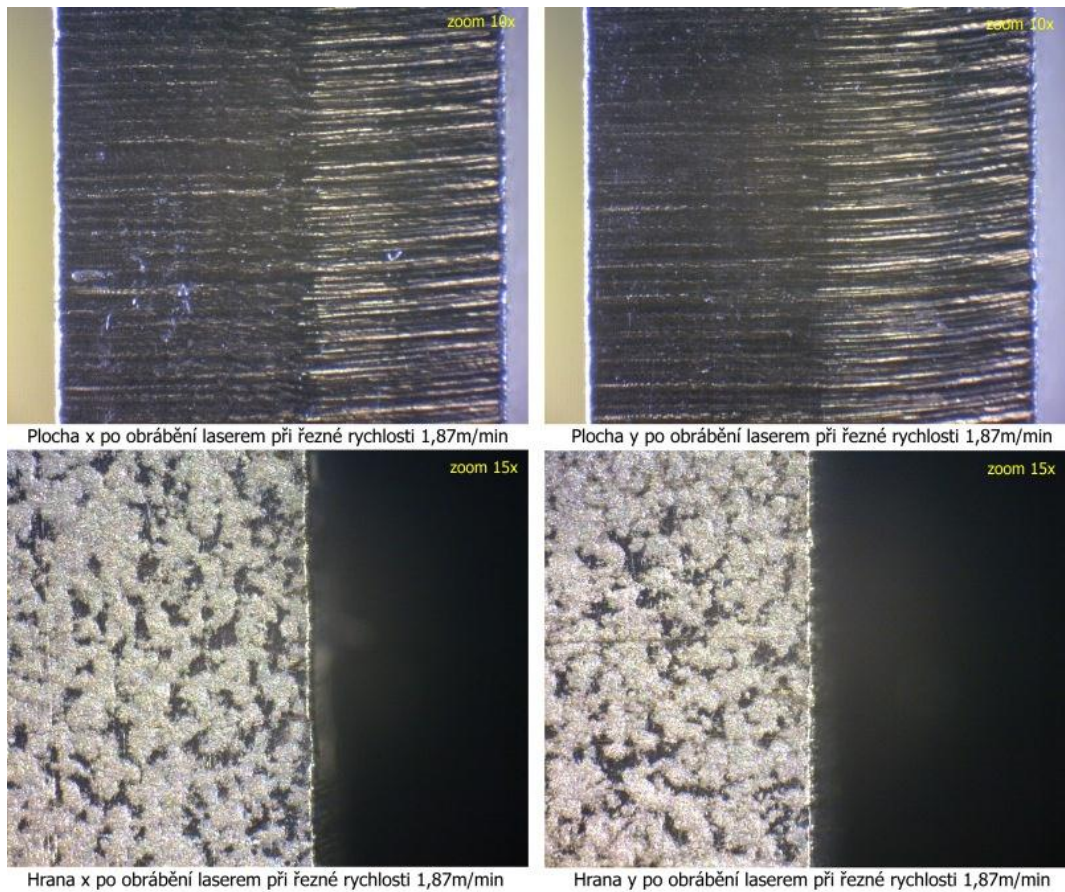
Každý vzorek byl nasnímán univerzálním mikroskopem. Snímány byly plochy po obrábění v ose x i v ose y. Zvětšení řezných ploch bylo 10x. Dále pak byly snímány hrany vzorků po obrábění v ose x a y. Zvětšení bylo 15x.



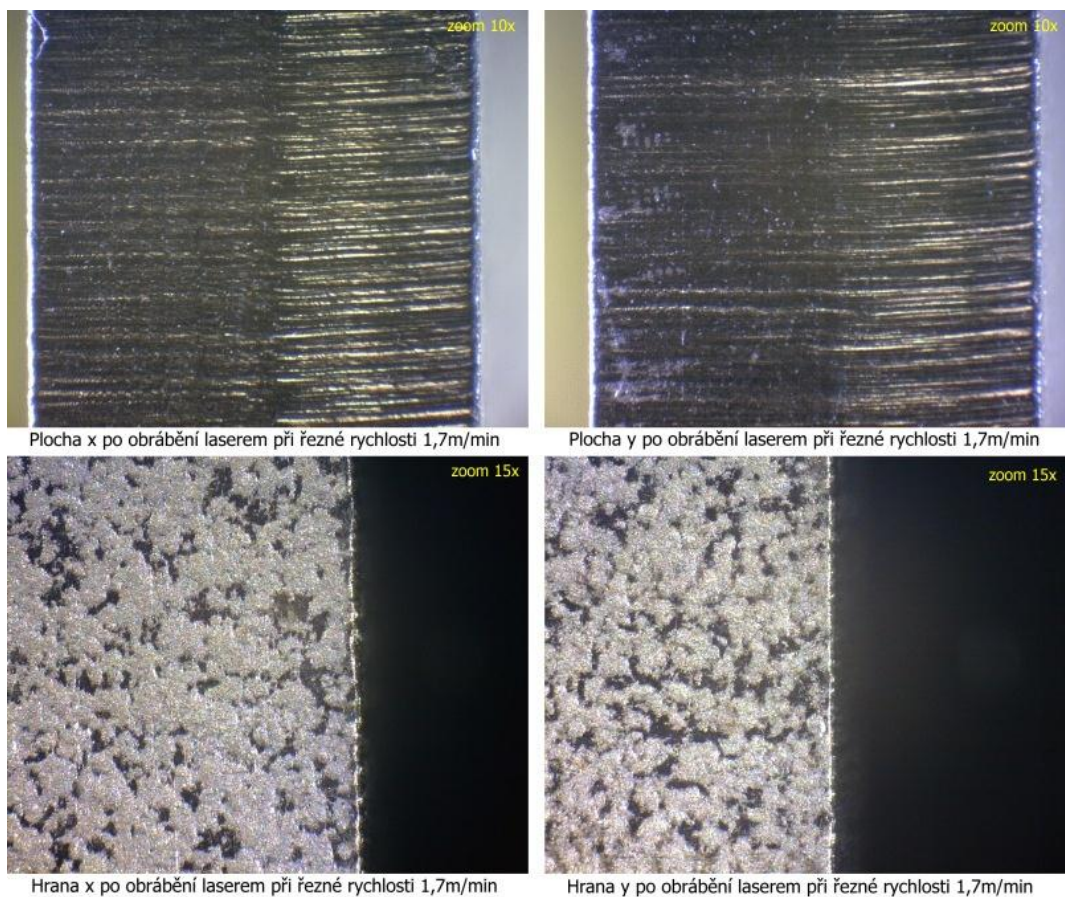
Obr. 68. Snímek kalibračního pásku a) zvětšení 10x b) zvětšení 15x



Obr. 77. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného laserem - materiál 17 349

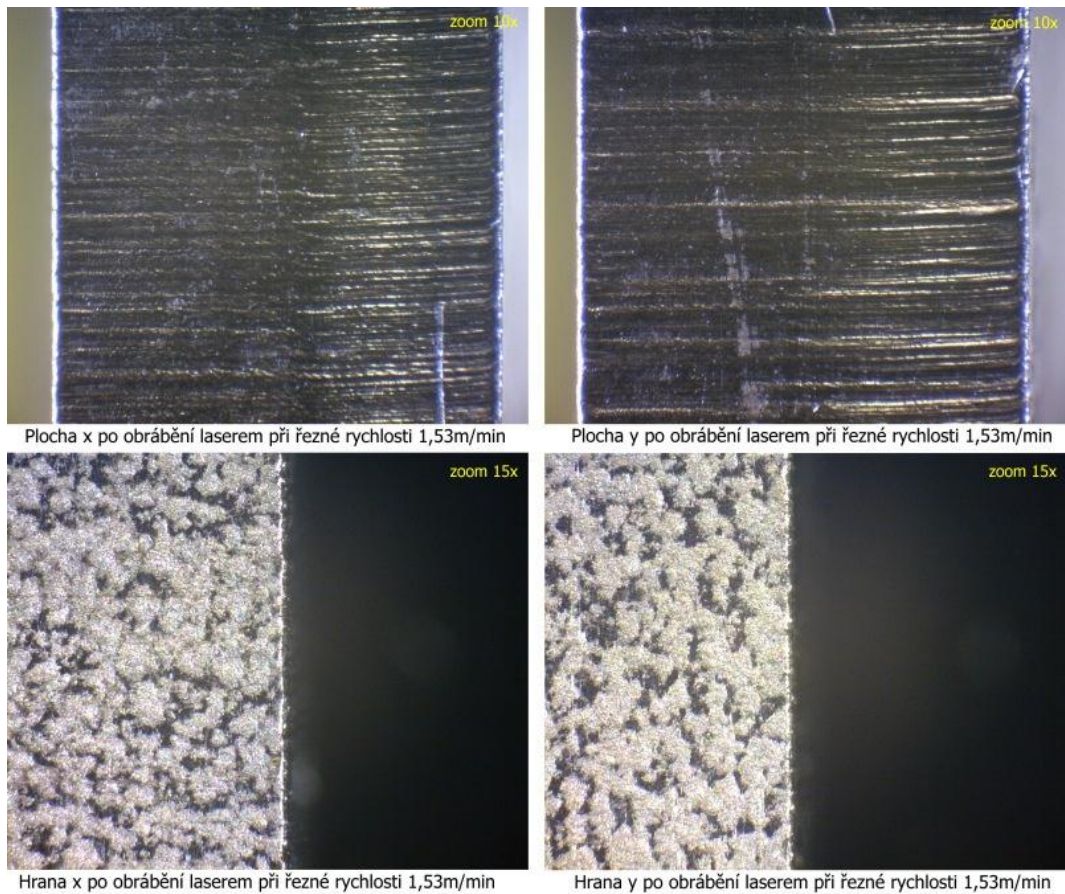


Obr. 78. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného laserem - materiál 17 349

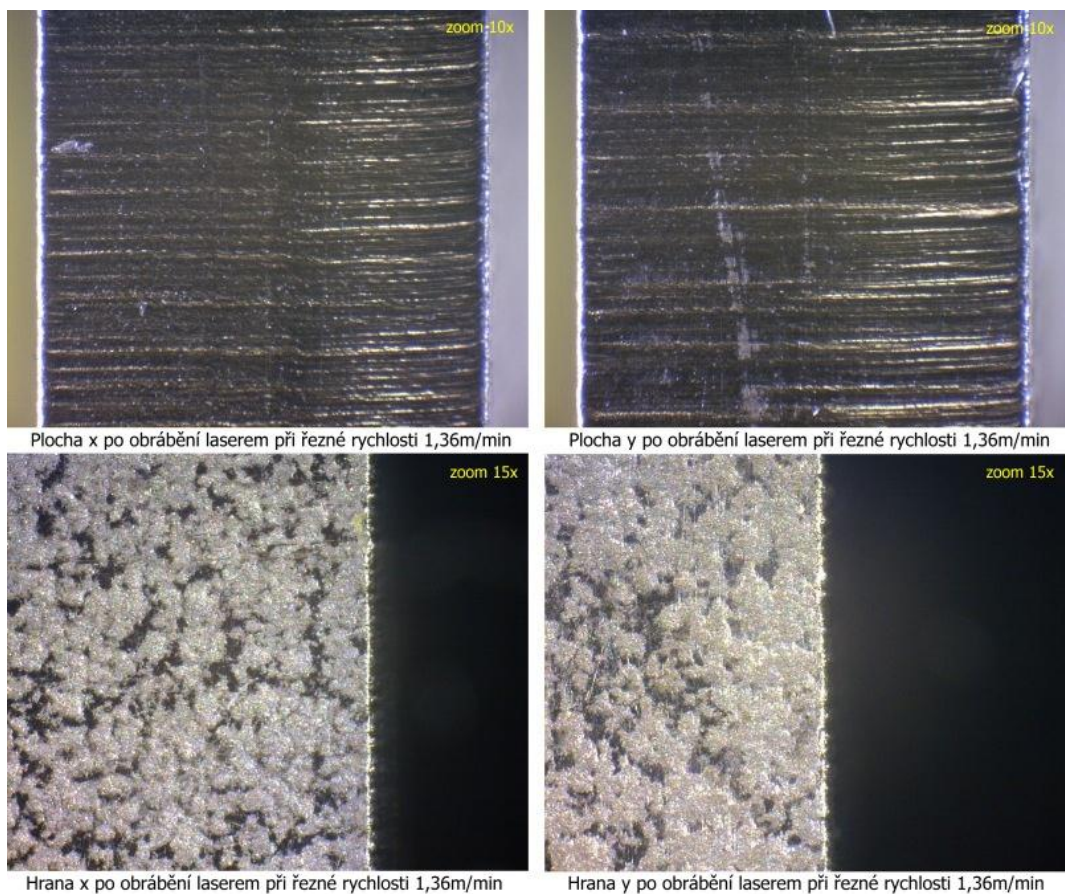


Obr. 79. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného laserem - materiál 17 349

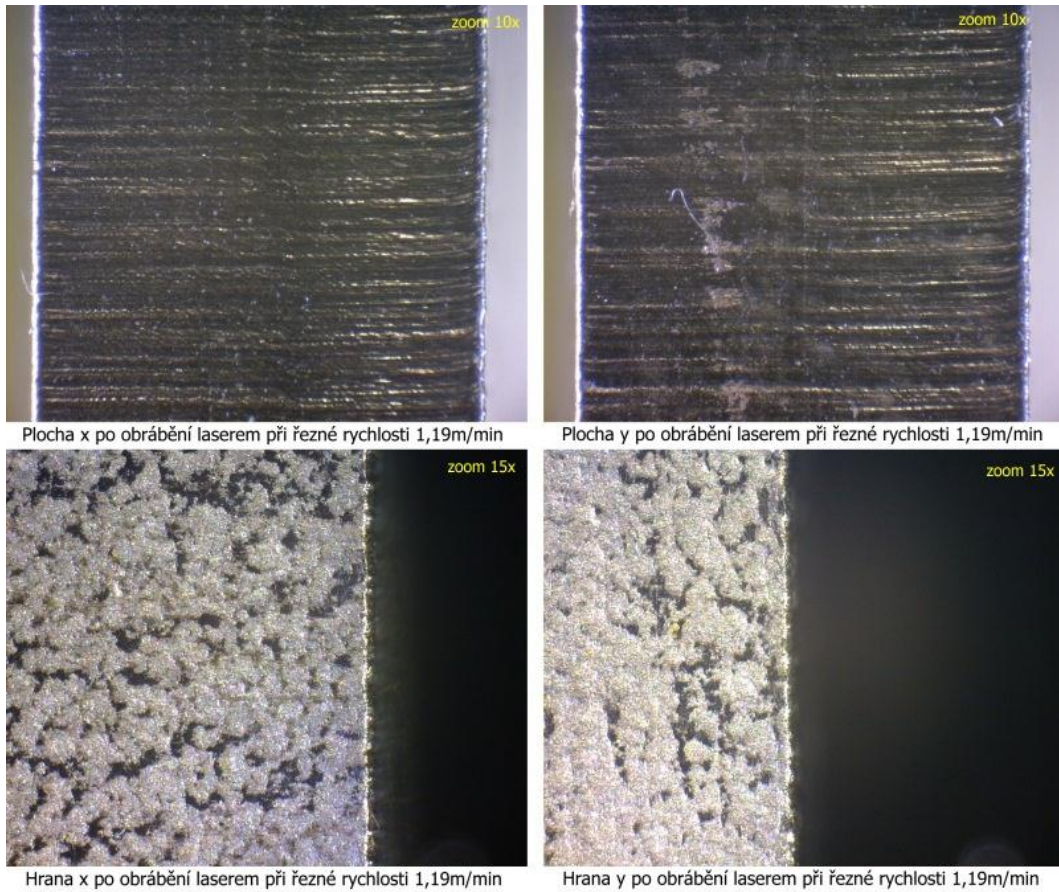




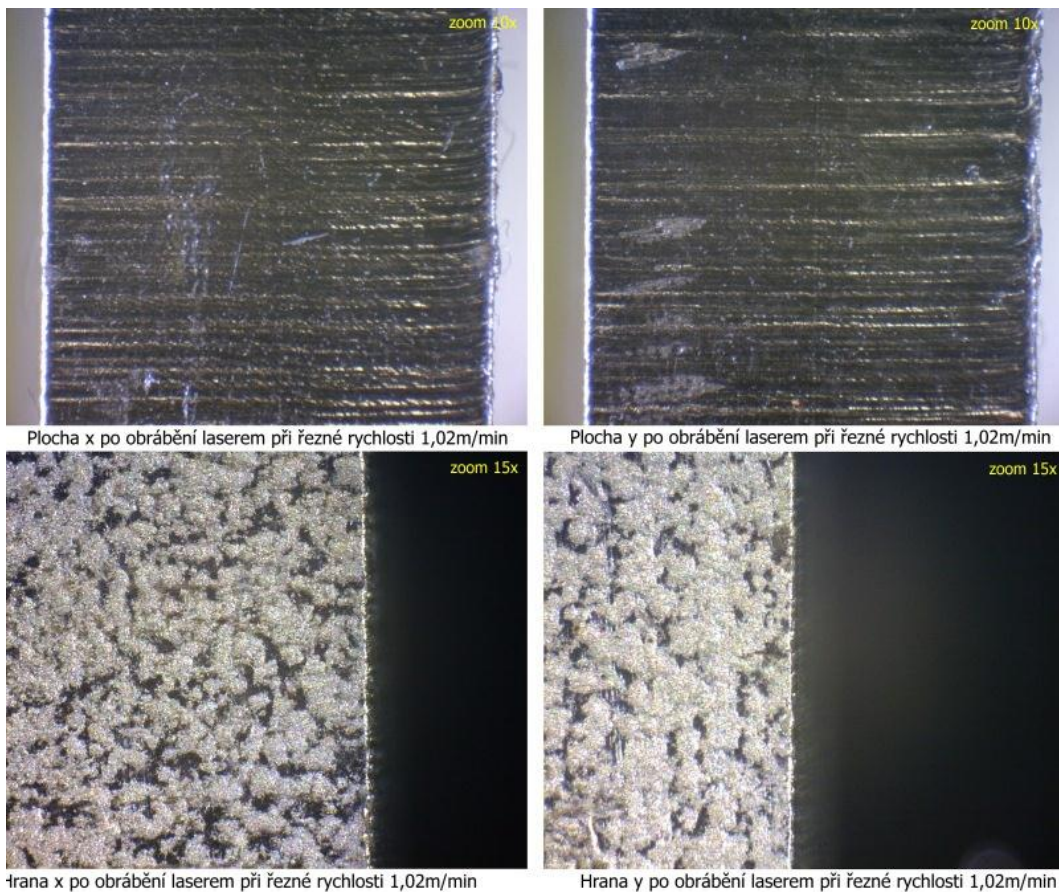
Obr. 80. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného laserem - materiál 17 349



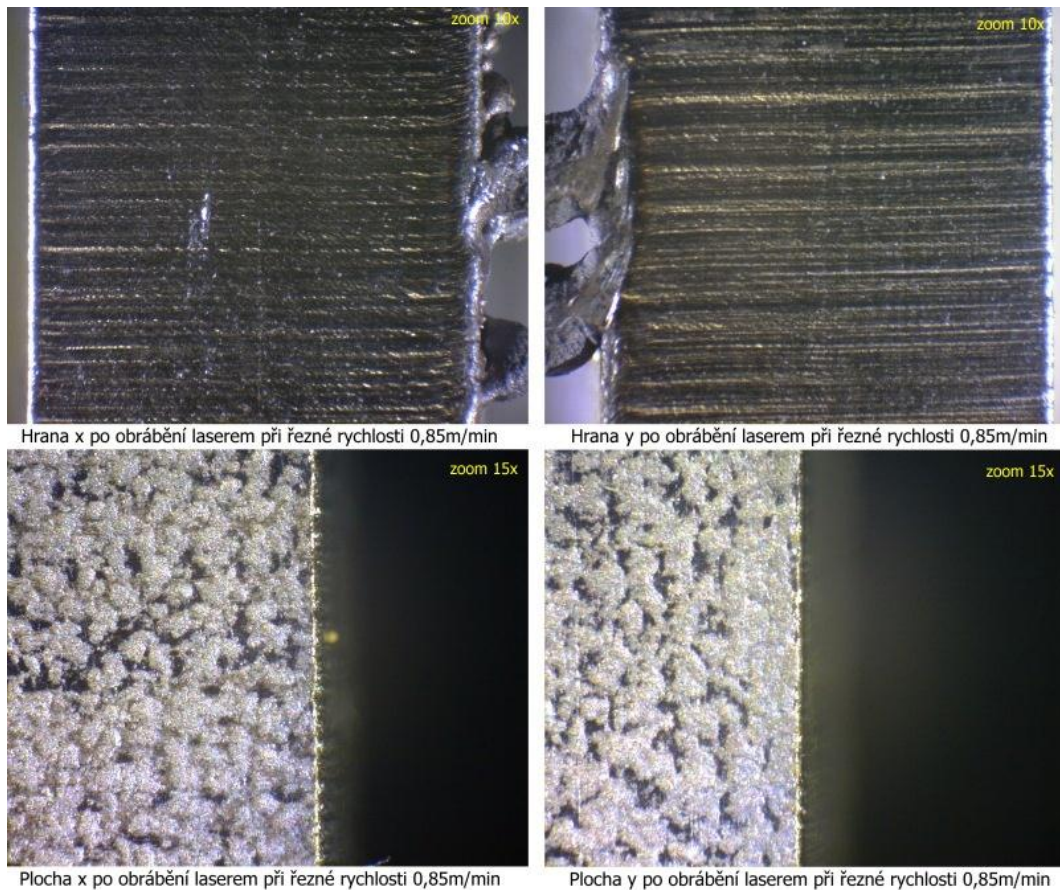
Obr. 81. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného laserem - materiál 17 349



*Obr. 82. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného laserem - materiál 17 349*



*Obr. 83. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného laserem - materiál 17 349*



Obr. 84. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného laserem - materiál 17 349

### Závěr:

U materiálu 17 349 jsou stopy po laserovém paprsku o poznání menší. Kvalita povrchu obrobku je zřetelně lepší než u konstrukční oceli. Řezné žlábků jsou velmi jemné. U nejnižší testované řezné rychlosti 0,85 m/min se projevilo ulpívání materiálu na obrobku. Tento natavený materiál nebyl odfouknut a zatusnul na spodní hraně obráběného vzorku. Nízká řezná rychlost je tedy nevhodná pro obrábění nerezového materiálu. V případě obrábění laserovým paprskem bychom mohli nejvyšší řeznou rychlost označit jako optimální. Řezná rychlost 2,04 m/min by znamenala navýšení řezné rychlosti o 20% oproti defaultnímu nastavení laserového obráběcího zařízení pro nerezový materiál tloušťky 6 mm.

## 7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ PLAZMOVÝM PAPERSEM

### 7.1 Vyhodnocení rozměrové přesnosti u oceli 11 375

Proměnným technologickým parametrem byla řezná rychlost, která se pohybovala od 1,8 m/min do 4,32 m/min. Pálící proud byl 130 A, řezný tlak 9,9 bar. Plazmový plyn byl kyslík ( $O_2$ ), ochranný plyn byl dusík ( $N_2$ ), zapalovací plyn byl vzduch.

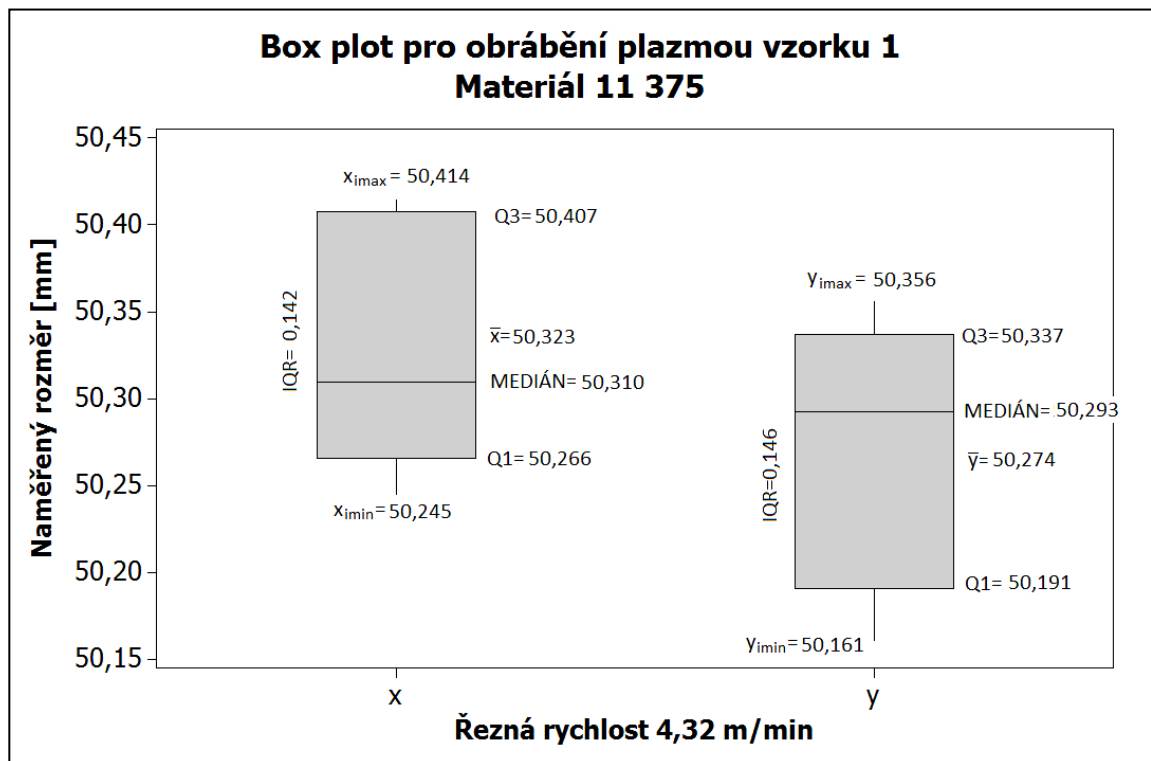
Obrobek byl měřen 10x ve směru x ( $x_1-x_{10}$ ) a 10x ve směru y ( $y_1-y_{10}$ ) digitálním třmenovým mikrometrem značky Mitutoyo s rozlišením 1  $\mu$ m.



*Obr. 85. Obrábění oceli 11 375 plazmovým paprskem*

Tab. 21. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

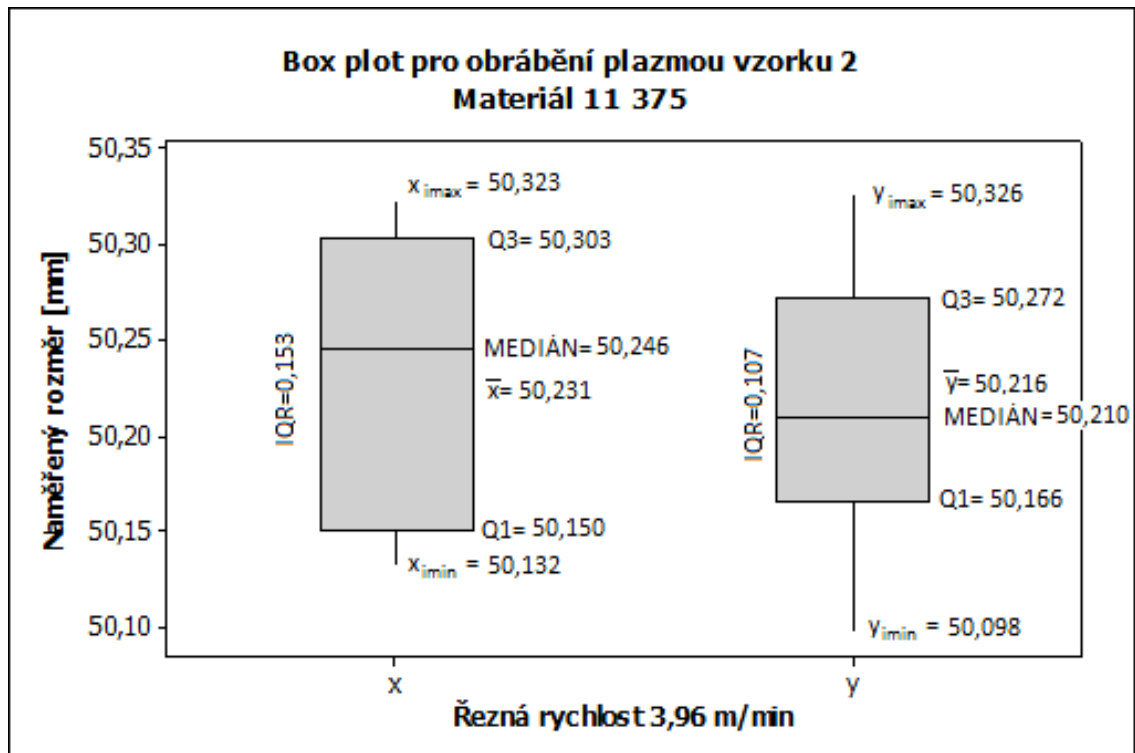
1. PLAZMA vzorek 1 - 11 375 - 4,32 m/min							
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	50,287	50,3233	-0,0363	0,00132	0,0676	0,1343
	2	50,245		-0,0783	0,00613		
	3	50,412		0,0887	0,00787		
	4	50,406		0,0827	0,00684		
	5	50,272		-0,0513	0,00263		
	6	50,332		0,0087	0,00008		
	7	50,247		-0,0763	0,00582		
	8	50,339		0,0157	0,00025		
	9	50,414		0,0907	0,00823		
	10	50,279		-0,0443	0,00196		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	50,279	50,2736	0,0054	0,00003	0,0702	0,1397
	12	50,339		0,0654	0,00428		
	13	50,356		0,0824	0,00679		
	14	50,161		-0,1126	0,01268		
	15	50,314		0,0404	0,00163		
	16	50,306		0,0324	0,00105		
	17	50,336		0,0624	0,00389		
	18	50,265		-0,0086	0,00007		
	19	50,189		-0,0846	0,00716		
	20	50,191		-0,0826	0,00682		



Obr. 86. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 1 - materiál 11 375

Tab. 22. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

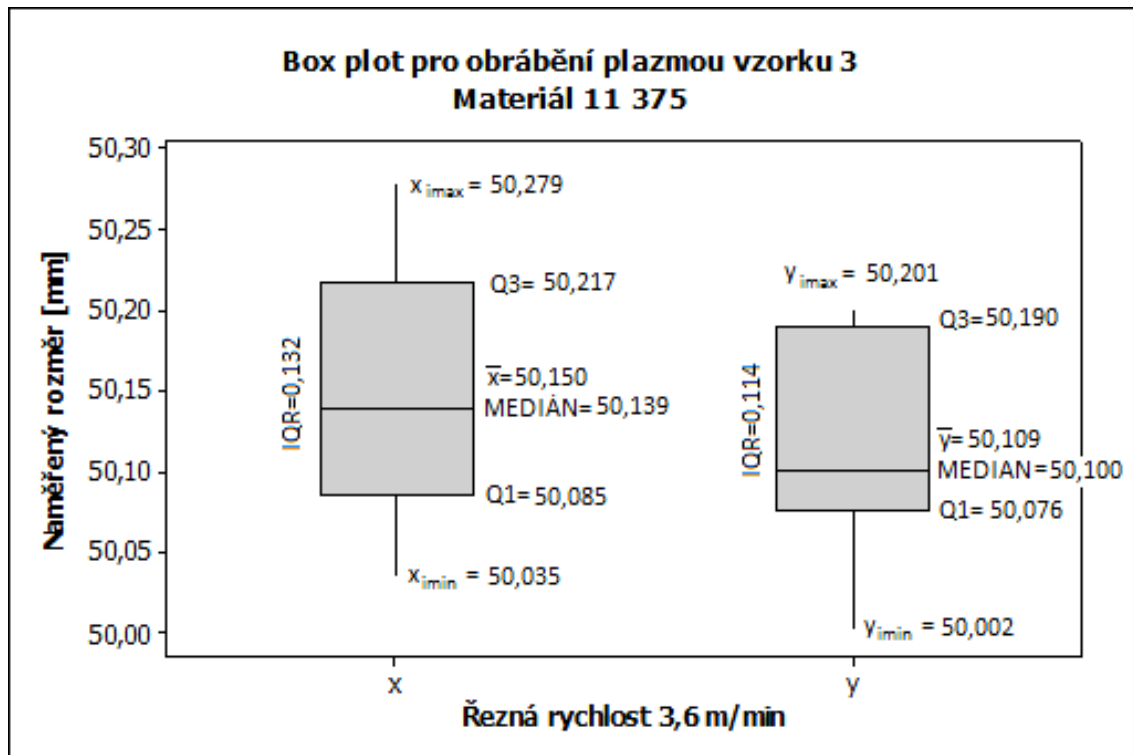
PLAZMA vzorek 2 - 11 375 - 3,96 m/min							
2.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	50,244	50,2308	0,0132	0,00017	0,0722	0,1438
	2	50,247		0,0162	0,00026		
	3	50,301		0,0702	0,00493		
	4	50,265		0,0342	0,00117		
	5	50,135		-0,0958	0,00918		
	6	50,323		0,0922	0,00850		
	7	50,309		0,0782	0,00612		
	8	50,132		-0,0988	0,00976		
	9	50,155		-0,0758	0,00575		
	10	50,197		-0,0338	0,00114		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	50,306	50,2156	0,0904	0,00817	0,0746	0,1486
	12	50,256		0,0404	0,00163		
	13	50,261		0,0454	0,00206		
	14	50,117		-0,0986	0,00972		
	15	50,191		-0,0246	0,00061		
	16	50,182		-0,0336	0,00113		
	17	50,326		0,1104	0,01219		
	18	50,228		0,0124	0,00015		
	19	50,191		-0,0246	0,00061		
	20	50,098		-0,1176	0,01383		



Obr. 87. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 2 - materiál 11 375

Tab. 23. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

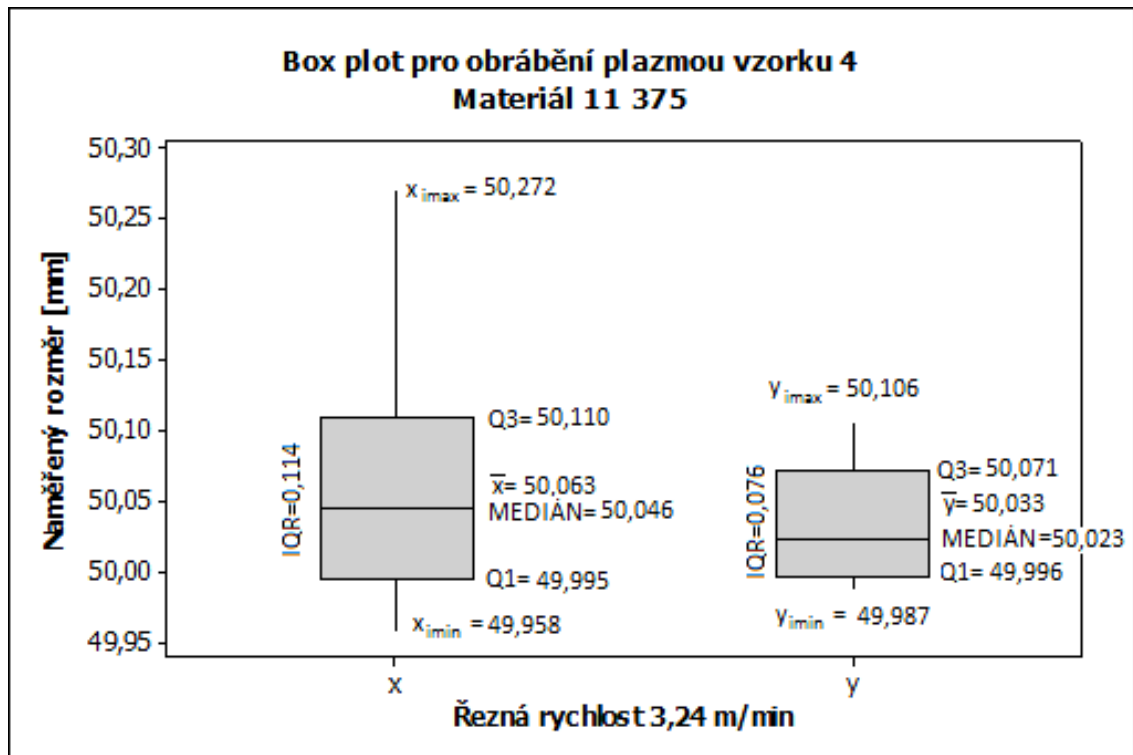
3. PLAZMA vzorek 3 - 11 375 - 3,6 m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	50,035	50,1497	-0,1147	0,01316	0,0815	0,1625
	2	50,125		-0,0247	0,00061		
	3	50,201		0,0513	0,00263		
	4	50,279		0,1293	0,01672		
	5	50,068		-0,0817	0,00667		
	6	50,177		0,0273	0,00075		
	7	50,266		0,1163	0,01353		
	8	50,091		-0,0587	0,00345		
	9	50,102		-0,0477	0,00228		
	10	50,153		0,0033	0,00001		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	50,189	50,1093	0,0797	0,00635	0,0695	0,1386
	12	50,098		-0,0113	0,00013		
	13	50,191		0,0817	0,00667		
	14	50,201		0,0917	0,00841		
	15	50,002		-0,1073	0,01151		
	16	50,099		-0,0103	0,00011		
	17	50,102		-0,0073	0,00005		
	18	50,099		-0,0103	0,00011		
	19	50,009		-0,1003	0,01006		
	20	50,103		-0,0063	0,00004		



Obr. 88. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 3 - materiál 11 375

Tab. 24. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

PLAZMA vzorek 4 - 11 375 - 3,24 m/min							
4.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	50,048	50,0633	-0,0153	0,00023	0,0925	0,1847
	2	50,148		0,0847	0,00717		
	3	50,007		-0,0563	0,00317		
	4	49,958		-0,1053	0,01109		
	5	50,075		0,0117	0,00014		
	6	49,987		-0,0763	0,00582		
	7	50,272		0,2087	0,04356		
	8	49,998		-0,0653	0,00426		
	9	50,097		0,0337	0,00114		
	10	50,043		-0,0203	0,00041		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,998	50,0327	-0,0347	0,00120	0,0415	0,0830
	12	50,001		-0,0317	0,00100		
	13	50,078		0,0453	0,00205		
	14	50,069		0,0363	0,00132		
	15	49,987		-0,0457	0,00209		
	16	50,021		-0,0117	0,00014		
	17	50,052		0,0193	0,00037		
	18	50,106		0,0733	0,00537		
	19	49,989		-0,0437	0,00191		
	20	50,026		-0,0067	0,00004		

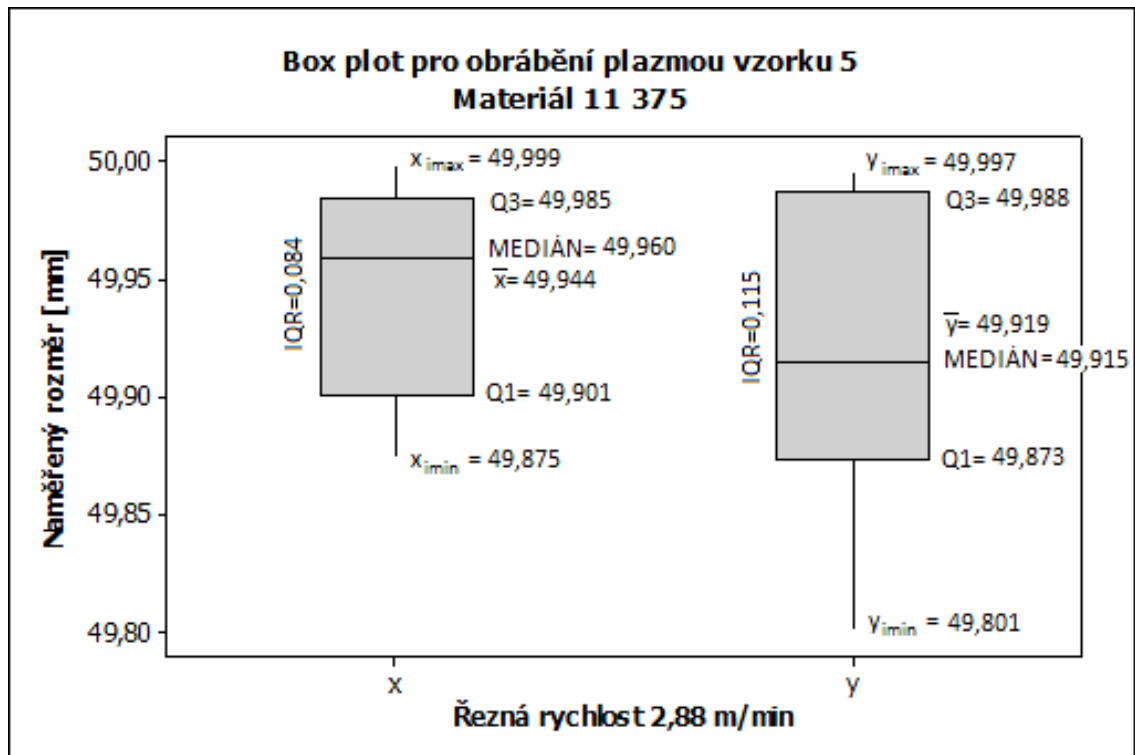


Obr. 89. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 4 - materiál 11 375



Tab. 25. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

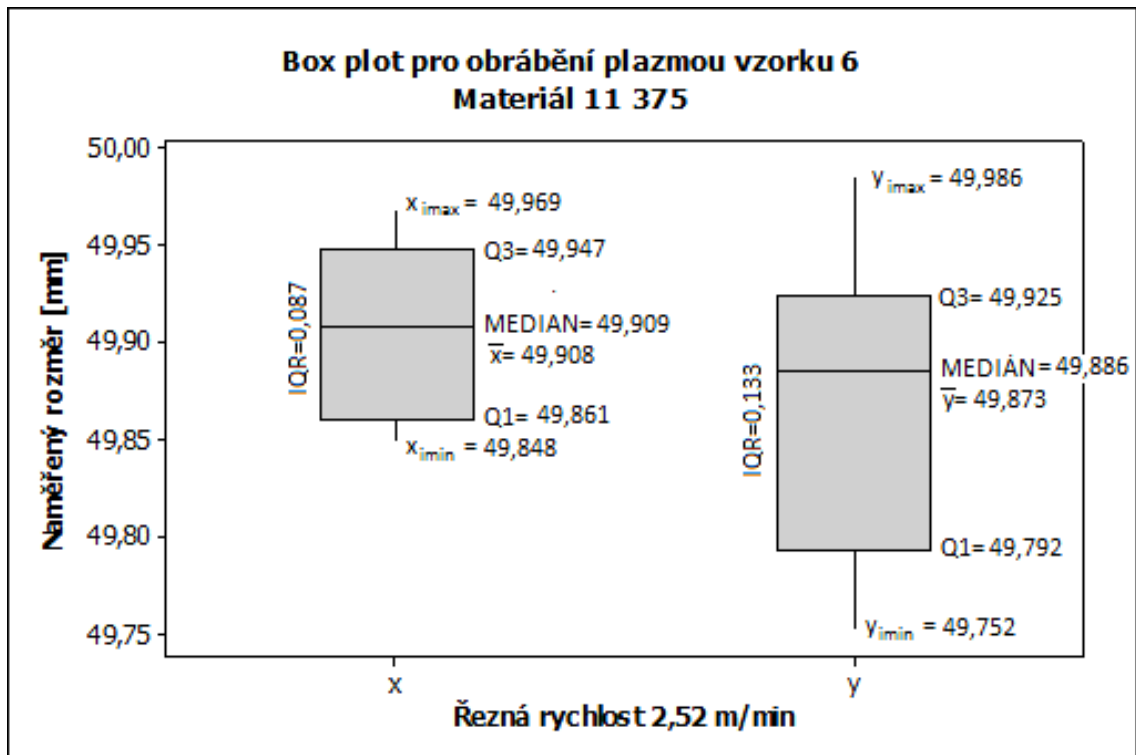
PLAZMA vzorek 5 - 11 375 - 2,88 m/min							
5.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,982	49,9443	0,0377	0,00142	0,0446	0,0893
	2	49,956		0,0117	0,00014		
	3	49,875		-0,0693	0,00480		
	4	49,898		-0,0463	0,00214		
	5	49,908		-0,0363	0,00132		
	6	49,999		0,0547	0,00299		
	7	49,964		0,0197	0,00039		
	8	49,994		0,0497	0,00247		
	9	49,965		0,0207	0,00043		
	10	49,902		-0,0423	0,00179		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,801	49,9192	-0,1182	0,01397	0,0675	0,1351
	12	49,997		0,0778	0,00605		
	13	49,881		-0,0382	0,00146		
	14	49,991		0,0718	0,00516		
	15	49,885		-0,0342	0,00117		
	16	49,878		-0,0412	0,00170		
	17	49,987		0,0678	0,00460		
	18	49,968		0,0488	0,00238		
	19	49,858		-0,0612	0,00375		
	20	49,946		0,0268	0,00072		



Obr. 90. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 5 - materiál 11 375

Tab. 26. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

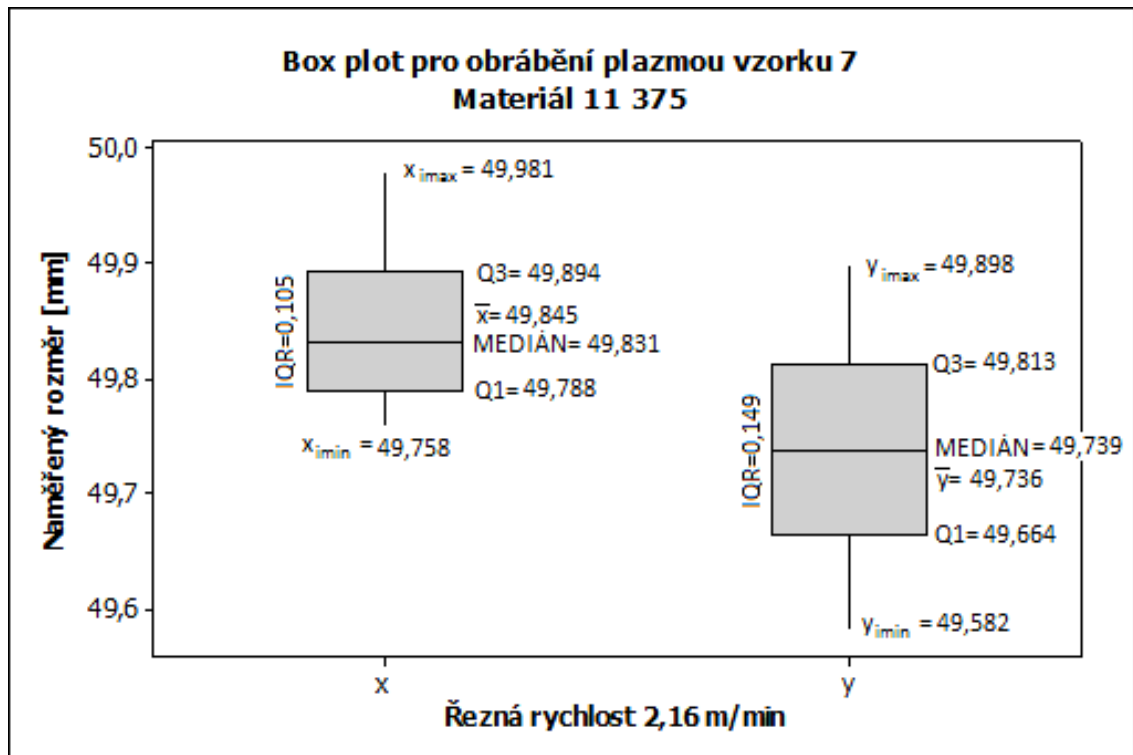
PLAZMA vzorek 6 - 11 375 - 2,52 m/min							
6.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,896	49,9079	-0,0119	0,00014	0,0432	0,0865
	2	49,861		-0,0469	0,00220		
	3	49,969		0,0611	0,00373		
	4	49,923		0,0151	0,00023		
	5	49,964		0,0561	0,00315		
	6	49,861		-0,0469	0,00220		
	7	49,894		-0,0139	0,00019		
	8	49,848		-0,0599	0,00359		
	9	49,942		0,0341	0,00116		
	10	49,921		0,0131	0,00017		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,905	49,8730	0,0320	0,00102	0,0801	0,1607
	12	49,898		0,0250	0,00062		
	13	49,772		-0,1010	0,01020		
	14	49,752		-0,1210	0,01464		
	15	49,799		-0,0740	0,00548		
	16	49,986		0,1130	0,01277		
	17	49,892		0,0190	0,00036		
	18	49,862		-0,0110	0,00012		
	19	49,879		0,0060	0,00004		
	20	49,985		0,1120	0,01254		



Obr. 91. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 6 - materiál 11 375

Tab. 27. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

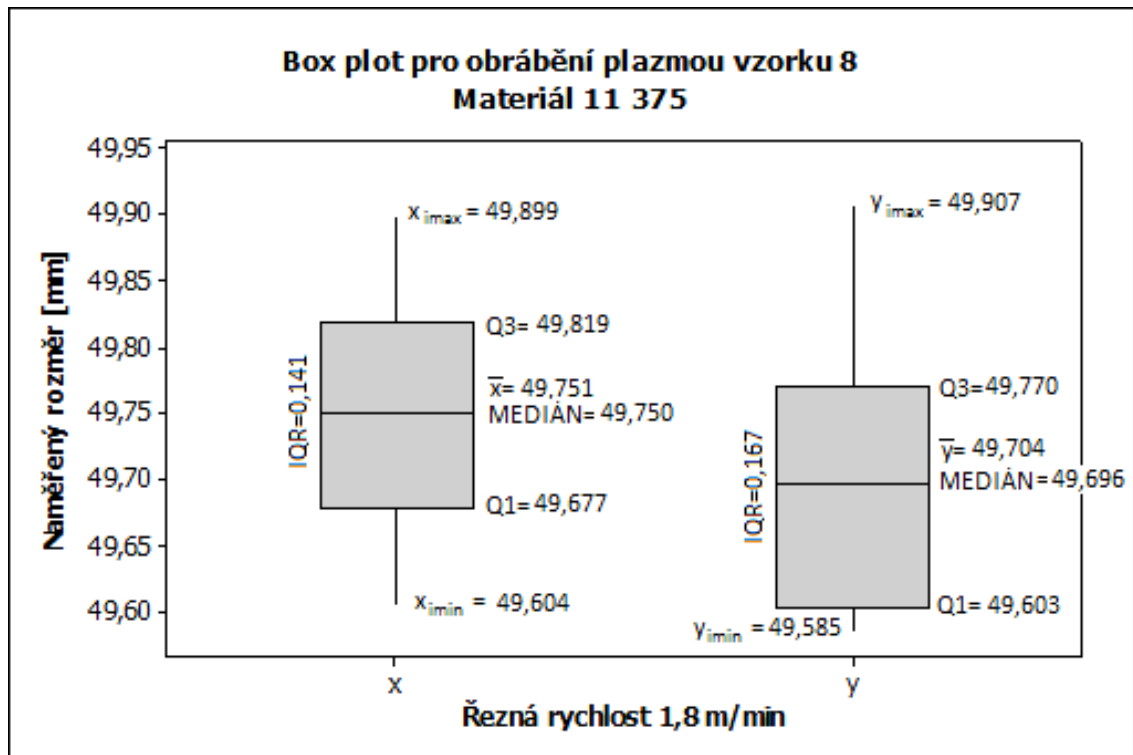
PLAZMA vzorek 7 - 11 375 - 2,16 m/min							
7.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,921	49,8452	0,0758	0,00575	0,0693	0,1389
	2	49,981		0,1358	0,01844		
	3	49,829		-0,0162	0,00026		
	4	49,818		-0,0272	0,00074		
	5	49,758		-0,0872	0,00760		
	6	49,863		0,0178	0,00032		
	7	49,769		-0,0762	0,00581		
	8	49,885		0,0398	0,00158		
	9	49,795		-0,0502	0,00252		
	10	49,833		-0,0122	0,00015		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,802	49,7360	0,0660	0,00436	0,1052	0,2116
	12	49,845		0,1090	0,01188		
	13	49,778		0,0420	0,00176		
	14	49,691		-0,0450	0,00202		
	15	49,898		0,1620	0,02624		
	16	49,699		-0,0370	0,00137		
	17	49,582		-0,1540	0,02372		
	18	49,582		-0,1540	0,02372		
	19	49,789		0,0530	0,00281		
	20	49,694		-0,0420	0,00176		



Obr. 92. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 7 - materiál 11 375

Tab. 28. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

8. PLAZMA vzorek 8 - 11 375 - 1,8 m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	49,676	49,7513	-0,0753	0,00567	0,0950	0,1908
	2	49,783		0,0317	0,00100		
	3	49,899		0,1477	0,02182		
	4	49,797		0,0457	0,00209		
	5	49,717		-0,0343	0,00118		
	6	49,784		0,0327	0,00107		
	7	49,884		0,1327	0,01761		
	8	49,678		-0,0733	0,00537		
	9	49,604		-0,1473	0,02170		
	10	49,691		-0,0603	0,00364		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	49,709	49,7043	0,0047	0,00002	0,1017	0,2046
	12	49,689		-0,0153	0,00023		
	13	49,585		-0,1193	0,01423		
	14	49,756		0,0517	0,00267		
	15	49,609		-0,0953	0,00908		
	16	49,907		0,2027	0,04109		
	17	49,585		-0,1193	0,01423		
	18	49,811		0,1067	0,01138		
	19	49,693		-0,0113	0,00013		
	20	49,699		-0,0053	0,00003		



Obr. 93. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 8 - materiál 11 375

**Přehled výsledků po obrábění plazmou materiálu 11 375 v ose x:**

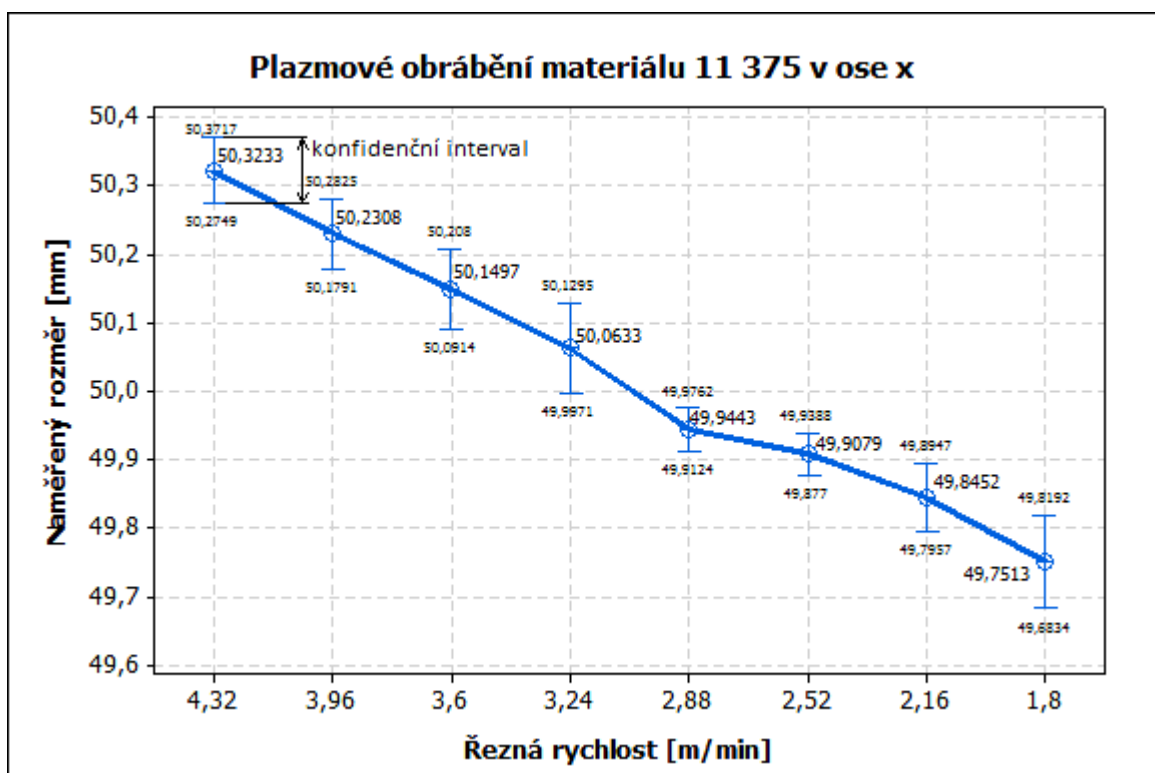
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
4,32	50,323	0,0676	0,13	50,245	50,266	50,310	50,407	50,414	0,142
3,96	50,231	0,0722	0,14	50,132	50,150	50,246	50,303	50,323	0,153
3,6	50,150	0,0815	0,16	50,035	50,085	50,139	50,217	50,279	0,132
3,24	50,063	0,0925	0,18	49,958	49,995	50,046	50,110	50,272	0,114
2,88	49,944	0,0446	0,09	49,875	49,901	49,960	49,985	49,999	0,084
2,52	49,908	0,0432	0,09	49,848	49,861	49,909	49,947	49,969	0,087
2,16	49,845	0,0693	0,14	49,758	49,788	49,831	49,894	49,981	0,105
1,8	49,751	0,0950	0,19	49,604	49,677	49,750	49,819	49,899	0,141

**Přehled výsledků po obrábění plazmou materiálu 11 375 v ose y:**

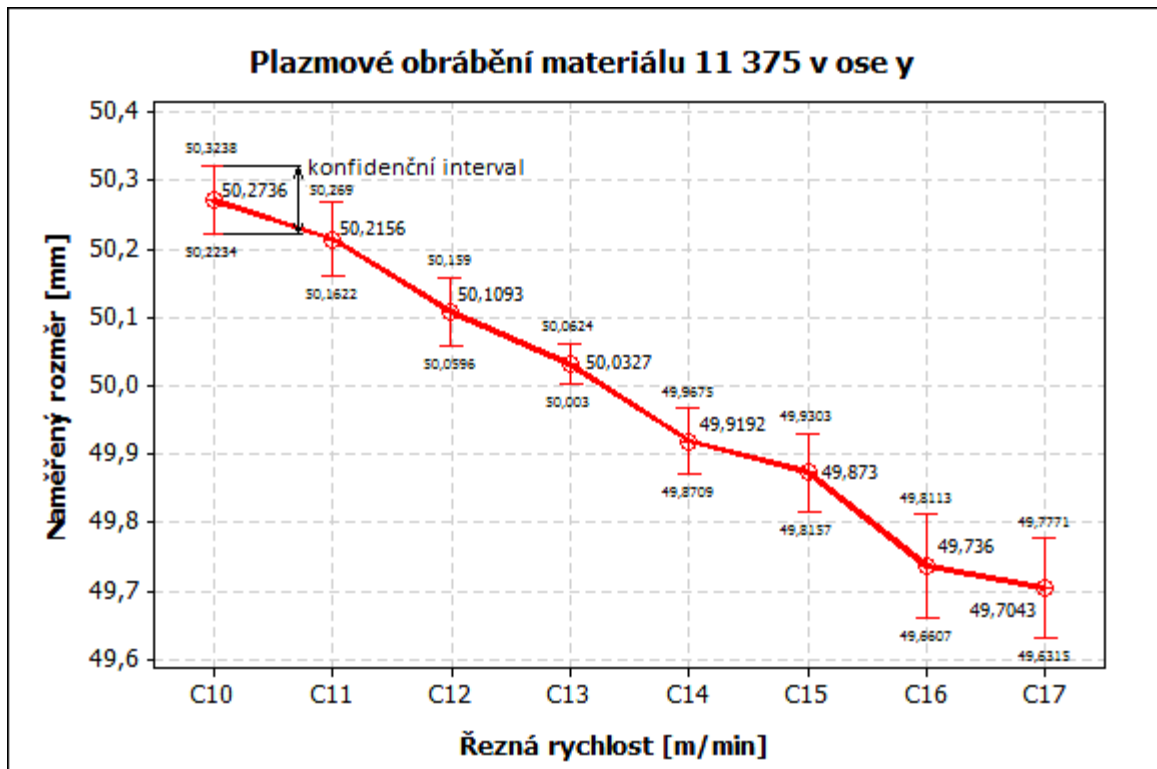
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
4,32	50,274	0,0702	0,14	50,161	50,191	50,293	50,337	50,356	0,146
3,96	50,216	0,0746	0,15	50,098	50,166	50,210	50,272	50,326	0,107
3,6	50,109	0,0695	0,14	50,002	50,076	50,100	50,190	50,201	0,114
3,24	50,033	0,0415	0,08	49,987	49,996	50,023	50,071	50,106	0,076
2,88	49,919	0,0675	0,14	49,801	49,873	49,915	49,988	49,997	0,115
2,52	49,873	0,0801	0,16	49,752	49,792	49,886	49,925	49,986	0,133
2,16	49,736	0,105	0,21	49,582	49,664	49,739	49,813	49,898	0,149
1,8	49,704	0,102	0,20	49,585	49,603	49,696	49,770	49,907	0,167

Kde:

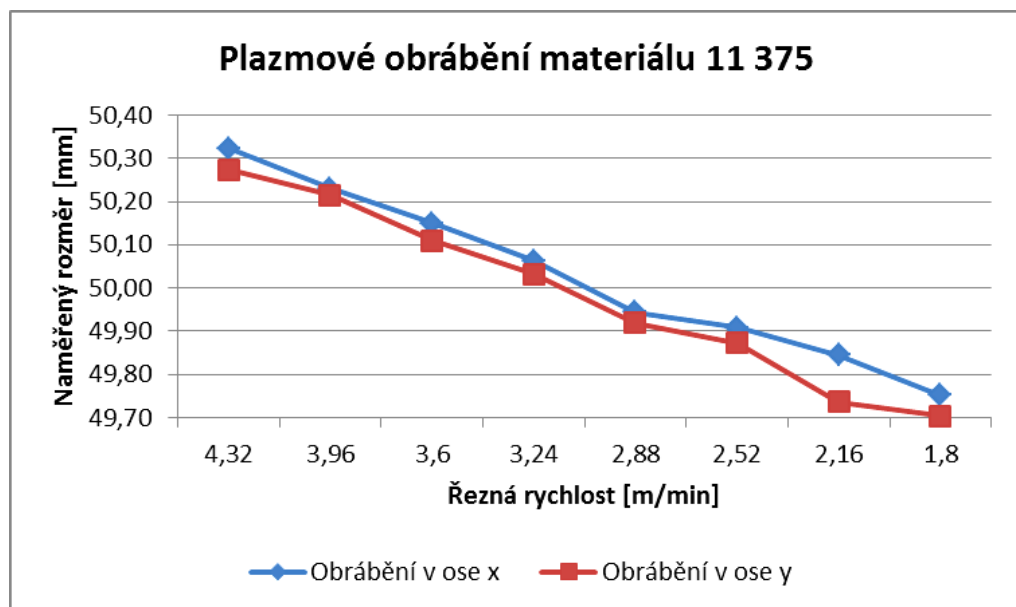
Variable – proměnná (řezná rychlost [m/min]), Mean – aritmetický průměr, StDev – směrodatná odchylka, CoefVar – Variační koeficient, Minimum – nejnižší naměřená hodnota, Q1 – první kvartil, Median – Medián, Q3 – třetí kvartil, Maximum – nejvyšší naměřená hodnota, IQR – rozdíl mezi prvním a třetím kvartilem



Obr. 94. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose x vyrobených plazmovým obráběním  
 Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose x: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 50,2749 mm do 50,3717 mm na základě  $n=10$  měření.



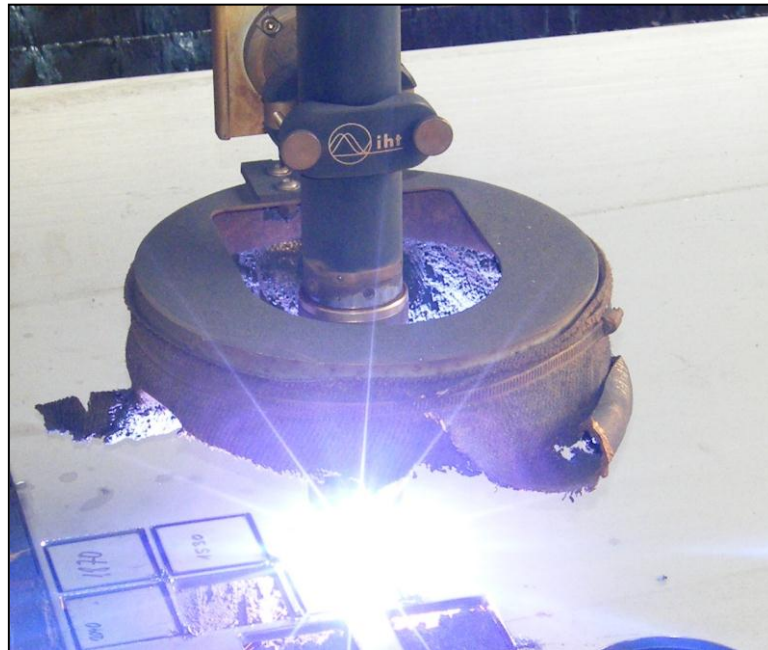
Obr. 95. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose y vyrobených plazmovým obráběním  
 Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose y: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 50,2234 mm do 50,3238 mm na základě  $n=10$  měření.



Obr. 96. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose y vyrobených plazmovým obráběním  
**Závěr:** I u obrábění plazmovým paprskem se projevil podobný výsledek jako u obrábění laserovým paprskem. Znovu vidíme, že se snižující se řeznou rychlostí roste množství tepla, které přechází do obrobku a zvyšuje se tak množství odebraného materiálu.

## 7.2 Vyhodnocení rozměrové přesnosti u oceli 17 349

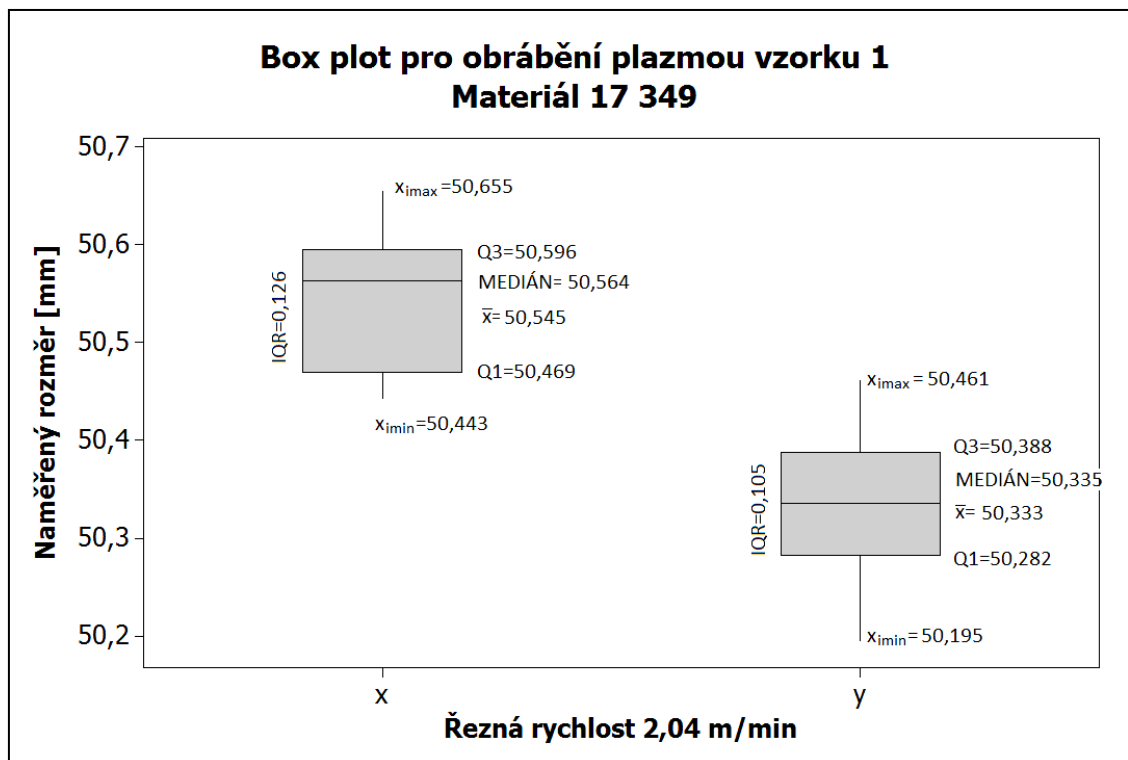
Proměnným technologickým parametrem byla řezná rychlost, která se pohybovala od 0,85 m/min do 2,04 m/min. Pálící proud byl 130 A, řezný tlak 6,3 bar. Plazmový plyn byl argon (Ar) a vodík (H<sub>2</sub>), ochranný plyn byl dusík (N<sub>2</sub>), zapalovací plyn byl argon (Ar).



*Obr. 97. Obrábění oceli 17 349 plazmovým paprskem*

Tab. 29. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

PLAZMA vzorek 1 - 17 349 - 2,04m/min							
1.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	50,576	50,5447	0,0313	0,00098	0,0723	0,1431
	2	50,655		0,1103	0,01217		
	3	50,589		0,0443	0,00196		
	4	50,443		-0,1017	0,01034		
	5	50,586		0,0413	0,00171		
	6	50,616		0,0713	0,00508		
	7	50,456		-0,0887	0,00787		
	8	50,474		-0,0707	0,00500		
	9	50,551		0,0063	0,00004		
	10	50,501		-0,0437	0,00191		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	50,461	50,3326	0,1284	0,01649	0,0821	0,1632
	12	50,303		-0,0296	0,00088		
	13	50,195		-0,1376	0,01893		
	14	50,357		0,0244	0,00060		
	15	50,406		0,0734	0,00539		
	16	50,382		0,0494	0,00244		
	17	50,221		-0,1116	0,01245		
	18	50,305		-0,0276	0,00076		
	19	50,382		0,0494	0,00244		
	20	50,314		-0,0186	0,00035		

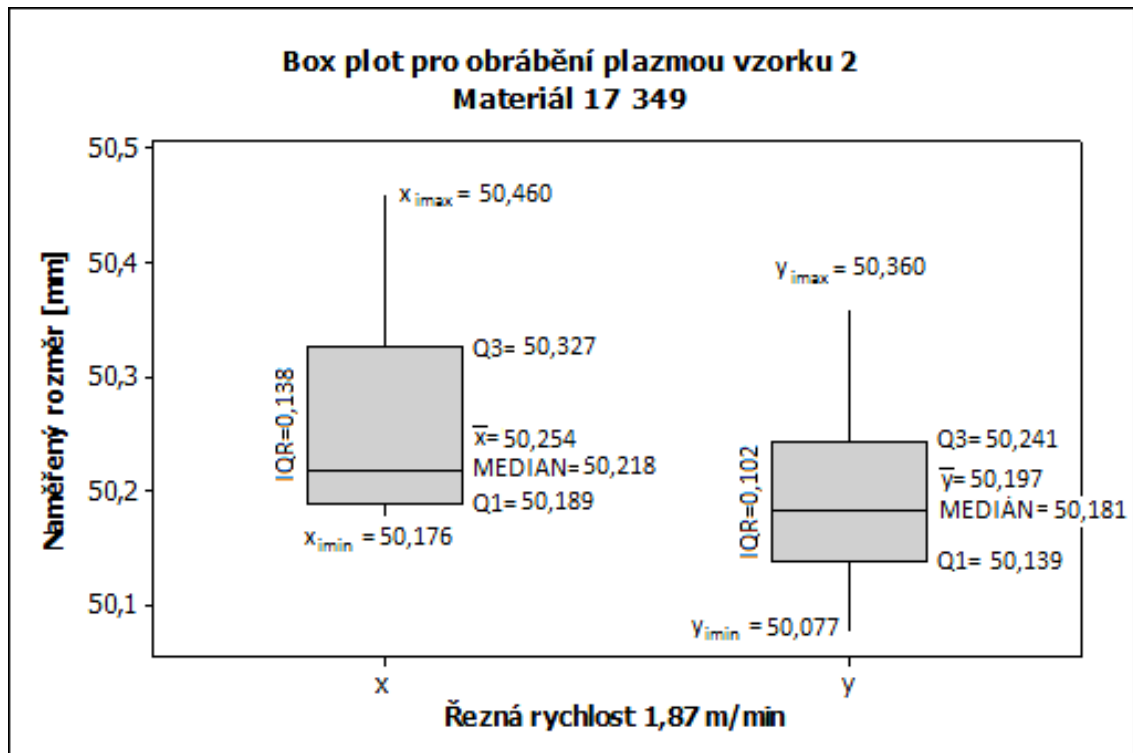


Obr. 98. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 1 - materiál 17 349



Tab. 30. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

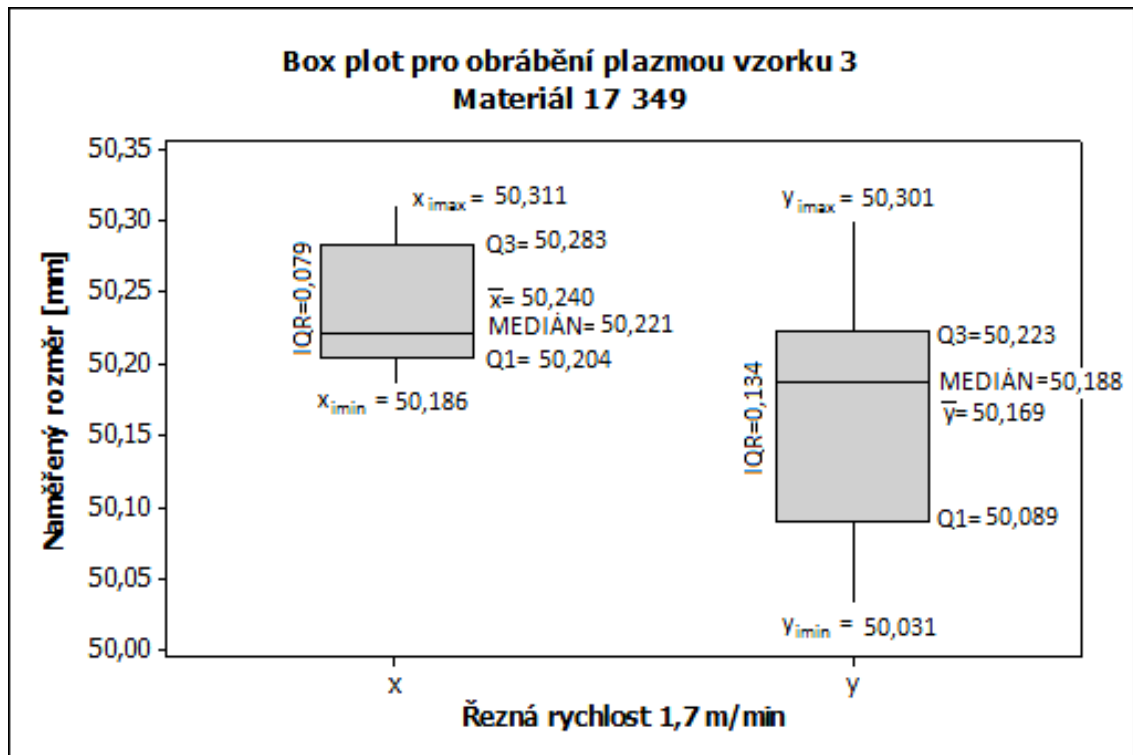
PLAZMA vzorek 2 - 17 349 - 1,87m/min							
2.	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	50,21	50,2540	-0,0440	0,00194	0,0916	0,1822
	2	50,202		-0,0520	0,00270		
	3	50,226		-0,0280	0,00078		
	4	50,176		-0,0780	0,00608		
	5	50,176		-0,0780	0,00608		
	6	50,46		0,2060	0,04244		
	7	50,335		0,0810	0,00656		
	8	50,238		-0,0160	0,00026		
	9	50,324		0,0700	0,00490		
	10	50,193		-0,0610	0,00372		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	50,205	50,1972	0,0078	0,00006	0,0914	0,1821
	12	50,148		-0,0492	0,00242		
	13	50,185		-0,0122	0,00015		
	14	50,172		-0,0252	0,00064		
	15	50,077		-0,1202	0,01445		
	16	50,18		-0,0172	0,00030		
	17	50,35		0,1528	0,02335		
	18	50,113		-0,0842	0,00709		
	19	50,36		0,1628	0,02650		
	20	50,182		-0,0152	0,00023		



Obr. 99. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 2 - materiál 17 349

Tab. 31. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

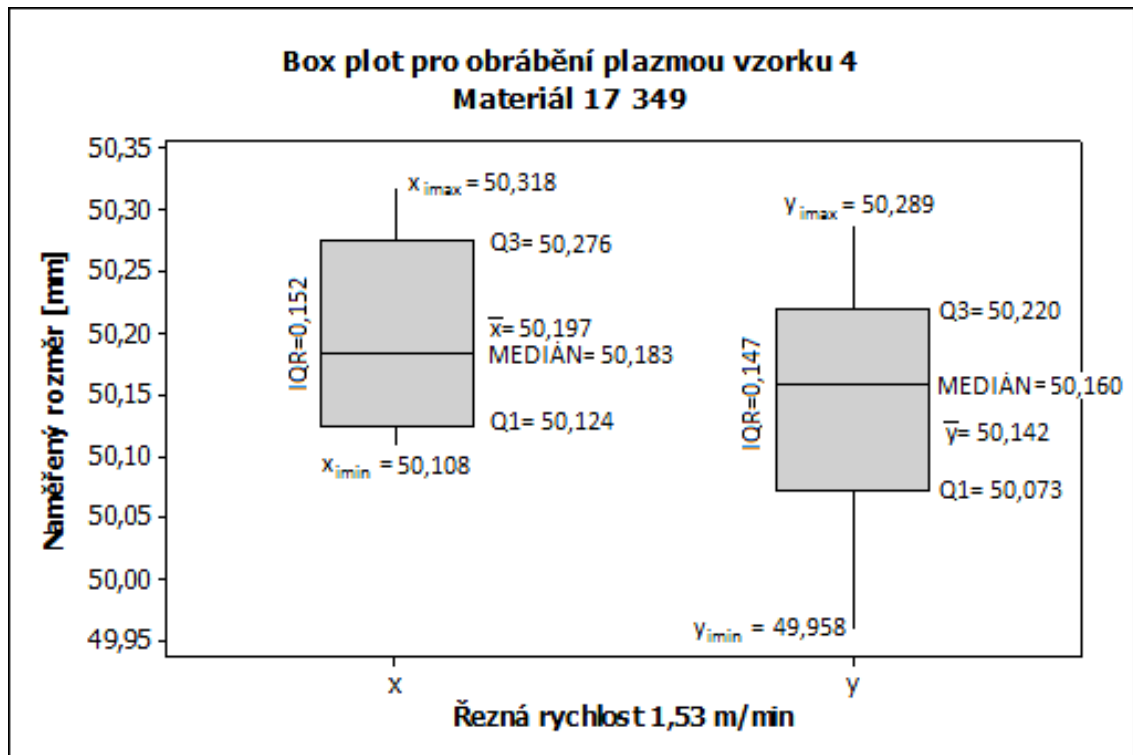
3. PLAZMA vzorek 3 - 17 349 - 1,7m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	50,205	50,2398	-0,0348	0,00121	0,0453	0,0902
	2	50,221		-0,0188	0,00035		
	3	50,306		0,0662	0,00438		
	4	50,311		0,0712	0,00507		
	5	50,221		-0,0188	0,00035		
	6	50,263		0,0232	0,00054		
	7	50,275		0,0352	0,00124		
	8	50,201		-0,0388	0,00151		
	9	50,209		-0,0308	0,00095		
	10	50,186		-0,0538	0,00289		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	50,169	50,1692	-0,0002	0,00000	0,0855	0,1704
	12	50,207		0,0378	0,00143		
	13	50,162		-0,0072	0,00005		
	14	50,301		0,1318	0,01737		
	15	50,209		0,0398	0,00158		
	16	50,031		-0,1382	0,01910		
	17	50,244		0,0748	0,00560		
	18	50,051		-0,1182	0,01397		
	19	50,216		0,0468	0,00219		
	20	50,102		-0,0672	0,00452		



Obr. 100. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 3 - materiál 17 349

Tab. 32. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

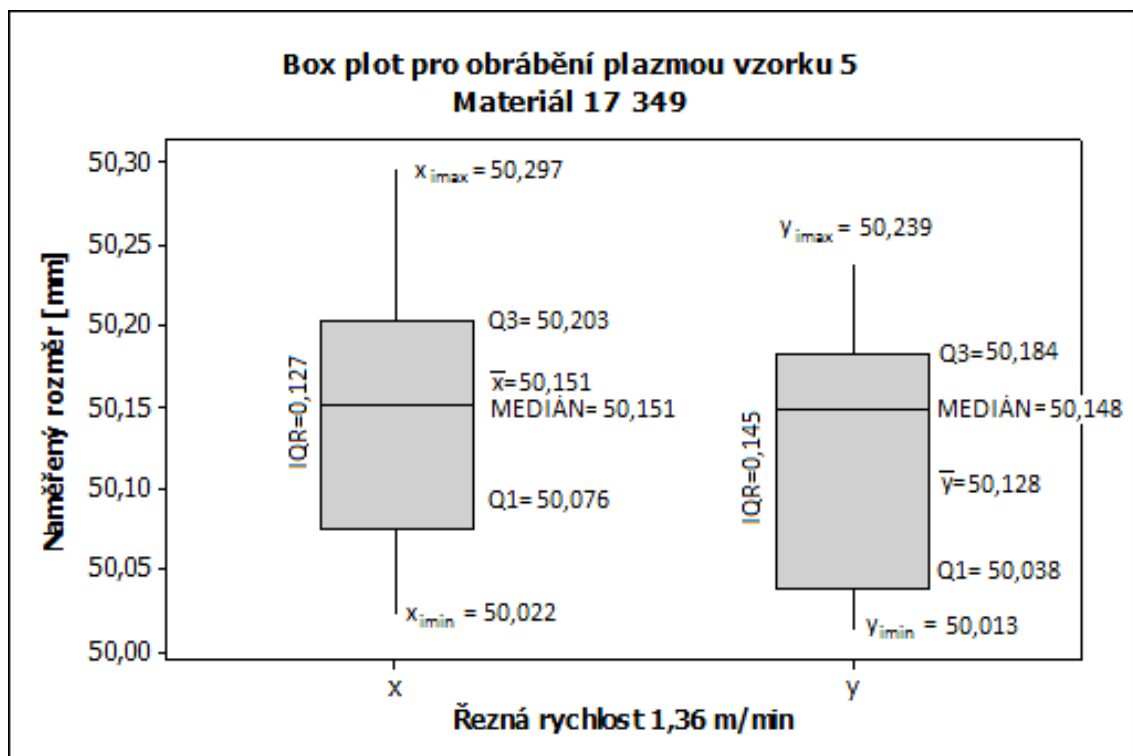
4. PLAZMA vzorek 4 - 17 349 - 1,53m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	50,168	50,1968	-0,0288	0,00083	0,0757	0,1507
	2	50,151		-0,0458	0,00210		
	3	50,126		-0,0708	0,00501		
	4	50,216		0,0192	0,00037		
	5	50,199		0,0022	0,00000		
	6	50,292		0,0952	0,00906		
	7	50,108		-0,0888	0,00789		
	8	50,318		0,1212	0,01469		
	9	50,119		-0,0778	0,00605		
	10	50,271		0,0742	0,00551		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	50,277	50,1418	0,1352	0,01828	0,1086	0,2166
	12	50,112		-0,0298	0,00089		
	13	50,167		0,0252	0,00064		
	14	50,201		0,0592	0,00350		
	15	50,152		0,0102	0,00010		
	16	50,289		0,1472	0,02167		
	17	50,175		0,0332	0,00110		
	18	49,985		-0,1568	0,02459		
	19	50,102		-0,0398	0,00158		
	20	49,958		-0,1838	0,03378		



Obr. 101. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 4 - materiál 17 349

Tab. 33. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

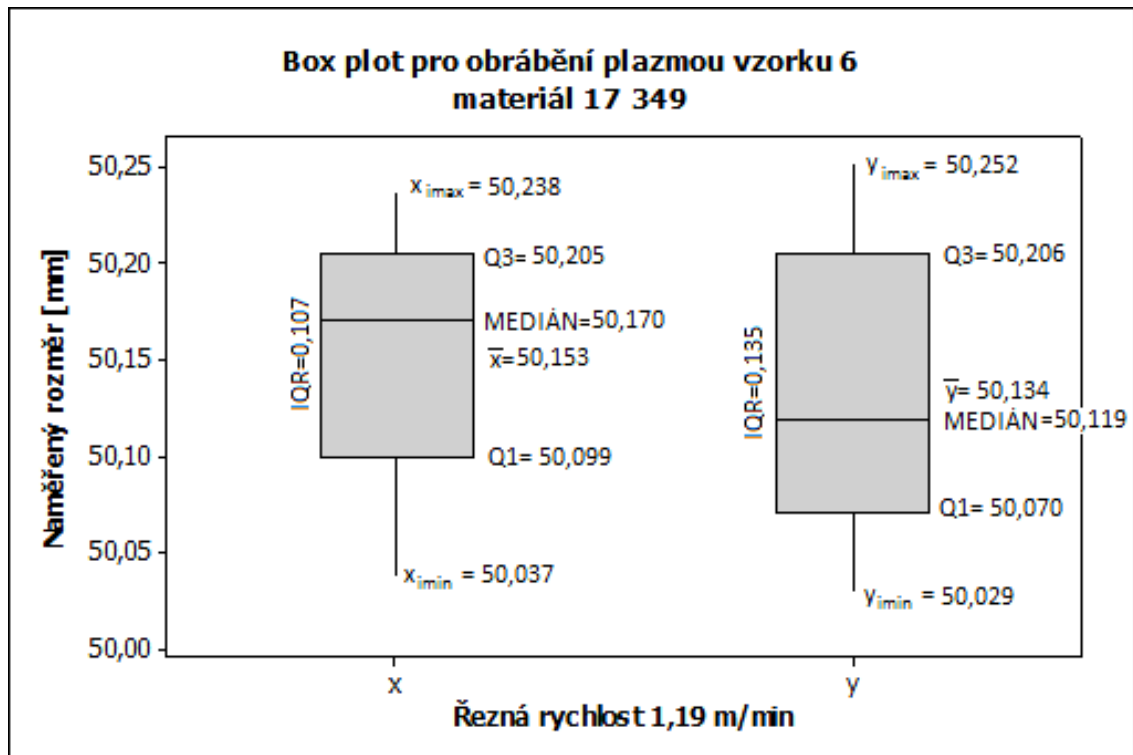
5. PLAZMA vzorek 5 - 17 349 - 1,36m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	50,251	50,1510	0,1000	0,01000	0,0850	0,1696
	2	50,297		0,1460	0,02132		
	3	50,187		0,0360	0,00130		
	4	50,14		-0,0110	0,00012		
	5	50,139		-0,0120	0,00014		
	6	50,163		0,0120	0,00014		
	7	50,049		-0,1020	0,01040		
	8	50,177		0,0260	0,00068		
	9	50,022		-0,1290	0,01664		
	10	50,085		-0,0660	0,00436		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	50,178	50,1278	0,0502	0,00252	0,0791	0,1578
	12	50,239		0,1112	0,01237		
	13	50,019		-0,1088	0,01184		
	14	50,116		-0,0118	0,00014		
	15	50,118		-0,0098	0,00010		
	16	50,181		0,0532	0,00283		
	17	50,191		0,0632	0,00399		
	18	50,013		-0,1148	0,01318		
	19	50,178		0,0502	0,00252		
	20	50,045		-0,0828	0,00686		



Obr. 102. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 5 - materiál 17 349

Tab. 34. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

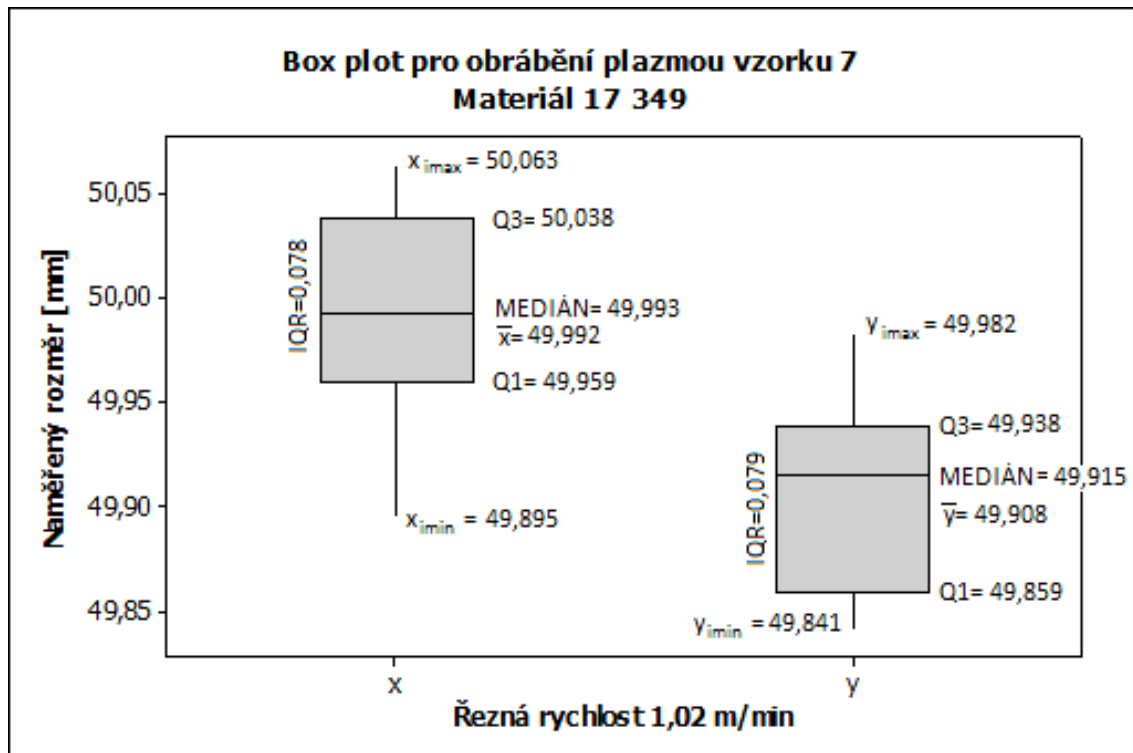
6. PLAZMA vzorek 6 - 17 349 -1,19m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	50,205	50,1530	0,0520	0,00270	0,0644	0,1284
	2	50,107		-0,0460	0,00212		
	3	50,238		0,0850	0,00723		
	4	50,152		-0,0010	0,00000		
	5	50,188		0,0350	0,00123		
	6	50,135		-0,0180	0,00032		
	7	50,206		0,0530	0,00281		
	8	50,074		-0,0790	0,00624		
	9	50,037		-0,1160	0,01346		
	10	50,188		0,0350	0,00123		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	50,063	50,1338	-0,0708	0,00501	0,0742	0,1480
	12	50,103		-0,0308	0,00095		
	13	50,201		0,0672	0,00452		
	14	50,252		0,1182	0,01397		
	15	50,029		-0,1048	0,01098		
	16	50,219		0,0852	0,00726		
	17	50,092		-0,0418	0,00175		
	18	50,135		0,0012	0,00000		
	19	50,171		0,0372	0,00138		
	20	50,073		-0,0608	0,00370		



Obr. 103. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 6 - materiál 17 349

Tab. 35. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

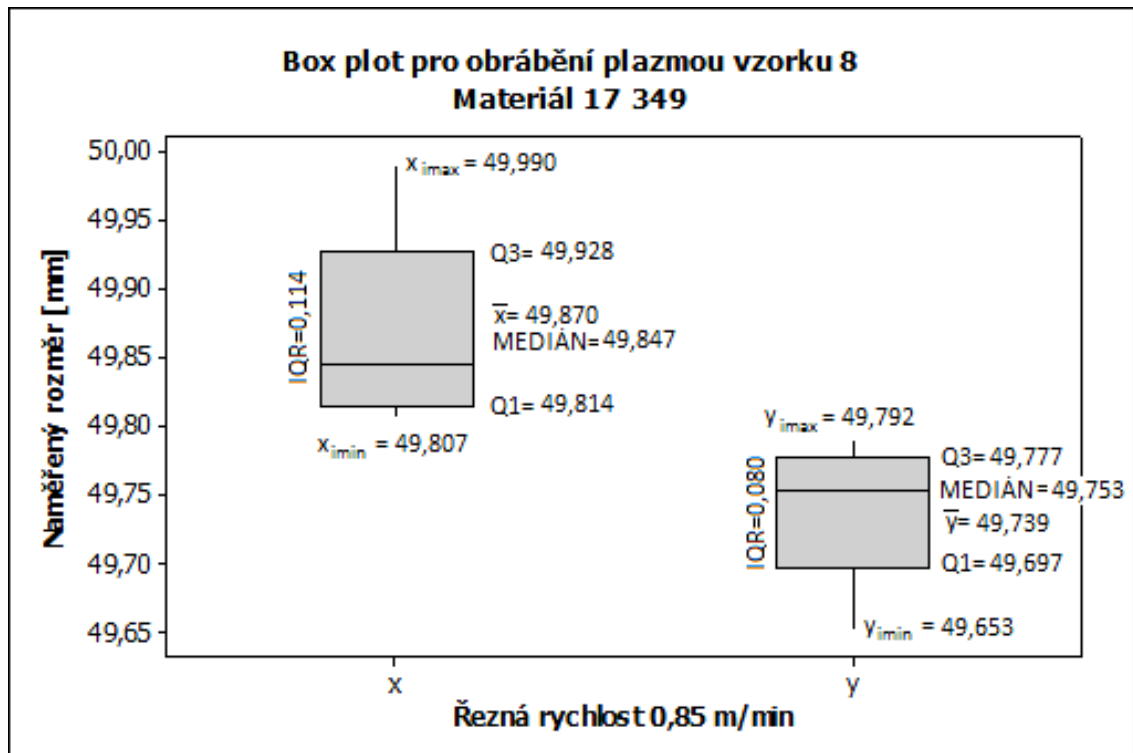
7. PLAZMA vzorek 7 - 17 349 -1,02m/min							
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
Měření v ose x	1	49,969	49,9915	-0,0225	0,00051	0,0515	0,1030
	2	50,045		0,0535	0,00286		
	3	50,007		0,0155	0,00024		
	4	50,016		0,0245	0,00060		
	5	50,035		0,0435	0,00189		
	6	49,978		-0,0135	0,00018		
	7	49,942		-0,0495	0,00245		
	8	49,965		-0,0265	0,00070		
	9	50,063		0,0715	0,00511		
	10	49,895		-0,0965	0,00931		
	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
Měření v ose y	11	49,92	49,9081	0,0119	0,00014	0,0469	0,0940
	12	49,926		0,0179	0,00032		
	13	49,973		0,0649	0,00421		
	14	49,915		0,0069	0,00005		
	15	49,892		-0,0161	0,00026		
	16	49,982		0,0739	0,00546		
	17	49,914		0,0059	0,00003		
	18	49,841		-0,0671	0,00450		
	19	49,859		-0,0491	0,00241		
	20	49,859		-0,0491	0,00241		



Obr. 104. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 7 - materiál 17 349

Tab. 36. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 17 349 – obrábění plazmou

8. PLAZMA vzorek 8 - 17 349 - 0,85m/min							
Měření v ose x	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{x}$ [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	$V_x$ [%]
	1	49,901	49,8702	0,0308	0,00095	0,0645	0,1292
	2	49,9904		0,1202	0,01444		
	3	49,825		-0,0452	0,00205		
	4	49,814		-0,0562	0,00316		
	5	49,868		-0,0022	0,00001		
	6	49,814		-0,0562	0,00316		
	7	49,807		-0,0632	0,00400		
	8	49,822		-0,0482	0,00233		
	9	49,926		0,0558	0,00311		
	10	49,935		0,0648	0,00419		
Měření v ose y	Č. měření	Hodnota [mm]	$\bar{y}$ [mm]	$y_i - \bar{y}$ [mm]	$(y_i - \bar{y})^2$ [mm]	s [mm]	$V_y$ [%]
	11	49,658	49,7391	-0,0811	0,00658	0,0494	0,0993
	12	49,754		0,0149	0,00022		
	13	49,792		0,0529	0,00280		
	14	49,748		0,0089	0,00008		
	15	49,752		0,0129	0,00017		
	16	49,768		0,0289	0,00084		
	17	49,78		0,0409	0,00167		
	18	49,653		-0,0861	0,00741		
	19	49,71		-0,0291	0,00085		
	20	49,776		0,0369	0,00136		



Obr. 105. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 8 - materiál 17 349

**Přehled výsledků po obrábění laserem materiálu 17 349 v ose x:**

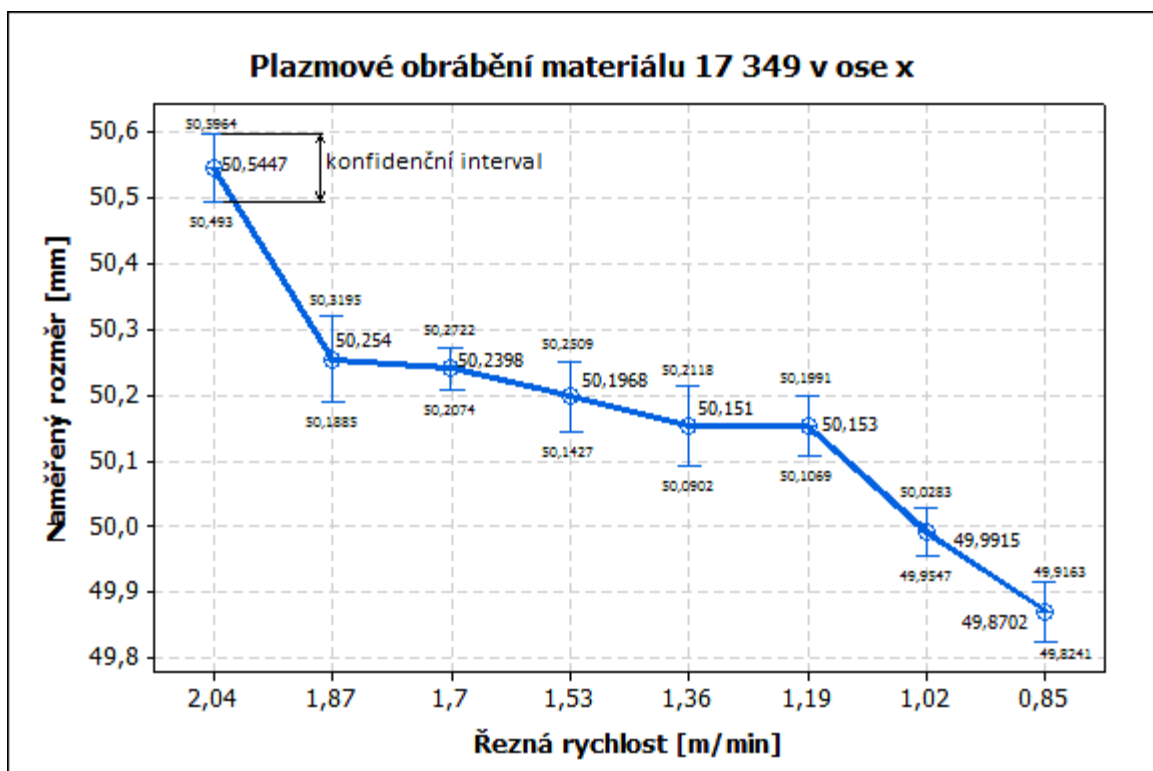
Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
2,04	50,545	0,0723	0,14	50,443	50,469	50,564	50,596	50,655	0,126
1,87	50,254	0,0916	0,18	50,176	50,189	50,218	50,327	50,460	0,138
1,7	50,240	0,0453	0,09	50,186	50,204	50,221	50,283	50,311	0,079
1,53	50,197	0,0757	0,15	50,108	50,124	50,183	50,276	50,318	0,152
1,36	50,151	0,0850	0,17	50,022	50,076	50,151	50,203	50,297	0,127
1,19	50,153	0,0644	0,13	50,037	50,099	50,170	50,205	50,238	0,107
1,02	49,992	0,0515	0,10	49,895	49,959	49,993	50,038	50,063	0,078
0,85	49,870	0,0645	0,13	49,807	49,814	49,847	49,928	49,990	0,114

**Přehled výsledků po obrábění laserem materiálu 17 349 v ose x:**

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	IQR
2,04	50,333	0,0821	0,16	50,195	50,282	50,335	50,388	50,461	0,105
1,87	50,197	0,0914	0,18	50,077	50,139	50,181	50,241	50,360	0,102
1,7	50,169	0,0855	0,17	50,031	50,089	50,188	50,223	50,301	0,134
1,53	50,142	0,109	0,22	49,958	50,073	50,160	50,220	50,289	0,147
1,36	50,128	0,0791	0,16	50,013	50,038	50,148	50,184	50,239	0,145
1,19	50,134	0,0742	0,15	50,029	50,070	50,119	50,206	50,252	0,135
1,02	49,908	0,0469	0,09	49,841	49,859	49,915	49,938	49,982	0,079
0,85	49,739	0,0494	0,10	49,653	49,697	49,753	49,777	49,792	0,080

Kde:

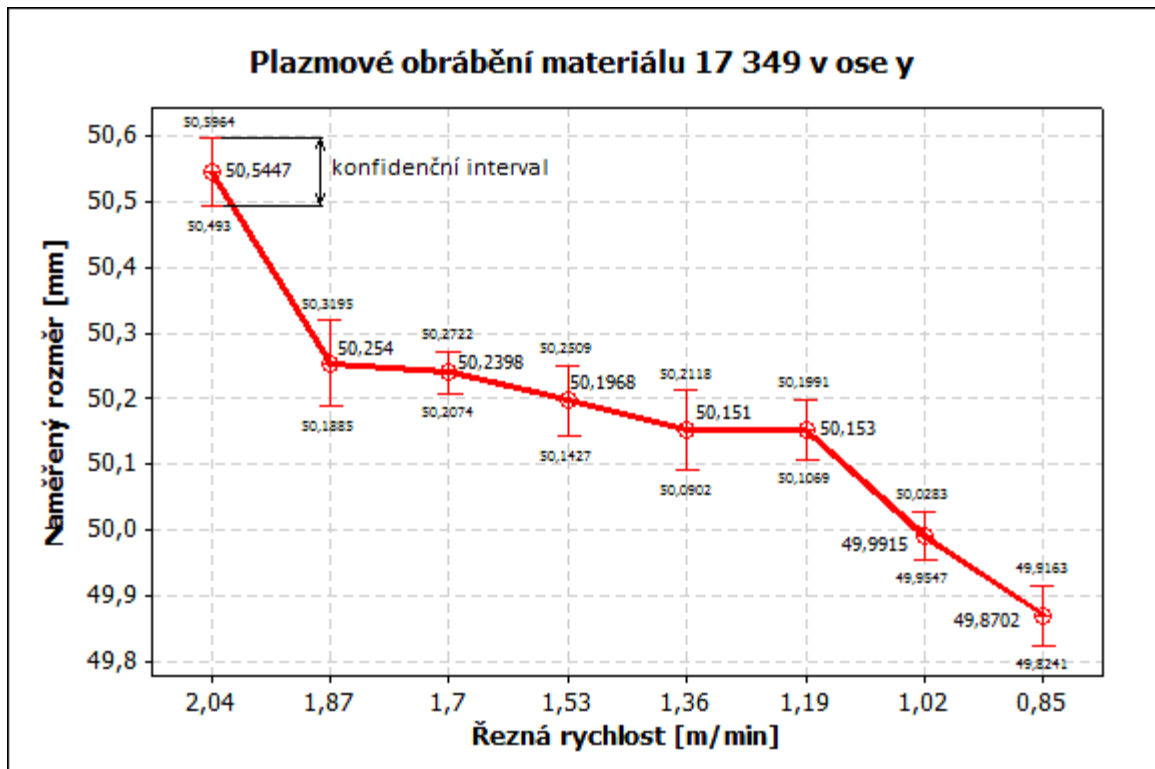
Variable – proměnná (řezná rychlost [m/min]), Mean – aritmetický průměr, StDev – směrodatná odchylka, CoefVar – Variační koeficient, Minimum – nejnižší naměřená hodnota, Q1 – první kvartil, Median – Medián, Q3 – třetí kvartil, Maximum – nejvyšší naměřená hodnota, IQR – rozdíl mezi prvním a třetím kvartilem



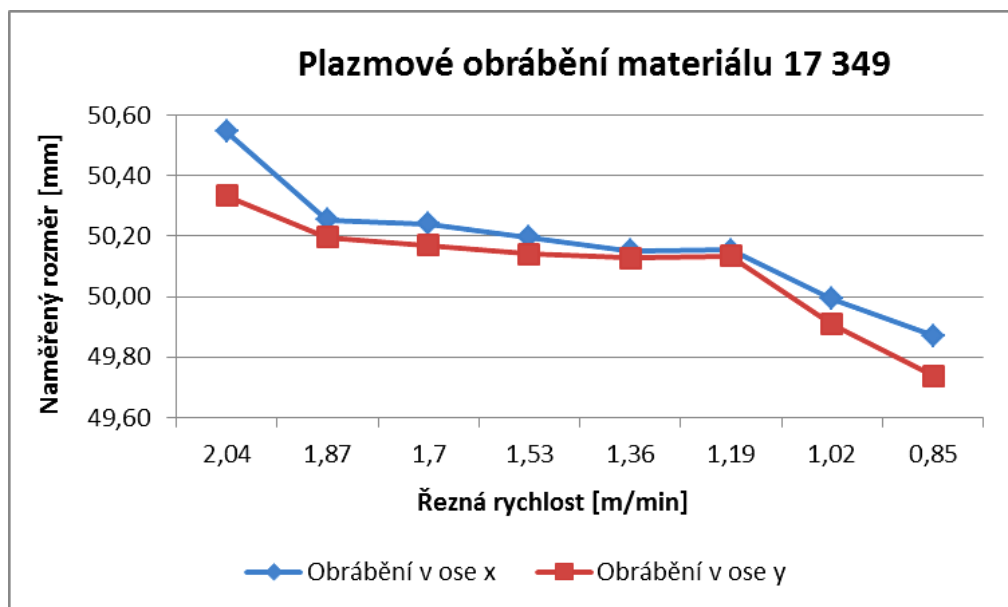
Obr. 106. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose x vyrobených plazmovým obráběním

Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose x: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 50,493 mm do 50,5964 mm na základě  $n=10$  měření.





Obr. 107. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose y vyrobených plazmovým obráběním  
 Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose y: S pravděpodobností  $1-\alpha=0,95$ , neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru  $\mu$ , leží v konfidenčním intervalu od 50,4930 mm do 50,5964 mm na základě  $n=10$  měření.

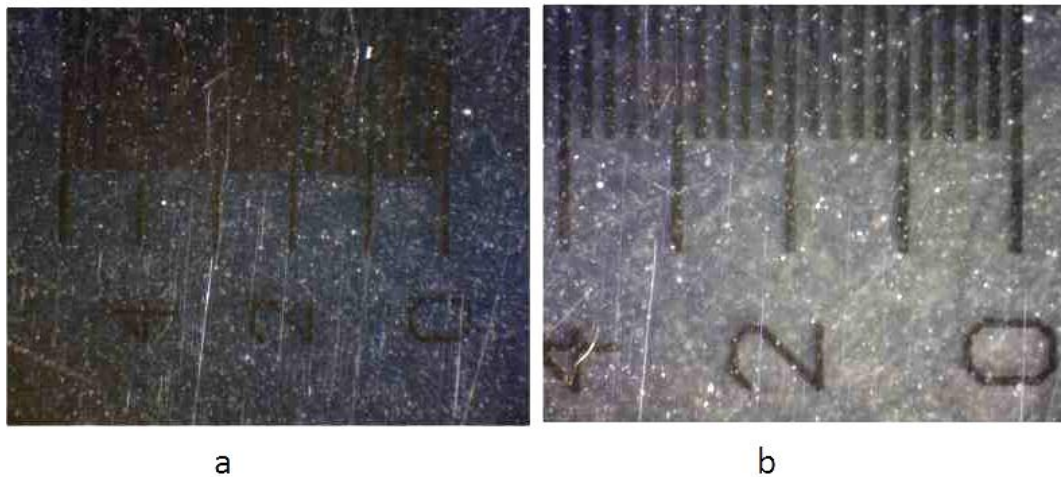


Obr. 108. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 vyrobených plazmovým obráběním

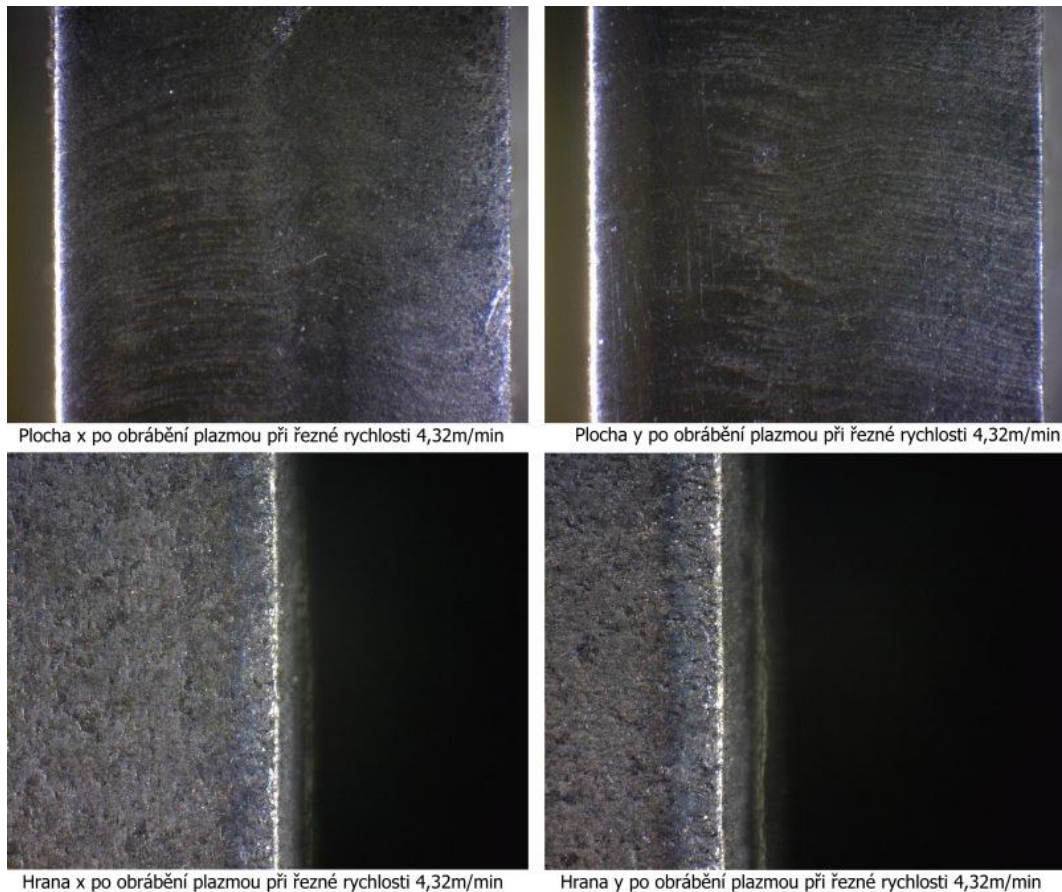
**Závěr:** I poslední vyhodnocování potvrdilo, že se snižující se řeznou rychlostí stoupá množství odebíraného materiálu. To je způsobeno delším časovým působením plazmového paprsku na obrobek.

### 7.3 Vyhodnocení kvality obráběného povrchu u oceli 11 375

Každý vzorek byl nasnímán univerzálním mikroskopem. Snímány byly plochy po obrábění v ose x i v ose y. Zvětšení řezných ploch bylo 10x. Dále pak byly snímány hrany vzorků po obrábění v ose x a y. Zvětšení bylo 15x.



Obr. 68. Snímek kalibračního pásku a) zvětšení 10x b) zvětšení 15x



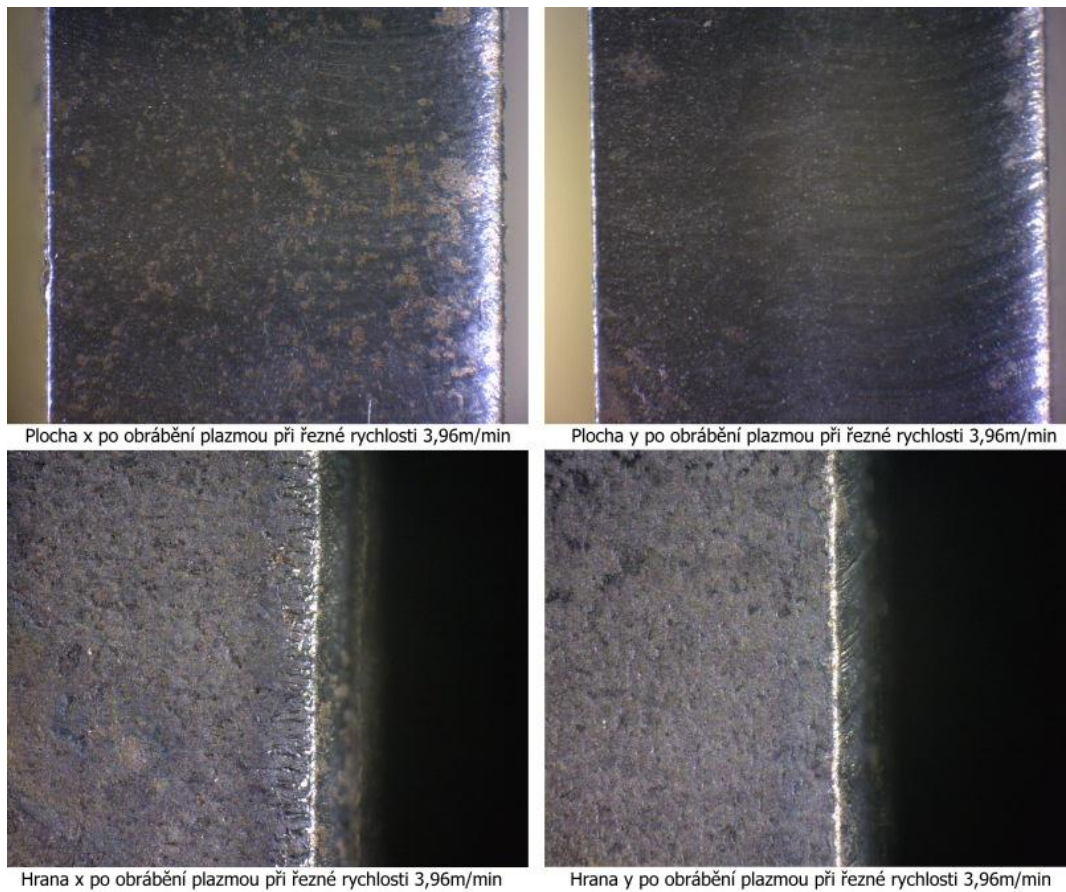
Plocha x po obrábění plazmou při řezné rychlosti 4,32m/min

Plocha y po obrábění plazmou při řezné rychlosti 4,32m/min

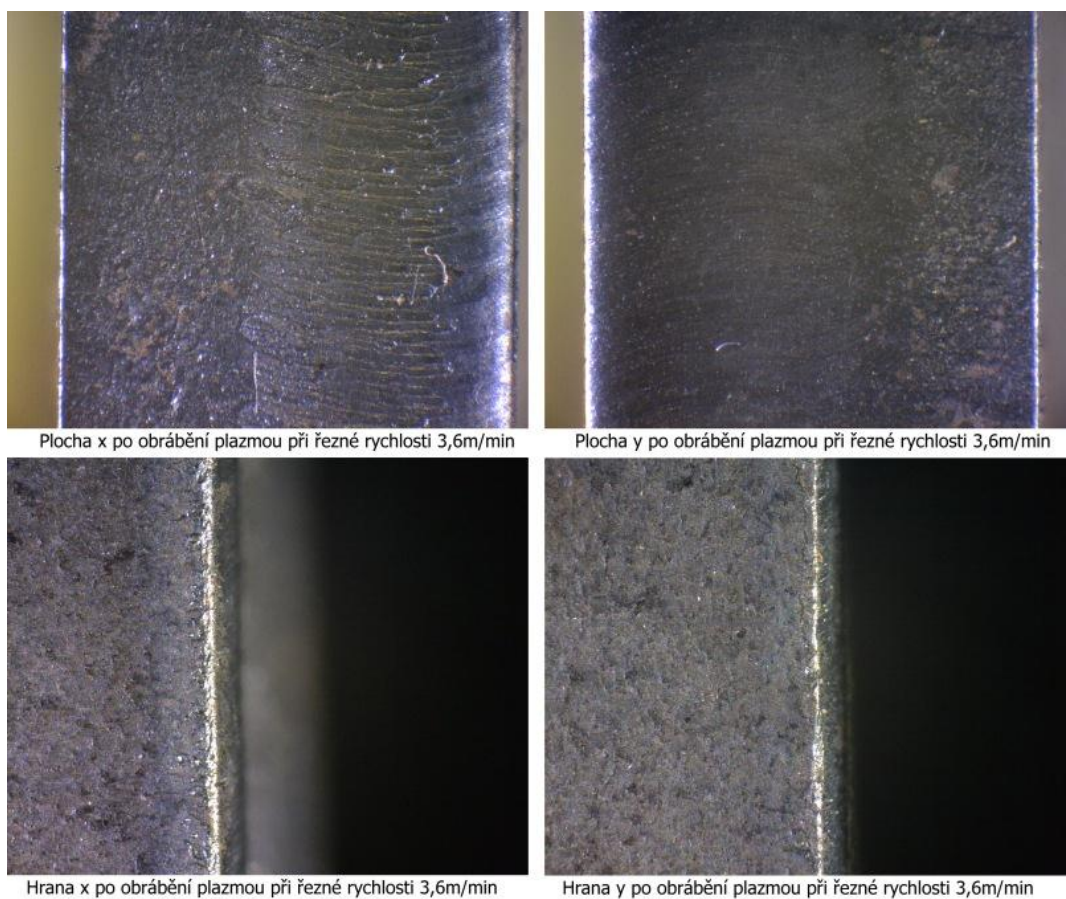
Hrana x po obrábění plazmou při řezné rychlosti 4,32m/min

Hrana y po obrábění plazmou při řezné rychlosti 4,32m/min

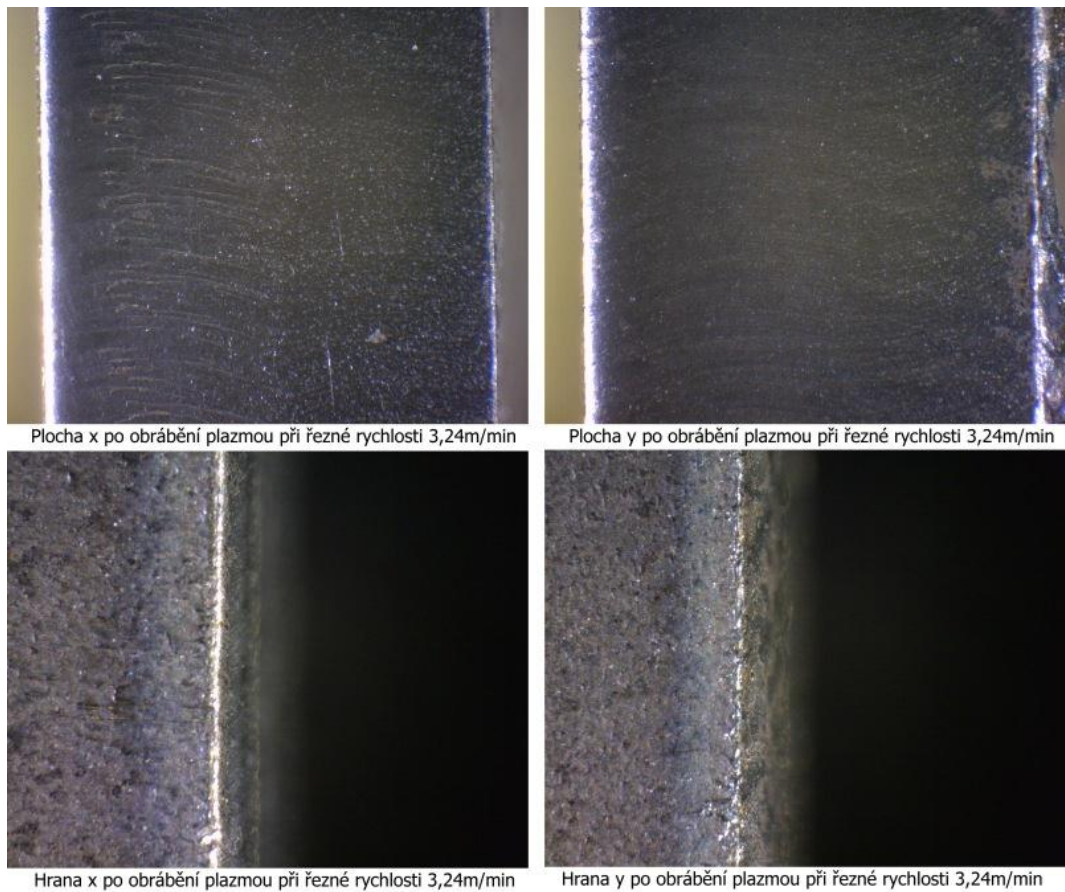
Obr. 109. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného plazmou - materiál 11 375



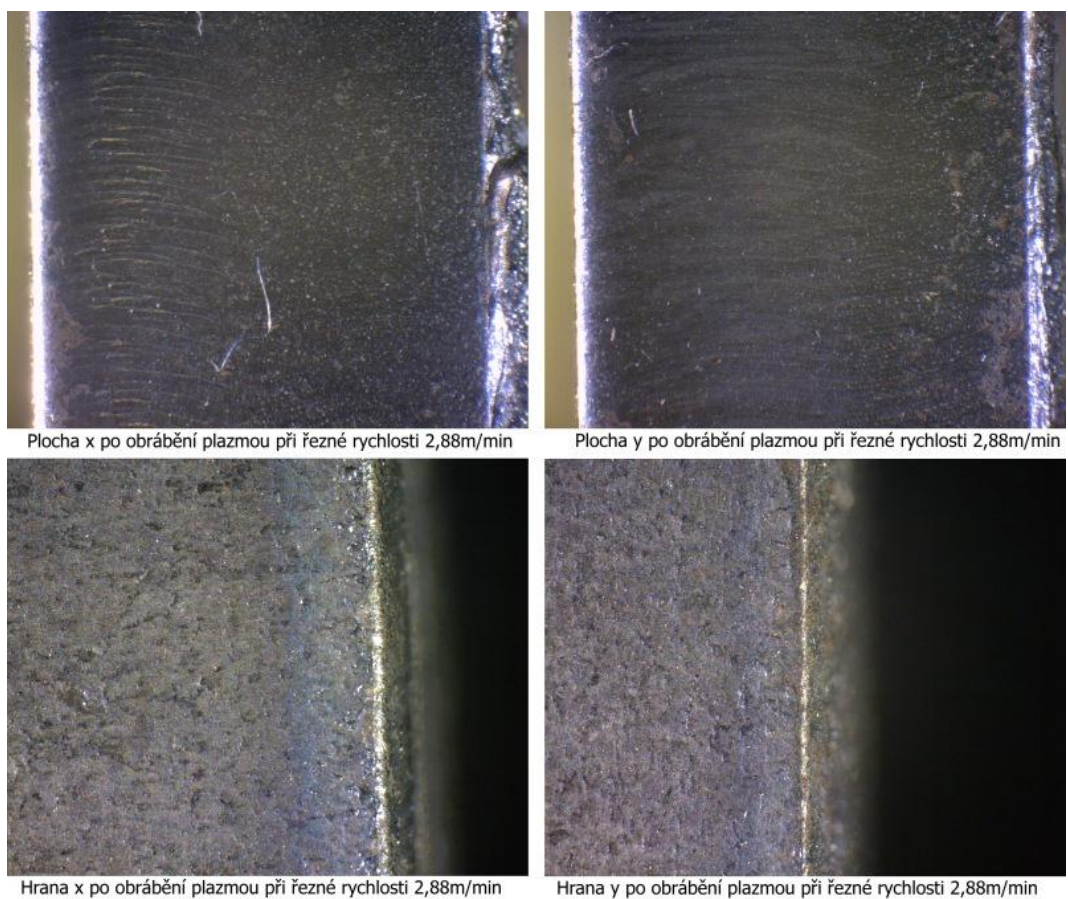
*Obr. 110. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného plazmou - materiál 11 375*



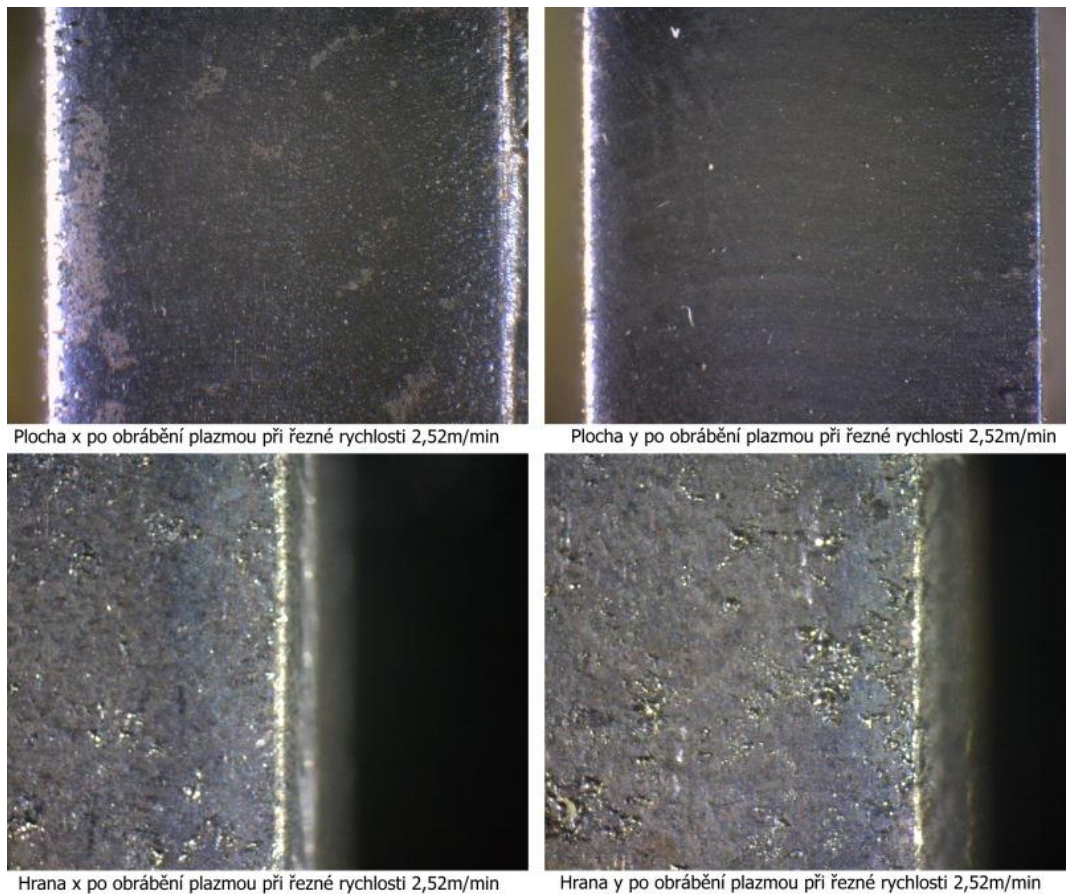
*Obr. 111. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného plazmou - materiál 11 375*



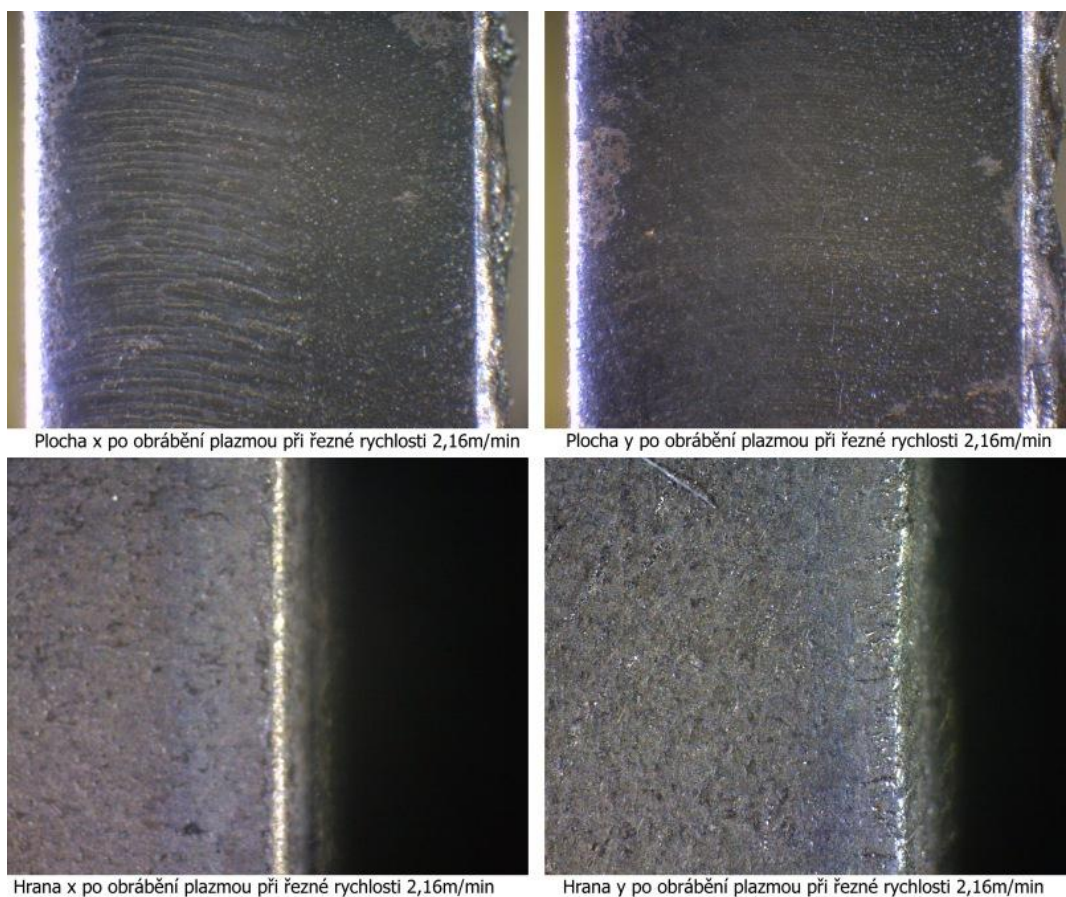
*Obr. 112. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného plazmou - materiál 11 375*



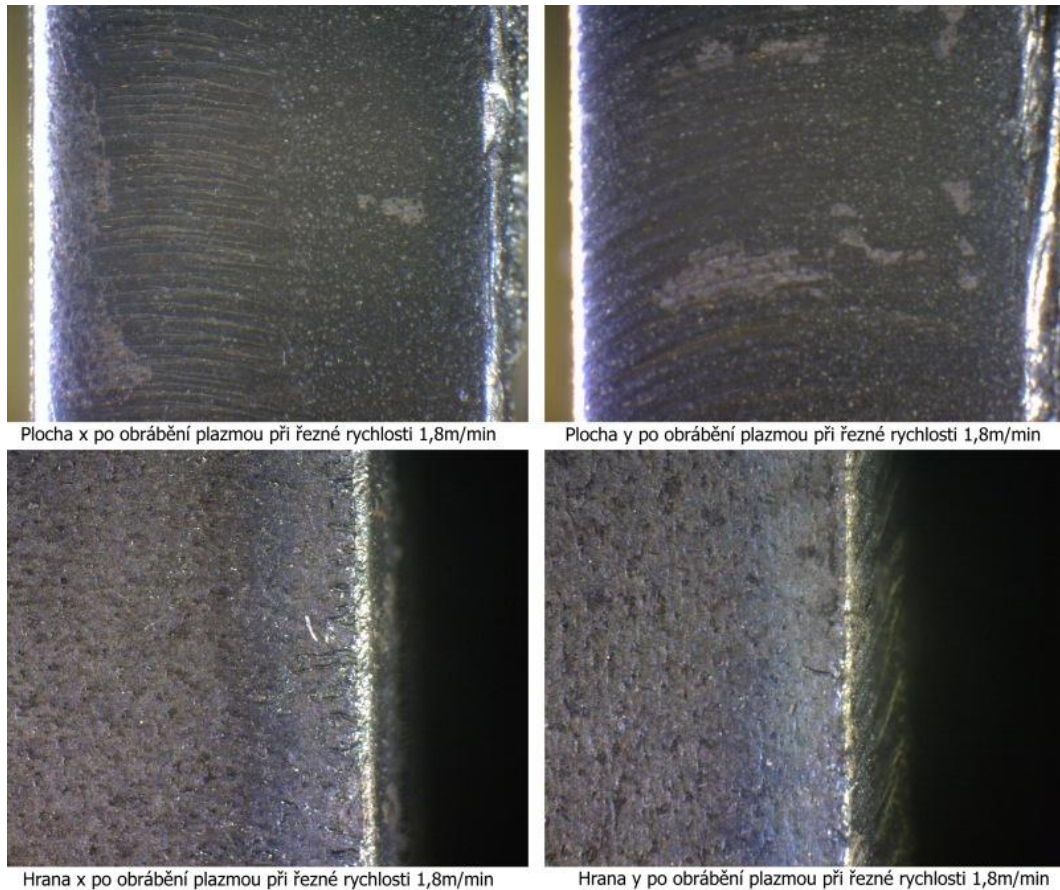
*Obr. 113. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného plazmou - materiál 11 375*



*Obr. 114. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného plazmou - materiál 11 375*



*Obr. 115. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného plazmou - materiál 11 375*



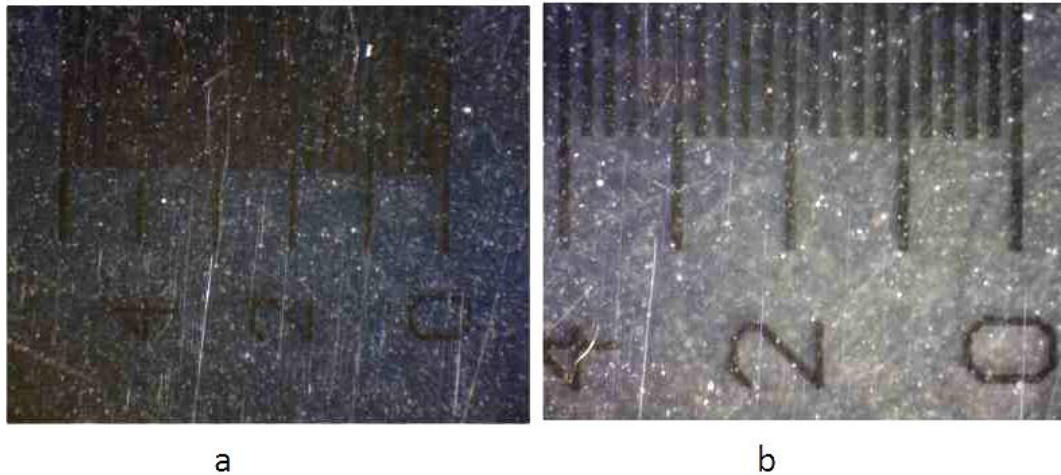
*Obr. 116. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného plazmou - materiál 11 375*

### **Závěr:**

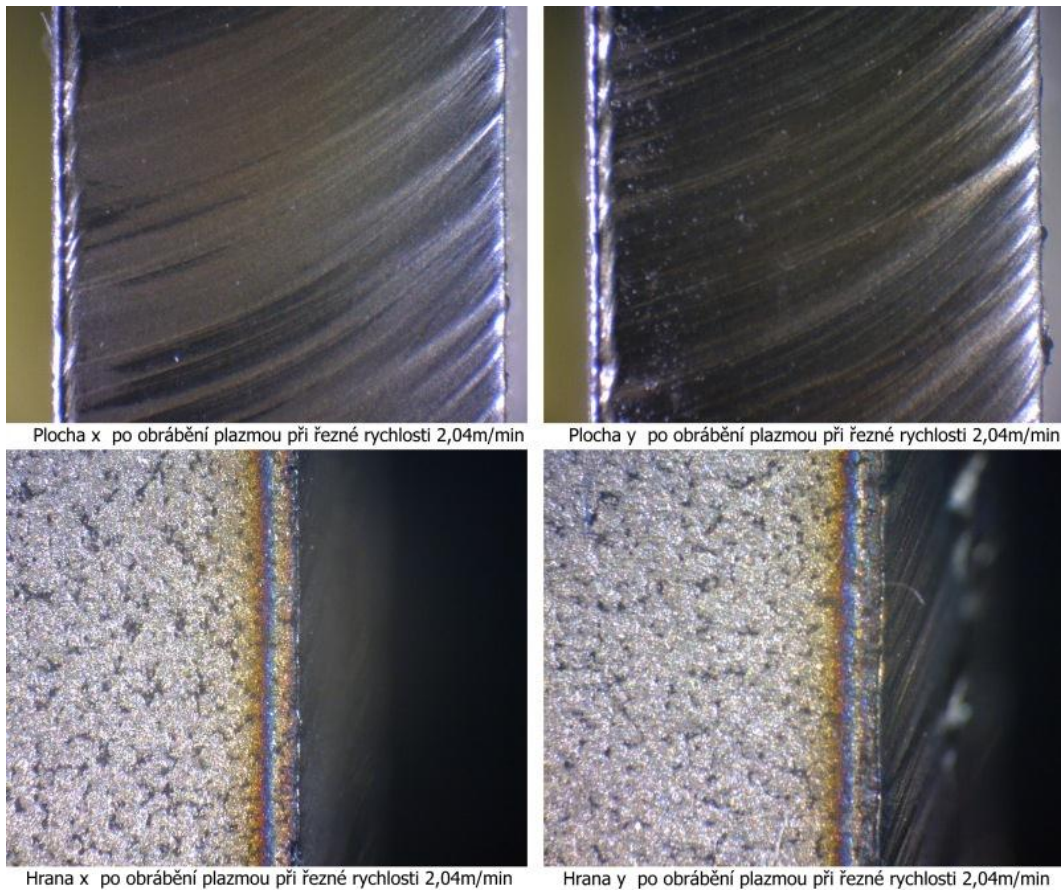
Plocha materiálu 11 375 obrobena plazmovou technologií je velmi jemná, bez výrazných stop po plazmovém paprsku. Se snižující se rychlostí se zvětšuje množství zatuhlého materiálu na spodní části řezné hrany. Je to velmi nežádoucí jev, který je nutné po obrábění plazmovým paprskem odstraňovat dalšími technologickými operacemi. Při obrábění materiálu 11 375 plazmovým paprskem se také projevilo zešikmení řezné plochy. Pro optimalizaci procesu řezání plazmovým paprskem z hlediska optického hodnocení kvality obrobku bychom zvolili řeznou rychlost 3,96 m/min, což by představovalo 10% zvýšení oproti defaultnímu nastavení plazmového obráběcího zařízení pro konstrukční ocel tloušťky 6 mm.

#### 7.4 Vyhodnocení kvality obráběného povrchu u oceli 17 349

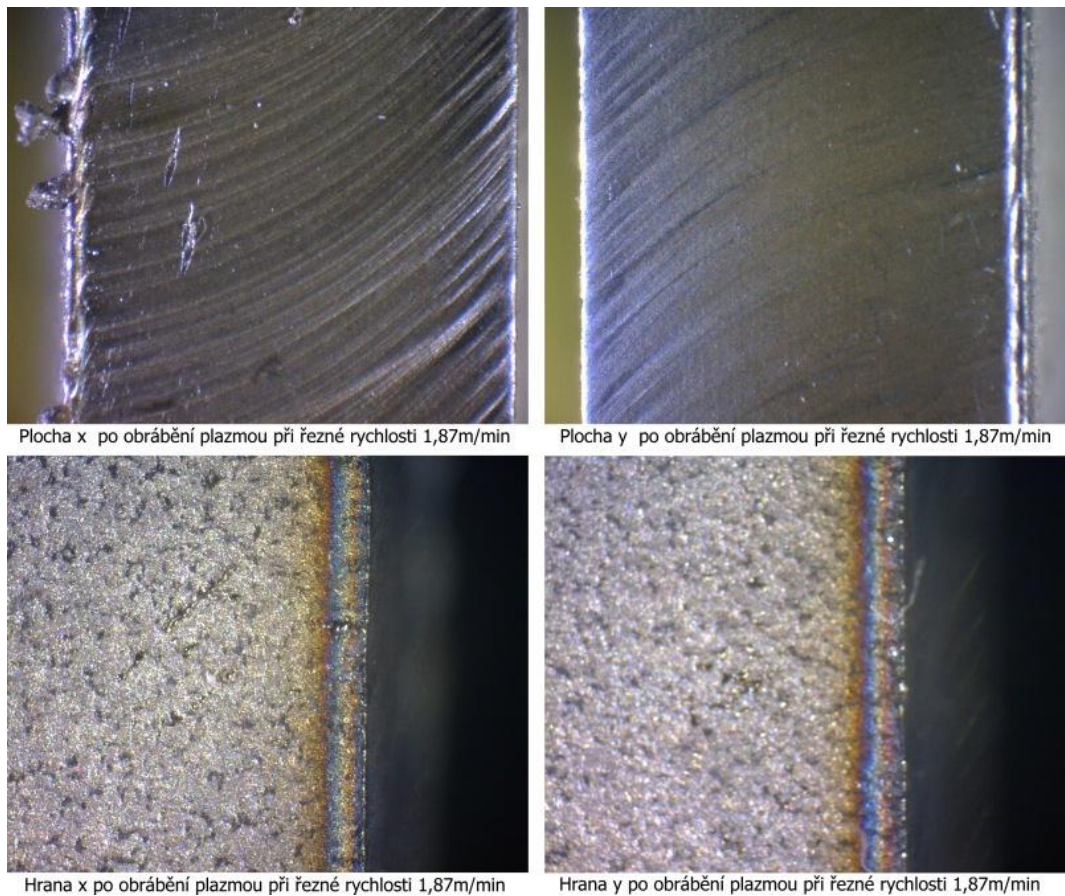
Každý vzorek byl nasnímán univerzálním mikroskopem. Snímány byly plochy po obrábění v ose x i v ose y. Zvětšení řezných ploch bylo 10x. Dále pak byly snímány hrany vzorků po obrábění v ose x a y. Zvětšení bylo 15x.



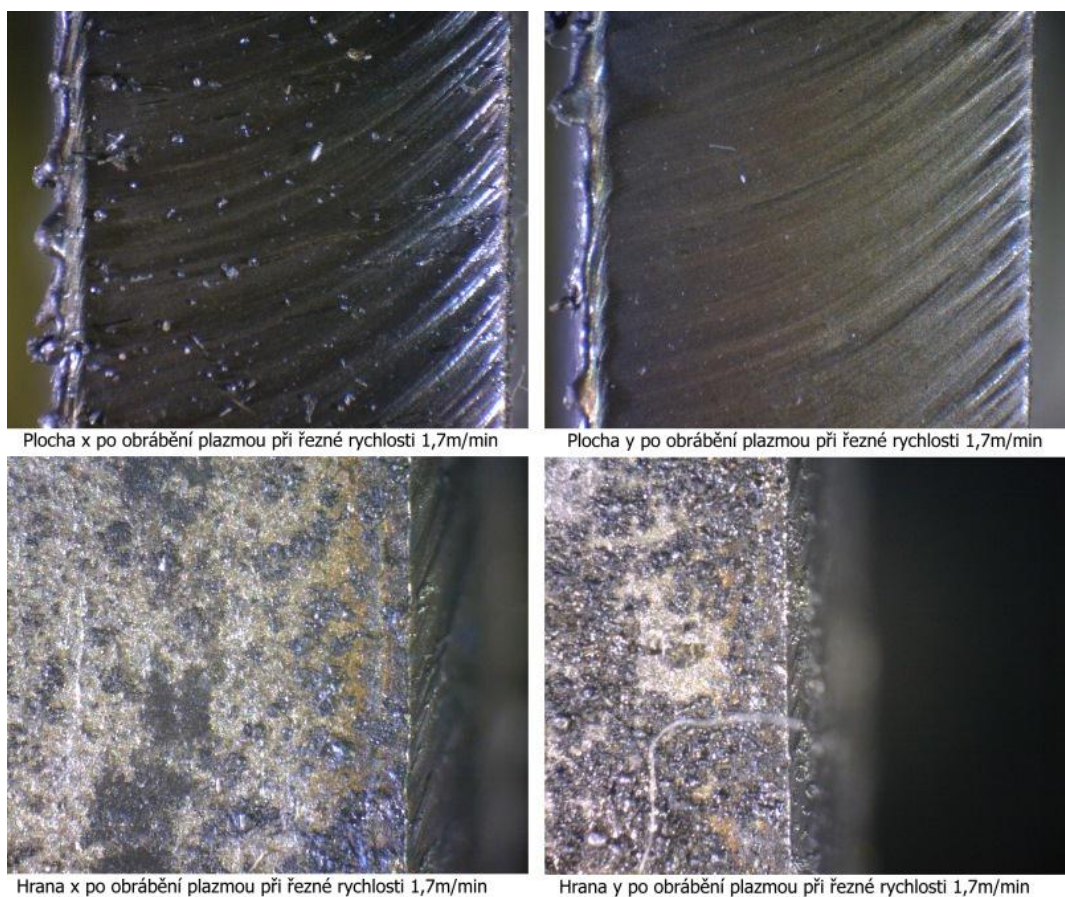
Obr. 68. Snímek kalibračního pásku a) zvětšení 10x b) zvětšení 15x



Obr. 117. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného plazmou - materiál 17 349

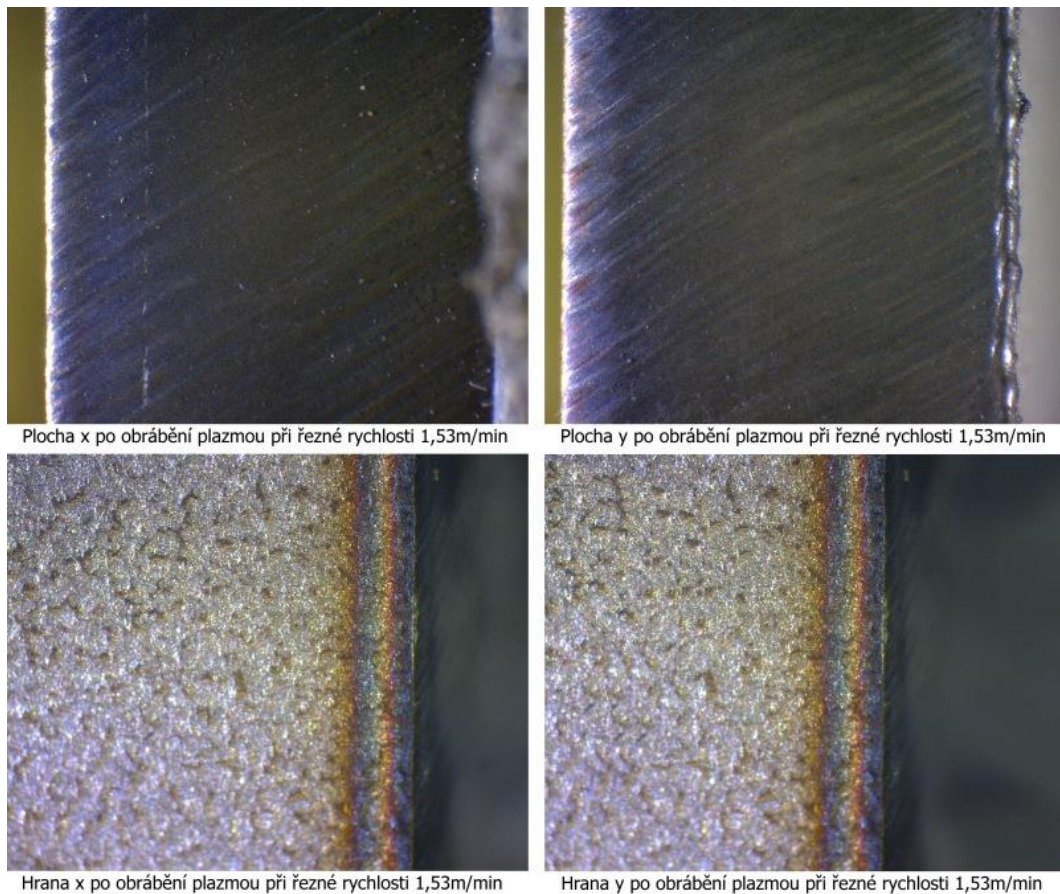


*Obr. 118. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného plazmou - materiál 17 349*

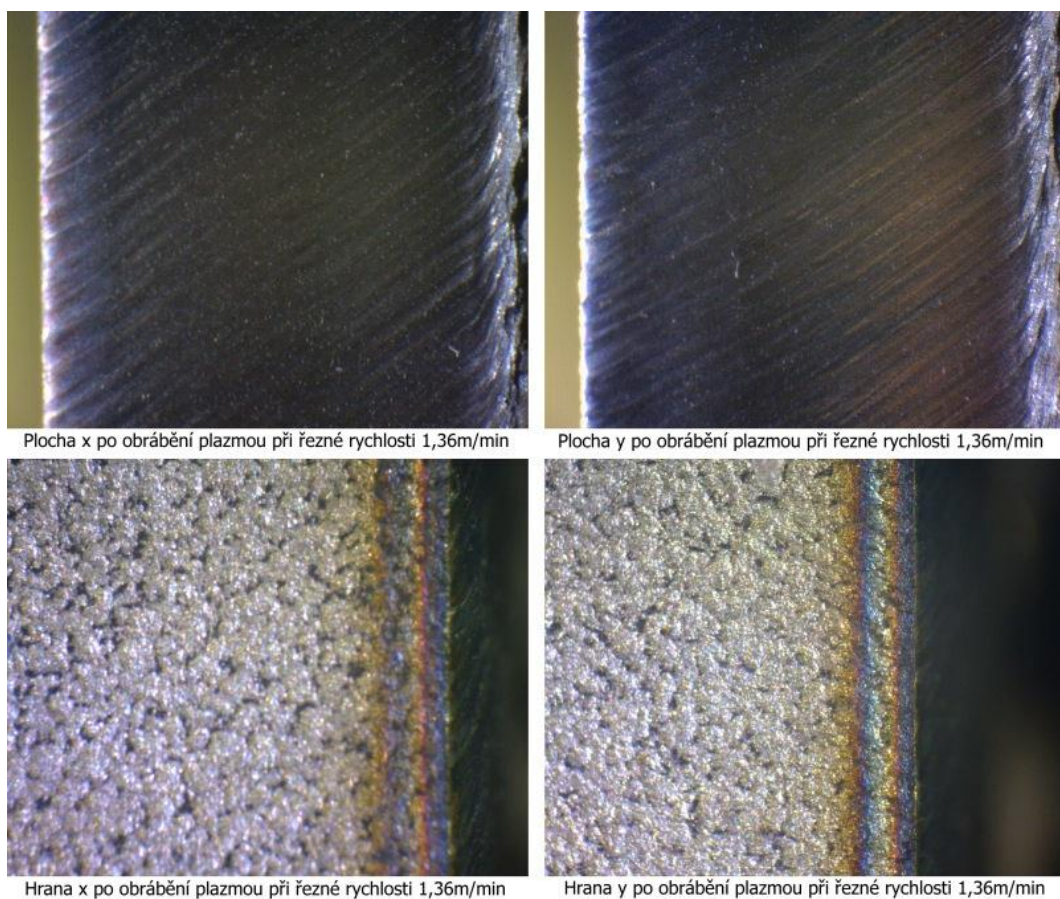


*Obr. 119. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného plazmou - materiál 17 349*

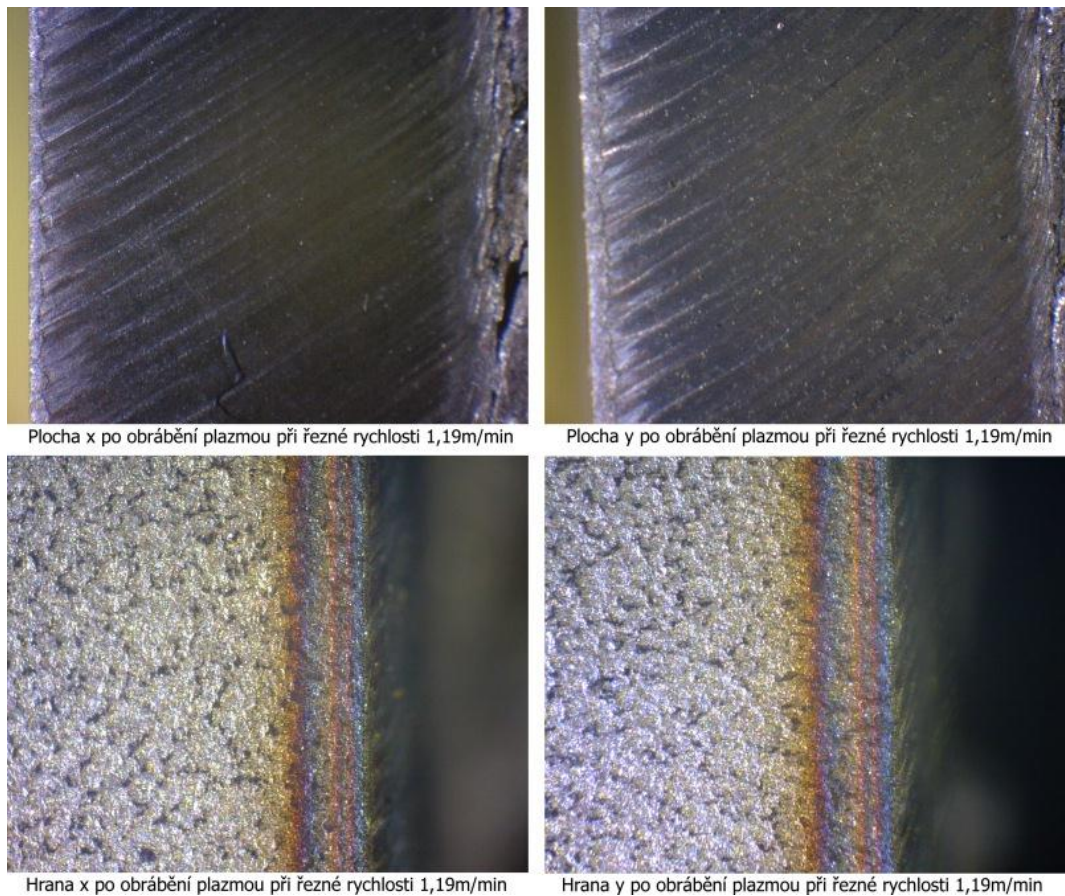




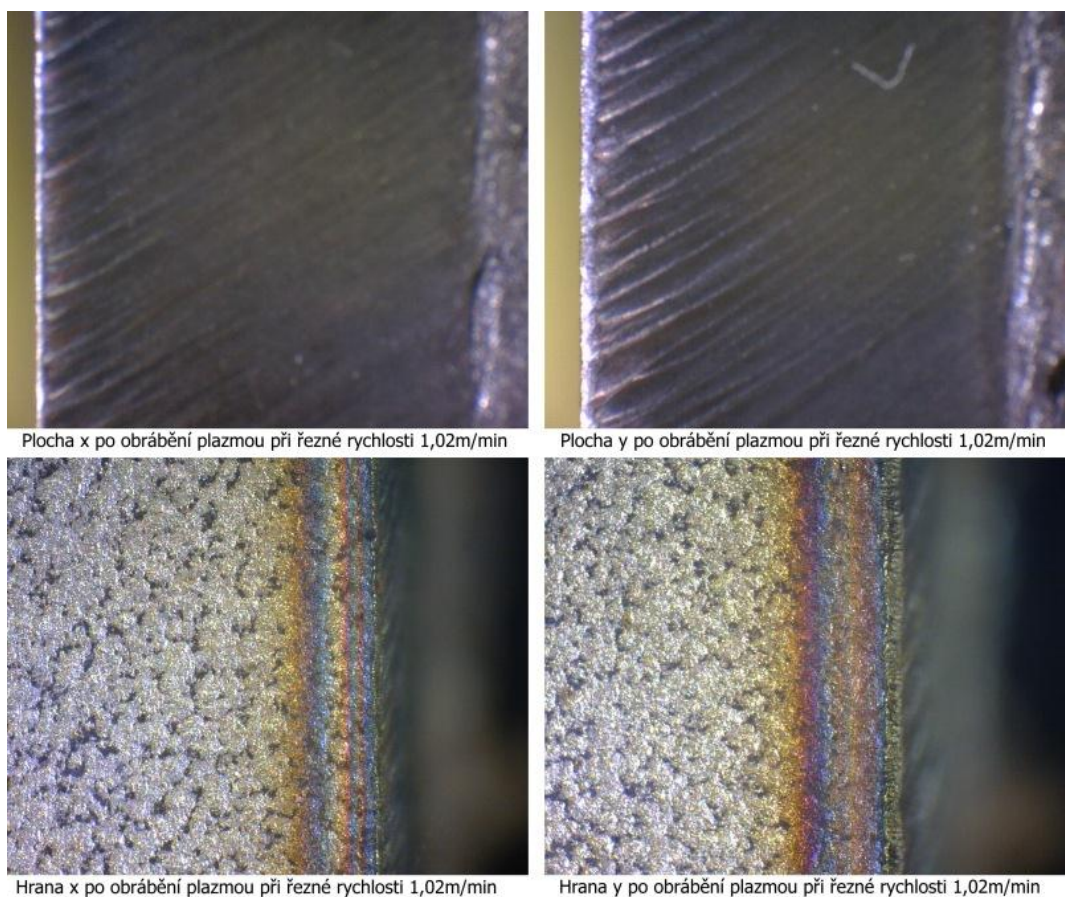
*Obr. 120. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného plazmou - materiál 17 349*



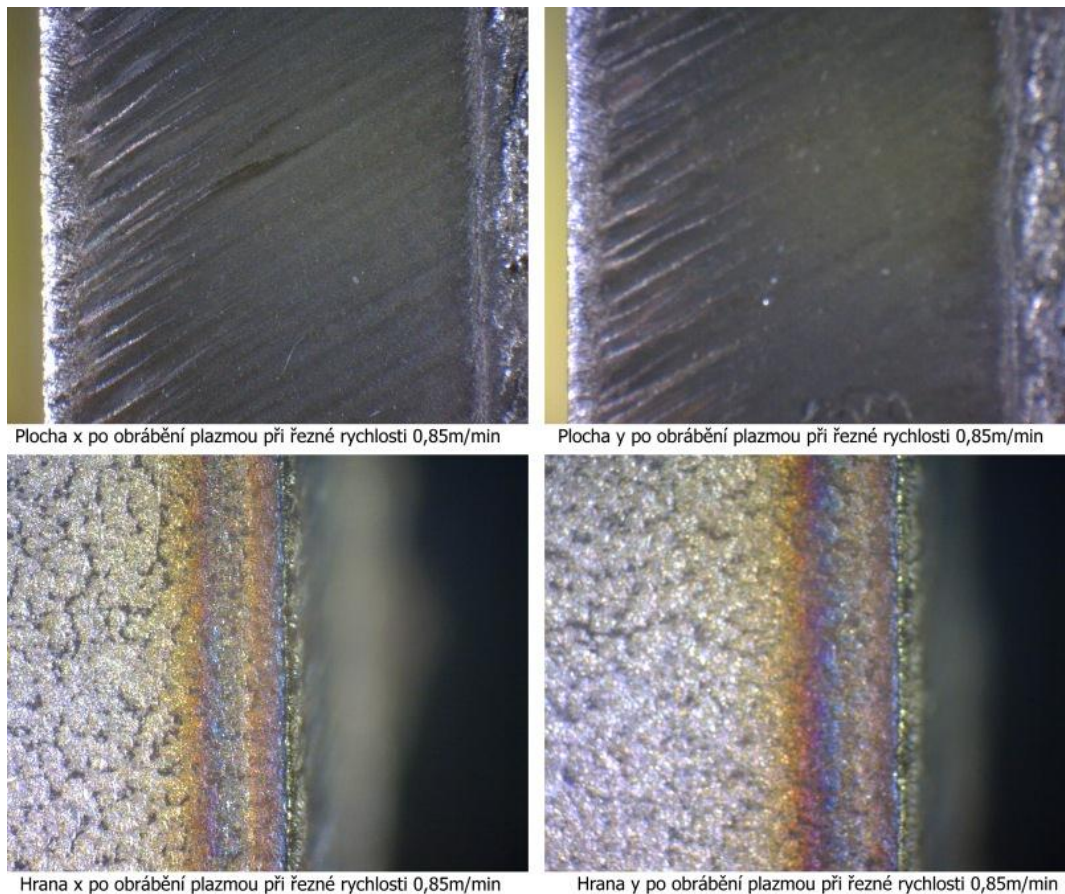
*Obr. 121. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného plazmou - materiál 17 349*



Obr. 122. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného plazmou - materiál 17 349



Obr. 123. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného plazmou - materiál 17 349



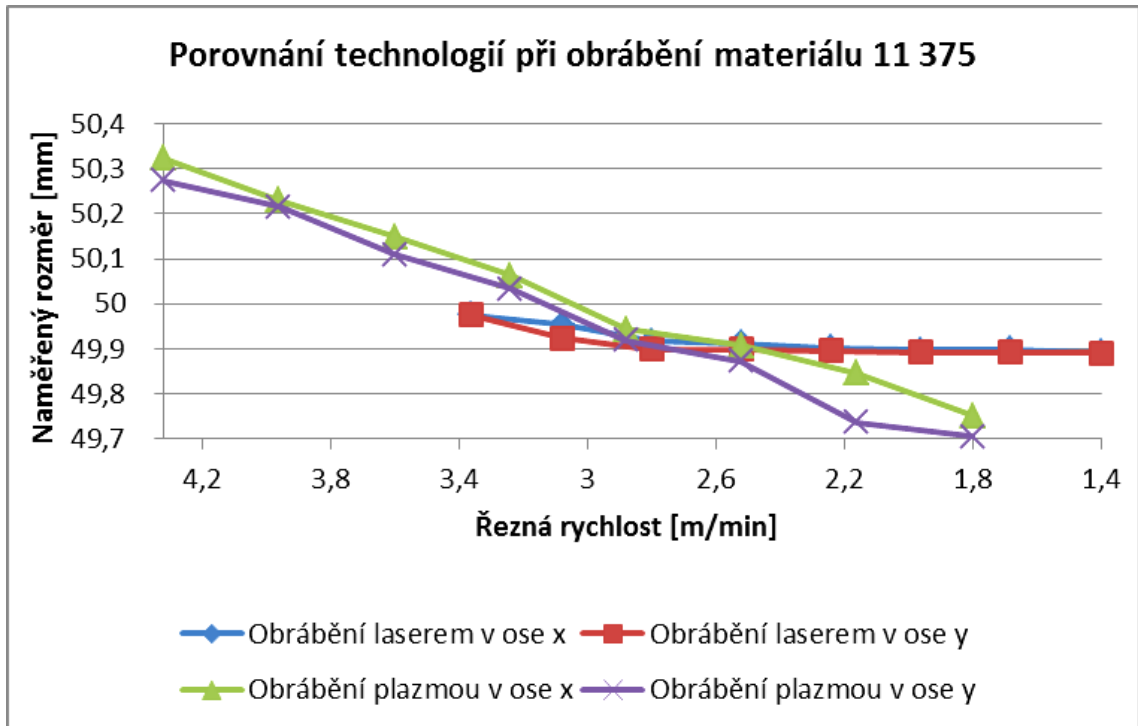
Obr. 124. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného plazmou - materiál 17 349

### Závěr:

Plocha materiálu 17 349 obrobená plazmovou technologií je velmi jemná, bez výrazných stop po plazmovém paprsku. Avšak od hodnoty řezné rychlosti 1,53 m/min je tato technologie pro obrábění nerezového materiálu nevhodná z důvodu ulpívání velkého množství materiálu na obrobku. Při obrábění plazmovým paprskem se také projevilo zešikmení řezné plochy. Zároveň je také zcela patrné, že se snižující se řeznou rychlostí se zvětšuje vrstva tepelně ovlivněného materiálu. To znamená, že při pomalejších řezných rychlostech bylo do obrobku předáváno větší množství tepla. Pro optimalizaci procesu řezání plazmovým paprskem z hlediska optického hodnocení kvality obrobku bychom zvolili řeznou rychlost 2,04 m/min, což by představovalo 20% zvýšení oproti defaultnímu nastavení plazmového obráběcího zařízení pro nerezovou ocel tloušťky 6 mm.

## 8 ZÁVĚREČNÉ POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM A PLAZMOVÝM PAPERSEM

### 8.1 Porovnání technologií pro obrábění materiálu 11 375



Obr. 125. Porovnání použitých technologií při obrábění materiálu 11 375

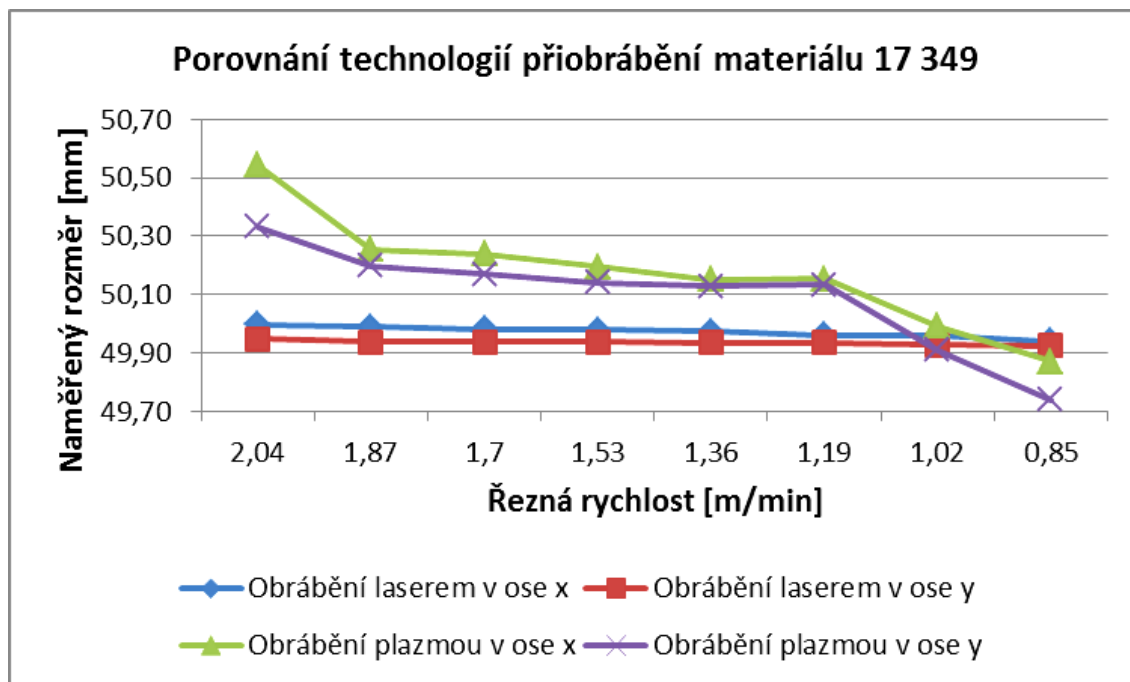
#### Závěr:

Na grafu jsou zobrazeny spojnice aritmetických průměrů pro použité technologie - obrábění materiálu 11 375 laserovým a plazmovým paprskem. Z grafu jsou patrné rozdíly mezi použitými technologiemi. U laserového obrábění se pohybujeme zhruba v jedené desetině při změně řezné rychlosti z 3,36 m/min na 1,4 m/min. Vypovídá to o vyšší kvalitě obrábění.

U obrábění plazmovým paprskem se pohybujeme při změně řezné rychlosti od 4,32 m/min do 1,8 m/min. V závislosti na tomto rozsahu řezné rychlosti se měnily rozměry obrobků o více jak 0,6 mm. Můžeme tedy říci, že se jedná o méně přesnou technologii.

Pokud bychom se chtěli co nejvíce přiblížit jmenovitému rozměru, který byl 50 mm, rozhodli bychom se zvolit u obrábění laserovým paprskem nejvyšší řeznou rychlost 3,36 m/min. U obrábění plazmovým paprskem bychom museli naopak použít nižší řeznou rychlost – 3,24 m/min.

## 8.2 Porovnání technologií pro obrábění materiálu 17 349



Obr. 126. Porovnání použitých technologií při obrábění materiálu 17 349

### Závěr:

Na grafu jsou zobrazeny spojnice aritmetických průměrů pro použité technologie - obrábění nerezového materiálu 17 349 laserovým a plazmovým paprskem. Z grafu jsou patrné rozdíly mezi použitými technologiemi. U laserového obrábění se pohybujeme stejně jako při obrábění materiálu 11 375 v jedné desetině při změně řezné rychlosti z 2,04 m/min na 0,85 m/min. Znovu nás to utvrzuje o vyšší kvalitě obrábění.

U obrábění plazmovým paprskem se pohybujeme při změně řezné rychlosti od 2,04 m/min do 0,85 m/min. V závislosti na tomto rozsahu řezné rychlosti se měnily rozměry obrobků o více jak 0,6 mm. Můžeme tedy potvrdit, že se jedná o méně přesnou technologii.

Pokud bychom se chtěli co nejvíce přiblížit jmenovitému rozměru, který byl 50 mm, rozhodli bychom se zvolit u obrábění laserovým paprskem nejvyšší řeznou rychlost 2,04 m/min. U obrábění plazmovým paprskem bychom museli naopak použít nižší řeznou rychlost – 1,02 m/min. Použití takto nízké řezné rychlosti je však nepřijatelné vzhledem k výslednému povrchu obráběné součásti.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo porovnat dvě nekonvenční technologie. Obrábění laserovým a plazmovým paprskem. Těmito technologiemi byly vyrobeny vzorky z plechu tloušťky 6mm. Na těchto vzorcích byla vyhodnocována rozměrová přesnost a kvalita obráběných ploch. Jako materiál vzorků byla použita klasická konstrukční ocel 11 375 a nerezová ocel 17 349.

Při obrábění vzorků byla proměnným parametrem řezná rychlost. Při statistickém vyhodnocování výsledků měření byla u obou použitých technologií nalezena taková závislost, že se snižující se řeznou rychlostí se zvětšovalo množství odebíraného materiálu, což bylo způsobeno delším tepelným působením laserového a plazmového paprsku na obrobek. Při delším čase interakce paprsku s obrobkem roste množství tepla přecházejícího do obrobku a dojde tak k natavení a odpaření větší vrstvy materiálu.

Kdybychom chtěli určit ideální řeznou rychlost z hlediska rozměrové přesnosti obrábění, zvolili bychom tyto parametry:

Materiál 11 375	–	obrábění laserem	–	3,36 m/min
		obrábění plazmou	–	3,24 m/min
Materiál 17 349	-	obrábění laserem	-	2,04 m/min
		obrábění plazmou	-	1,02 m/min

Pro výsledné nastavení řezné rychlosti na obráběcím stroji nemohou být tyto hodnoty brány příliš závazně, protože se musí brát v potaz také kvalita obráběných ploch. Ta byla při obrábění nerezového materiálu plazmovým paprskem řeznou rychlostí 1,02 m/min zcela nevyhovující, protože na obrobku ulpívalo velké množství odtavovaného materiálu. Musí se tedy volit určitý kompromis mezi rozměrovou přesností a kvalitou obrobků.

Po zvážení těchto dvou aspektů bychom volili výsledné parametry řezné rychlosti následující:

Materiál 11 375	–	obrábění laserem	–	3,36 m/min
		obrábění plazmou	–	3,96 m/min
Materiál 17 349	-	obrábění laserem	-	2,04 m/min
		obrábění plazmou	-	2,04 m/min

Ve všech případech je optimální řezná rychlost vyšší, než je výchozí nastavená řezná rychlost obráběcích zařízení. Znamenalo by to tedy kratší výrobní časy a větší efektivitu výroby.

Pokud před námi stojí otázka, která použitá technologie bude výhodnější, budeme muset brát v úvahu několik hledisek. Především jak rozměrově přesný a kvalitně obrobený výrobek budeme potřebovat. Pokud dílec nevyžaduje velkou rozměrovou přesnost a kvalitu obrobených ploch můžeme použít levnější variantu výroby – obrábění plazmovým paprskem. V takovém případě však již dále nepředpokládáme další technologické operace na dílci. Kdybychom měli výrobek, například přírubu, bylo by obtížné dále převrtávat otvory vzhledem k tepelně ovlivněné vrstvě v okolí řezu plazmovým paprskem.

Pro přesnější výrobu a vyšší kvalitu obrobených dílců bude výhodnější použít dražší variantu – obrábění laserovým paprskem.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó.: *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4
- [2] Přednášky doc. Ing. Libuše Sýkorová Ph.D.
- [3] KOCMAN, Karel.: *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [4] DILLINGER, J.: *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [5] <http://waterjet-cutting.blogspot.com/2011/02/water-jet-machining.html>
- [6] DRÁBEK, F.-ONDRA, J.-VAVŘÍK, I.: *Obrábění*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technologické literatury, 1974, 352 s. 04-231-74
- [7] [http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?13-Ultrasonic-machining-\(USM\)](http://www.mechanicaldesignforum.com/content.php?13-Ultrasonic-machining-(USM))
- [8] [http://www.themetallurgist.co.uk/articles/the\\_role\\_of\\_electrochemical\\_machining\\_eem\\_in\\_industrial\\_metallurgy.shtml](http://www.themetallurgist.co.uk/articles/the_role_of_electrochemical_machining_eem_in_industrial_metallurgy.shtml)
- [9] HLUCHÝ, M.-KOLOUCH, J.-PAŇÁK, R.: *Strojírenská technologie 2. 2., upr.* vyd. Praha: Scientia, 2001, 316 s. ISBN 80-718-3244-8.
- [10] [http://en.wikibooks.org/wiki/Wikijunior:How\\_Things\\_Work/Laser](http://en.wikibooks.org/wiki/Wikijunior:How_Things_Work/Laser)
- [11] STRUMBAN, E.: *Lasery a optoelektronika*. 1. vyd. Praha: Panorama, 1989, 248 s.
- [12] [http://zpravy.idnes.cz/nejvykonnesji-laser-sveta-u-prahy-vznikne-potvrдила-evropska-komise-1kk-/domaci.aspx?c=A110420\\_112300\\_domaci\\_jj](http://zpravy.idnes.cz/nejvykonnesji-laser-sveta-u-prahy-vznikne-potvrдила-evropska-komise-1kk-/domaci.aspx?c=A110420_112300_domaci_jj)
- [13] ENGST, P.-HORÁK, M.: *Aplikace laserů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 204 s.
- [14] *Kvantová elektronika*. 1. vyd. Praha: Academia, 1968, 447 s.
- [15] [http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni\\_prumyslove\\_lasery.php](http://www.lao.cz/laoinfo/serial2011/hlavni_prumyslove_lasery.php)
- [16] ŠESTÁK, J.-Strnad, Z.-Tříška, A. a kol.: *Speciální technologie a materiály*. 1. vyd. Praha: Academia, 1993, 688 s. ISBN 80-200-0148-4.
- [17] HÁBOVČÍK, Peter. *Lasery a fotodetektory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 318 s. ISBN 80-050-0526-1.
- [18] [http://www.tradekorea.com/product-detail/P00240550/Plasma\\_Nozzle.html](http://www.tradekorea.com/product-detail/P00240550/Plasma_Nozzle.html)



- [19] <http://www.cirrusdesign.org/technology.htm>
- [20] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=plasma\\_arc\\_welding\\_paw](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=plasma_arc_welding_paw)
- [21] [http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

WJM	Obrábění vodním paprskem
AJM	Obrábění abrazivním paprskem
AFM	Obrábění abrazivním paprskem
USM	Obrábění ultrazvukem
CM	Chemické obrábění
PCM	Fotochemické obrábění
ECM	Elektrochemické obrábění
ECG	Elektrochemické broušení
EDM	Elektrojiskrové obrábění
LBM	Obrábění laserovým paprskem
EBM	Obrábění paprskem elektronů
IBM	Obrábění paprskem iontů
PAM	Obrábění plazmovým paprskem
$E_2$	Energie hladiny 2 [J]
$E_1$	Energie hladiny 1 [J]
$h$	Planckova konstanta [J.s]
$f$	Frekvence [Hz]
$\lambda_w$	Vlnová délka laseru [ $\mu\text{m}$ ]
$r_o$	poloměr laserového paprsku [mm]
$\Theta$	Divergence laserového paprsku
$I$	Intenzita laserového paprsku [ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
$I_o$	Intenzita ve středu laserového paprsku [ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
$\bar{x}$	odhad aritmetického průměru [mm]
$s$	odhad směrodatné odchylky [mm]
$V_x$	Variační koeficient
$n$	počet měření

$Q_1$	První kvartil [mm]
$Q_3$	Třetí kvartil [mm]
IQR	Interkvartilové rozpětí [mm]
$\mu$	Aritmetický průměr základního souboru [mm]
$\sigma$	Směrodatná odchylka základního souboru [mm]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Nástroj a obrobek [3] .....	12
Obr. 2. Řezání vodním paprskem [5].....	15
Obr. 3. Obrábění abrazivním paprskem [2] .....	16
Obr. 4. Obrábění ultrazvukem [7].....	16
Obr. 5. Chemické obrábění [3] .....	17
Obr. 6. Elektrochemické obrábění [8].....	17
Obr. 7. Elektrochemické obrábění [3].....	18
Obr. 8. Elektroerozivní obrábění [4].....	19
Obr. 9. Řezání laserem [4].....	19
Obr. 10. Obrábění paprskem elektronů [2] .....	20
Obr. 11. Obrábění iontovým paprskem [2].....	20
Obr. 12. Obrábění plazmovým paprskem [4] .....	21
Obr. 13. Laser s krystalem rubínu [10] .....	22
Obr. 14. Zdroje vybuzení atomů [1] .....	24
Obr. 15. Fokuse laserového paprsku [1].....	24
Obr. 16. LPSS Nd-YAG - laser buzený výbojkami [15] .....	27
Obr. 17. DPSS Nd-YAG - laser buzený diodami [15].....	27
Obr. 18. Vláknový laser [15] .....	28
Obr. 19. CO <sub>2</sub> laser [15] .....	28
Obr. 21. Působení laseru na materiál [1] .....	30
Obr. 22. Laserové řezání materiálu [15] .....	31
Obr. 23. Typický tvar otvoru vrtaného laserem [1] .....	32
Obr. 24. Soustružení mezikruží laserem [1] .....	33
Obr. 25. Laserový interferometr [4].....	34
Obr. 26. Transferovaný oblouk [1] .....	37
Obr. 27. Netransferovaný oblouk [1].....	37
Obr. 28. Způsoby chlazení plazmového hořáku [1].....	38
Obr. 29. Stabilizace plazmového oblouku vodou [1] .....	38
Obr. 30. Plazmový hořák se vstřikováním vody [1] .....	39
Obr. 31. Trysky plazmového hořáku [18].....	40
Obr. 32. Řezné rychlosti plazmového a laserového řezání [1] .....	40
Obr. 33. Plazmové nanášení povlaků [19].....	41
Obr. 34. Plazmové svařování [20] .....	42

Obr. 35. Plazmové soustružení s klasickým nástrojem [1].....	43
Obr. 36. Plazmové svařování bez klasického nástroje [1].....	43
Obr. 37. 3D Model obráběného vzorku .....	47
Obr. 38. Laserový obráběcí stroj TRUMPF TRAUMATIC L3030.....	48
Obr. 39. Laserová hlava TRUMPF .....	48
Obr. 40. Plazmový obráběcí stroj MGM OMNICUT 4000 .....	49
Obr. 41. Pálící hlava Kjellberg .....	49
Obr. 42. Měření mikrometrem Mitutoyo .....	50
Obr. 43. Univerzální dílenský mikroskop – snímání povrchu vzorků.....	50
Obr. 44. Schéma měření obrobku (17 349).....	51
Obr. 45. Box plot pro obrábění laserem vzorku 1 - materiál 11 375 .....	52
Obr. 46. Box plot pro obrábění laserem vzorku 2 - materiál 11 375 .....	53
Obr. 47. Box plot pro obrábění laserem vzorku 3 - materiál 11 375 .....	54
Obr. 48. Box plot pro obrábění laserem vzorku 4 - materiál 11 375 .....	55
Obr. 49. Box plot pro obrábění laserem vzorku 5 - materiál 11 375 .....	56
Obr. 50. Box plot pro obrábění laserem vzorku 6 - materiál 11 375 .....	57
Obr. 51. Box plot pro obrábění laserem vzorku 7 - materiál 11 375 .....	58
Obr. 52. Box plot pro obrábění laserem vzorku 8 - materiál 11 375 .....	59
Obr. 53. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose x vyrobených laser. obráběním.....	60
Obr. 54. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose y vyrobených laser. obráběním.....	61
Obr. 55. Srovnání výsledků měření vzorků z oceli 11 375 vyrobených laser. obráběním.....	62
Obr. 56. Obrábění laserovým paprskem .....	63
Obr. 57. Box plot pro obrábění laserem vzorku 1 - materiál 17 349 .....	64
Obr. 58. Box plot pro obrábění laserem vzorku 2 - materiál 17 349 .....	65
Obr. 59. Box plot pro obrábění laserem vzorku 3 - materiál 17 349 .....	66
Obr. 60. Box plot pro obrábění laserem vzorku 4 - materiál 17 349 .....	67
Obr. 61. Box plot pro obrábění laserem vzorku 5 - materiál 17 349 .....	68
Obr. 62. Box plot pro obrábění laserem vzorku 6 - materiál 17 349 .....	69
Obr. 63. Box plot pro obrábění laserem vzorku 7 - materiál 17 349 .....	70
Obr. 64. Box plot pro obrábění laserem vzorku 8 - materiál 17 349 .....	71
Obr. 65. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349v ose x vyrobených laser. obráběním.....	72
Obr. 66. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose y vyrobených laser. obráběním.....	73
Obr. 67. Srovnání výsledků měření vzorků z oceli 11 375 vyrobených laser. obráběním.....	73

Obr. 68. Snímek kalibračního pásku a) zvětšení 10x b) zvětšení 15x .....	74
Obr. 69. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	74
Obr. 70. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	75
Obr. 71. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	75
Obr. 72. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	76
Obr. 73. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	76
Obr. 74. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	77
Obr. 75. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	77
Obr. 76. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného laserem - materiál 11 375 .....	78
Obr. 77. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	79
Obr. 78. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	80
Obr. 79. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	80
Obr. 80. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	81
Obr. 81. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	81
Obr. 82. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	82
Obr. 83. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	82
Obr. 84. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného laserem - materiál 17 349 .....	83
Obr. 85. Obrábění oceli 11 375 plazmovým paprskem .....	84
Obr. 86. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 1 - materiál 11 375.....	85
Obr. 87. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 2 - materiál 11 375.....	86
Obr. 88. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 3 - materiál 11 375.....	87
Obr. 89. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 4 - materiál 11 375.....	88
Obr. 90. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 5 - materiál 11 375.....	89
Obr. 91. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 6 - materiál 11 375.....	90
Obr. 92. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 7 - materiál 11 375.....	91
Obr. 93. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 8 - materiál 11 375.....	92
Obr. 94. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose x vyrobených plazmovým obráběním.....	93
Obr. 95. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose y vyrobených plazmovým obráběním.....	94
Obr. 96. Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose y vyrobených plazmovým obráběním.....	94
Obr. 97. Obrábění oceli 17 349 plazmovým paprskem .....	95
Obr. 98. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 1 - materiál 17 349.....	96
Obr. 99. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 2 - materiál 17 349.....	97

Obr. 100. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 3 - materiál 17 349.....	98
Obr. 101. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 4 - materiál 17 349.....	99
Obr. 102. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 5 - materiál 17 349.....	100
Obr. 103. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 6 - materiál 17 349.....	101
Obr. 104. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 7 - materiál 17 349.....	102
Obr. 105. Box plot pro obrábění plazmou vzorku 8 - materiál 17 349.....	103
Obr. 106. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose x vyrobených plazmovým obráběním.....	104
Obr. 107. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 v ose y vyrobených plazmovým obráběním.....	105
Obr. 108. Výsledky měření vzorků z oceli 17 349 vyrobených plazmovým obráběním...	105
Obr. 109. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	106
Obr. 110. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	107
Obr. 111. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	107
Obr. 112. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	108
Obr. 113. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	108
Obr. 114. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	109
Obr. 115. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	109
Obr. 116. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného plazmou - materiál 11 375 .....	110
Obr. 117. Snímky z mikroskopu vzorku 1 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	111
Obr. 118. Snímky z mikroskopu vzorku 2 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	112
Obr. 119. Snímky z mikroskopu vzorku 3 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	112
Obr. 120. Snímky z mikroskopu vzorku 4 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	113
Obr. 121. Snímky z mikroskopu vzorku 5 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	113
Obr. 122. Snímky z mikroskopu vzorku 6 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	114
Obr. 123. Snímky z mikroskopu vzorku 7 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	114
Obr. 124. Snímky z mikroskopu vzorku 8 obráběného plazmou - materiál 17 349.....	115
Obr. 125. Porovnání použitých technologií při obrábění materiálu 11 375.....	116
Obr. 126. Porovnání použitých technologií při obrábění materiálu 17 349.....	117

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Rozdělení nekonvenčních technologií [2] .....	13
Tab. 2. Hustoty energie různých zdrojů energie [1].....	26
Tab. 3. Chemické složení oceli 11 375 [21] .....	46
Tab. 4. Chemické složení oceli 17 349 [21] .....	46
Tab. 5. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	52
Tab. 6. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	53
Tab. 7. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	54
Tab. 8. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	55
Tab. 9. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	56
Tab. 10. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	57
Tab. 11. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	58
Tab. 12. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 11 375 – obrábění laserem .....	59
Tab. 13. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	64
Tab. 14. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	65
Tab. 15. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	66
Tab. 16. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	67
Tab. 17. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	68
Tab. 18. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	69
Tab. 19. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	70
Tab. 20. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 17 349 – obrábění laserem .....	71
Tab. 21. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	85
Tab. 22. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	86
Tab. 23. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	87
Tab. 24. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	88
Tab. 25. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	89
Tab. 26. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	90
Tab. 27. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	91
Tab. 28. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 11 375 – obrábění plazmou .....	92
Tab. 29. Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	96
Tab. 30. Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	97
Tab. 31. Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	98
Tab. 32. Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	99
Tab. 33. Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	100



---

Tab. 34. Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	101
Tab. 35. Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	102
Tab. 36. Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 17 349 – obrábění plazmou .....	103