

# Měření povrchu výrobku po obrábění vláknovým laserem

Bc. David Možíšek

---

Diplomová práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. David Možíšek</b>
Osobní číslo:	<b>T22368</b>
Studijní program:	<b>N0788A270007 Řízení jakosti</b>
Forma studia:	<b>Prezenční</b>
Téma práce:	<b>Měření povrchu výrobku po obrábění vláknovým laserem</b>

## Zásady pro vypracování

- Rešerše nekonvenčních metod obrábění
- Tvorba metodiky pro hodnocení drsnosti povrchů
- Vyhodnocení dle metodiky

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

Seznam doporučené literatury:

1. Meloun, M., & Militký, J. (2004). *Statistická analýza experimentálních dat* (Vyd. 2., upr. a rozš). Praha: Academia.
2. Pata, V., & Kubišová, M. (2018). *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická.
3. Whitehouse, D. J., & Whitehouse, D. J. (2011). *Handbook of surface and nanometrology* (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.ta

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milena Kubišová, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou laserového obrábění a jeho dopady na kvalitu povrchu vybraných materiálů. V teoretické části je poskytnut souhrnný přehled o nekonvenčních metodách obrábění. Důraz je kladen na popis procesů laserového obrábění a jeho účinků na materiál v kontextu současných norem hodnocení jakosti povrchu. Tato část dále popisuje metody a zařízení pro hodnocení drsnosti povrchu.

Praktická část práce zkoumá, jak definovaná nastavení vláknového laseru ovlivňují drsnost povrchu, konkrétně parametry Ra a Rz, přičemž výsledky měření jsou statisticky analyzovány v softwaru Minitab.

Klíčová slova: laserové obrábění, porovnání povrchů, drsnost povrchů, statistická analýza, vláknový laser

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the issue of laser machining and its effects on the surface quality of selected materials. The theoretical part provides a comprehensive overview of unconventional machining methods. Emphasis is placed on the description of laser machining processes and its effects on the material in the context of current surface quality assessment standards. This section also describes methods and equipment for surface roughness evaluation.

The practical part of the thesis investigates how defined fiber laser settings affect surface roughness, specifically the parameters Ra and Rz, and the measurement results are statistically analyzed in Minitab software.

Keywords: laser machining, surface comparison, surface roughness, statistical analysis, fiber laser

Poděkování patří paní Ing. Mileně Kubišové Ph.D. za její čas, ochotu a vedení spolu s užitečnými radami a připomínkami, které mi byly poskytnuty při tvorbě této diplomové práce. Taktéž děkuji své rodině, kamarádům a partnerce, kteří mi byli emocionální oporou a bezpečným místem po celou dobu studia.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1.1 Dělení podle hlavního energetického zdroje úběru .....	13
1.1.2 Dělení podle přítomnosti nástroje .....	13
1.1.3 Dělení dle převládajícího mechanismu úběru materiálu rozlišuje: .....	14
1.2 ODLIŠNOSTI NEKONVENČNÍHO A KONVENČNÍHO OBRÁBĚNÍ .....	15
1.3 PROCES MIKRO-OBRÁBĚNÍ U NEKONVENČNÍCH OBRÁBĚCÍCH METOD .....	18
1.3.1 Mikro-obrábění pomocí tepelné eroze .....	19
1.3.2 Mikro-obrábění elektrochemickou erozí .....	21
1.3.3 Hybridní mikro-obráběcí procesy .....	22
1.4 PROCES NANO-OBRÁBĚNÍ U NEKONVENČNÍCH OBRÁBĚCÍCH METOD.....	22
1.4.1 Mechanický úběr materiálu v nanometrii.....	23
1.4.2 Nemechanické nanometrické obrábění .....	24
1.4.3 Litografické metody pro nanometrickou výrobu .....	25
<b>2 TECHNOLOGIE NEKONVENČNÍHO OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>27</b>
2.1 MECHANICKÁ ENERGIE: .....	27
2.1.1 Obrábění ultrazvukem .....	27
2.1.2 Technologie abrazivního vodního paprsku .....	30
2.1.3 Magnetické abrazivní dokončování .....	32
2.2 CHEMICKÁ A ELEKTROCHEMICKÁ ENERGIE:.....	33
2.2.1 Elektrochemické obrábění .....	33
2.2.2 Chemické obrábění.....	34
2.3 TEPELNÁ NEBO ELEKTROTEPELNÁ ENERGIE: .....	37
2.3.1 Elektroerozivní obrábění: .....	37
2.3.2 Obrábění plazmou .....	39
2.3.3 Obrábění elektronovým paprskem .....	40
2.3.4 Obrábění iontovým paprskem .....	42
<b>3 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO PAPRSKU</b> .....	<b>44</b>
3.1 PRINCIP FUNKCE LASERU.....	44
3.1.1 Stimulovaná emise a energetické hladiny .....	45
3.1.2 Fokuse a ovlivnění materiálu .....	47
3.2 TYPY LASERŮ A JEJICH ROZDĚLENÍ.....	48
3.2.1 Pevnolátkové lasery .....	49
3.2.2 Plynové lasery .....	52
3.2.3 Kapalinové lasery .....	54
3.2.4 Polovodičové lasery .....	56

3.3	VLÁKNOVÝ LASER.....	57
3.3.1	Dělení vláknových laserů .....	58
3.3.2	Pracovní módy vláknového laseru .....	60
3.4	VLIV LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁL.....	62
3.5	VYUŽITELNOST LASERU PRO MIKROOBRÁBĚNÍ A NANOBRÁBĚNÍ.....	64
3.5.1	Mikroobrábění vláknovým laserem .....	64
3.5.2	Laserové nanoobrábění .....	66
<b>4</b>	<b>HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU PO OBROBENÍ VLÁKNO- LASEROVÝM PAPRSKEM.....</b>	<b>67</b>
4.1	METODY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU.....	67
4.1.1	Dotykové metody měření .....	68
4.1.2	Bezkontaktní měřicí metody .....	69
4.2	NORMY POPISUJÍCÍ DRSNOST POVRCHU .....	72
4.2.1	Obecné termíny: .....	73
4.2.2	Názvy vyhodnocovaných parametrů:.....	78
4.2.3	Definice parametrů profilu povrchu .....	79
<b>5</b>	<b>STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE.....</b>	<b>82</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>83</b>
<b>6</b>	<b>PŘÍPRAVA VZORKŮ A MĚŘENÍ .....</b>	<b>84</b>
6.1	POPIS VZORKŮ.....	84
6.2	MATERIÁLY ZKOUMANÝCH VZORKŮ.....	86
6.3	POPIS ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	88
6.3.1	Vláknový laser Sauer - Lasertec 80 Shape.....	88
6.3.2	Měřicí přístroj Zygo NewView™ 8000.....	89
6.3.3	Optický mikroskop Leica .....	91
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÝCH POVRCHŮ .....</b>	<b>92</b>
7.1	VYHODNOCENÍ POMOCÍ METODIKY EDA .....	92
7.1.1	Materiál ocel 12 024.....	93
7.1.2	Materiál ocel 19 820.....	98
7.1.3	Materiál Al (čistý hliník).....	103
7.1.4	Materiál Mosaz.....	107
7.2	SROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ PARAMETRU RA PRO ZKOUMANÉ MATERIÁLY.....	112
7.2.1	Srovnání pomocí Histogramu.....	112
7.2.2	Porovnání rozptylů pomocí Levenesova testu .....	114
7.2.3	Test rozdílu středních hodnot, Metoda ANOVA .....	115
7.2.4	Mezimateriálové porovnání parametru Ra pomocí analýzy shluků.....	120
7.3	SROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ PARAMETRU RZ PRO ZKOUMANÉ MATERIÁLY.....	122
7.3.1	Srovnání pomocí Histogramu.....	123
7.3.2	Porovnání rozptylů pomocí Levenesova testu .....	126
7.3.3	Test rozdílu středních hodnot mezi parametry Rz, Metoda ANOVA.....	127



7.3.4	Mezimateriálové porovnání parametru Rz pomocí analýzy shluků .....	132
7.3.5	Porovnání Dendrogramů mezi parametry Ra a Rz.....	133
<b>ZÁVĚR.....</b>		<b>135</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>137</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>		<b>140</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>141</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>144</b>

## ÚVOD

Moderní průmyslové aplikace vyžadují stále vyšší standardy kvality a přesnosti, což vede k neustálému vývoji a zdokonalování výrobních technologií. Mezi tyto pokročilé technologie patří laserové obrábění, které se díky své přesnosti a efektivitě stalo nezbytnou součástí mnoha výrobních procesů. Tato diplomová práce se zabývá laserovým obráběním s důrazem na analýzu jeho vlivu na kvalitu povrchu vybraných materiálů.

V teoretické části práce je poskytnut detailní přehled nekonvenčních metod obrábění, kde laserové obrábění zaujímá klíčové místo. Popisujeme různé techniky a přístupy v tomto oboru, přičemž speciální pozornost je věnována jejich schopnostem a omezením ve srovnání s tradičními metodami. Zvláštní důraz je kladen na aktuální normy hodnocení jakosti povrchu, jako je ČSN EN ISO 21920-(1-3), které umožňují standardizované hodnocení a srovnání drsnosti povrchů napříč obráběcími technologiemi.

Praktická část této práce je zaměřena na experimentální hodnocení a analýzu vlivu specifických parametrů vláknového laseru na parametry Ra a Rz drsnosti povrchu vybraných materiálů. Tato část zahrnuje systematické měření těchto parametrů pomocí bezkontaktního profilometru Zygo. Data získaná z těchto měření byla následně analyzována pomocí statistických metod v programu Minitab, což poskytuje objektivní a kvantitativní hodnocení vlivu laserových nastavení na kvalitu obroběných povrchu.

Tato práce přináší nový pohled na optimalizaci procesů laserového obrábění s ohledem na maximální efektivitu a kvalitu výrobních výstupů. Cílem práce je poskytnout poznatky pro průmyslové aplikace, ale taktéž hlubší pochopení dynamiky laserového obrábění.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční technologie obrábění odkazují na skupinu procesů, které odstraňují přebytečný materiál různými metodami zahrnujícími mechanickou, tepelnou, elektrickou nebo chemickou energii nebo kombinace těchto energií, ale nepoužívají tradiční řezný nástroj. Tyto technologie se často používají, když tradiční obráběcí techniky nejsou proveditelné, efektivní nebo ekonomické. [1]

Tyto nekonvenční metody mají několik výhod, jako je schopnost obrábět velmi tvrdé nebo křehké materiály, vytvářet složité tvary a dosahovat vysokých úrovní přesnosti. Nicméně mají také omezení, jako jsou vyšší provozní náklady, pomalejší rychlosti odstraňování materiálu a často vyžadují specializované vybavení a odborné znalosti. [1]

Vzhledem k tomu, že nekonvenční metody obrábění se mohou značně lišit ve svých principech a aplikacích, společnou vlastností pro všechny je jejich schopnost přesně kontrolovat odstraňování materiálu na mikroskopické či dokonce nanometrické úrovni. To umožňuje výrobu složitých a přesných tvarů, které jsou často mimo dosah tradičních metod. [1]

Dalším důležitým aspektem nekonvenčních metod obrábění je jejich schopnost minimalizovat nebo úplně eliminovat sekundární zpracování, jako je broušení nebo leštění. Tím se zkracuje doba výroby a snižují se výrobní náklady, což činí tyto metody atraktivní pro širokou škálu průmyslových aplikací. [1]

Technologický pokrok v oblasti nekonvenčních metod obrábění také otevírá nové možnosti pro zpracování materiálů s vysokou úrovní vlastností, jako je vysoká teplotní odolnost nebo výjimečná mechanická pevnost. To má velký význam pro pokročilé inženýrské aplikace v leteckém, vesmírném a obranném průmyslu, kde jsou tyto materiály často používány. [1]

## 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční nebo-li progresivní výrobní metody zahrnují množství procesů, kdy některé našly široké uplatnění a jiné zůstaly pouze ve fázi experimentálních. Systematické dělení těchto technologií je možné zpracovat z různých hledisek. [1]

Obvykle dělíme:

- podle hlavního energetického zdroje úběru
- podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa
- podle převládajícího mechanismu úběru materiálu

### 1.1.1 Dělení podle hlavního energetického zdroje úběru

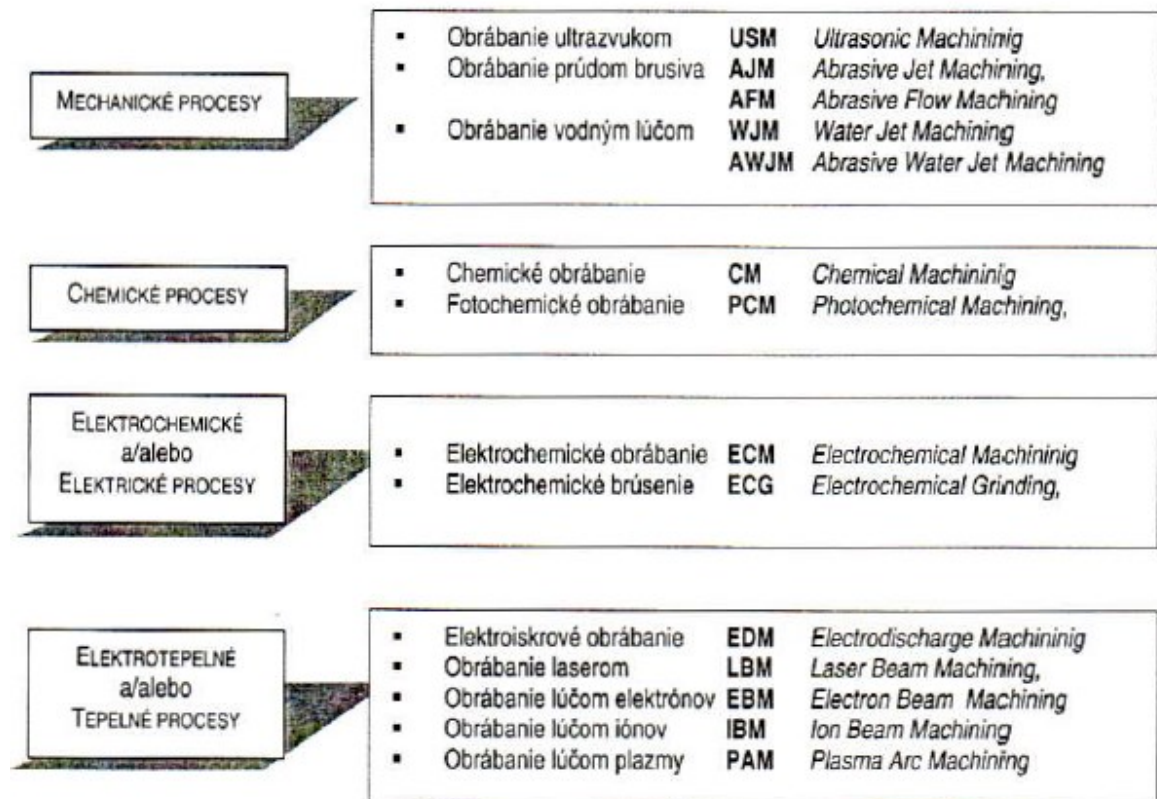
Rozdělení dle druhu použité energie je nejvíce používané a rozšířené. Třídí jednotlivé technologie do hlavních skupin podle převládající energie, která je zdrojem úběru materiálu a to na: [1]

- mechanické procesy
- chemické procesy
- elektrické nebo elektrochemické procesy
- tepelné nebo elektrotepelné procesy

### 1.1.2 Dělení podle přítomnosti nástroje

Termín "nástroj" se v širším smyslu používá pro označení jakéhokoli zařízení, které umožňuje odstraňování materiálu, jako je například laser nebo elektronový paprsek. V těchto situacích nástroj není pevným geometrickým objektem. Na druhou stranu, existují nástroje, které jsou pevné geometrické objekty, ale na rozdíl od tradičního řezání nebo broušení nejsou v přímém kontaktu s materiálem, který se zpracovává. Tyto nástroje během procesu odstraňování materiálu podléhají určité míře opotřebení. Jejich úlohou je zajistit správnou geometrii vytvářeného tvaru, jako jsou dutiny, otvory, drážky, a zároveň zabezpečit optimální průběh procesu. Jako podpůrné geometrické objekty se tyto nástroje využívají v

procesech, jako je obrábění ultrazvukem (USM), elektrochemické obrábění (ECM) elektrojiskrové obrábění (EDM). [1]



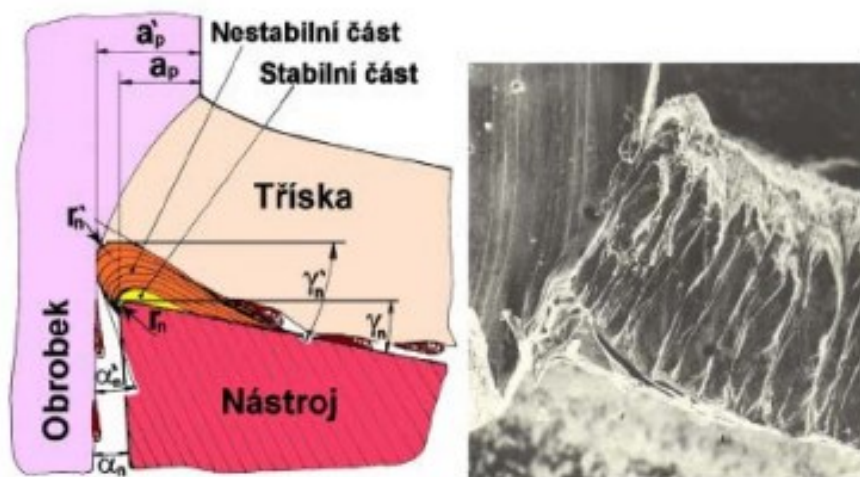
Obrázek 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2]

### 1.1.3 Dělení dle převládajícího mechanismu úběru materiálu rozlišuje:

- procesy s převládajícím brusným účinkem: Opracování ultrazvukem (USM), opracování proudem abraziva (AJM, AFM) [1,2]
- procesy s erozivním účinkem jako obrábění vodním paprskem (WJM, AWJM) [1,2]
- procesy chemického rozpouštění materiálu: zahrnují chemické leptání (CM), fotochemické obrábění (PCM), elektrochemické obrábění (ECM), opracování laserovým paprskem (LBM), elektrochemické obrábění (ECM) a elektrochemické broušení (ECG) [1,2]
- procesy s převládajícím tepelným účinkem na úběr materiálu: elektrojiskrové obrábění (EDM), opracování laserem (LBM), obrábění paprskem plazmy (PAM), obrábění paprskem elektronů (EBM), obrábění paprskem iontů (IBM). [1,2]

## 1.2 Odlišnosti nekonvenčního a konvenčního obrábění

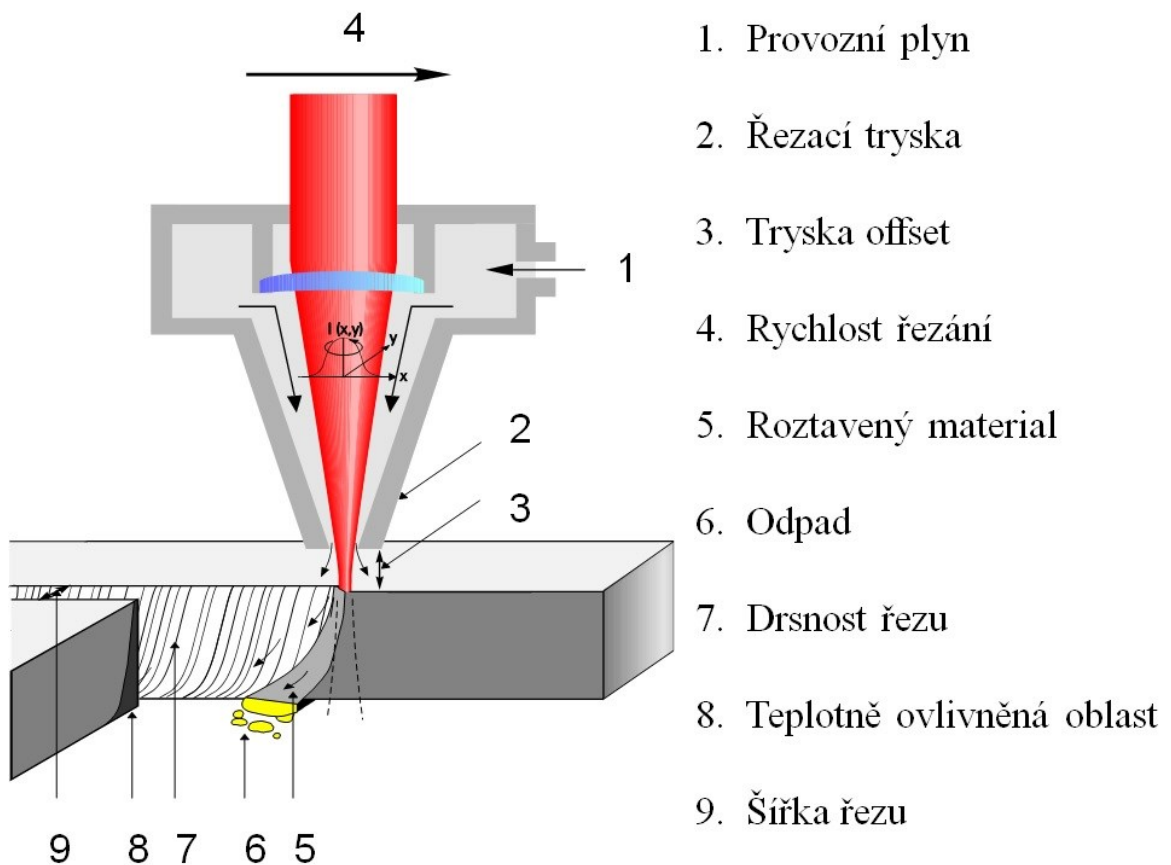
Konvenční a nekonvenční obrábění se liší v mnoha ohledech, především ve způsobu, jakým je materiál odstraňován z obrobku. Konvenční obrábění zahrnuje procesy jako soustružení, frézování, vrtání a broušení. To zahrnuje přímý kontakt mezi nástrojem a obrobkem, přičemž nástroj odstraňuje materiál fyzickým kontaktem a mechanickou silou. Opotřebením nástroje je významným faktorem kvůli fyzickému kontaktu a tření, což vyžaduje pravidelnou údržbu a výměnu nástrojů. Konvenční obrábění je efektivní na řadě materiálů, ale jeho účinnost klesá s rostoucí tvrdostí materiálu. Nabízí dobrou přesnost, ale může být omezeno při výrobě složitých geometrií, zejména vnitřních dutin. Poskytuje dobré povrchové úpravy a tolerance, avšak kvalita se může snižovat s opotřebením nástroje. Tato metoda je typicky méně nákladná z hlediska nákladů na zařízení a je vhodná pro širokou škálu objemů výroby, včetně malých sérií. Spotřebovává obecně méně energie a generuje významné množství třísek, tepla a nečistot. [3]



Obrázek 2 Tvorba nárůstku u kořene třísky [4]

Oproti tomu nekonvenční obrábění používá netradiční metody odstraňování materiálu, které nezahrnují přímý kontakt mezi nástrojem a obrobkem, klasický řezný nástroj zde může být pouze jako podpora, avšak neúčastní se procesu odebrání materiálu. Příklady zahrnují elektroerozivní obrábění, laserové obrábění, ultrazvukové obrábění a vodní paprsek. Opotřebením nástroje je u nekonvenčního obrábění minimální nebo neexistující. Je vysoce účinné na velmi tvrdých materiálech, včetně těch, které jsou obtížné nebo nemožné obrábět konvenčními metodami. Schopné vytvářet velmi složité geometrie s vysokou přesností, včetně složitých vnitřních prvků, a mohou dosáhnout vynikajících povrchových úprav a těsných tolerancí, často bez potřeby dalšího zpracování. Nekonvenční obrábění často

zahrnuje vyšší náklady na zařízení a nastavení. Na náklady je však efektivnější pro specializované aplikace a materiály, zejména při nízkém objemu nebo vysoce přesné práci. Tyto metody jsou energeticky náročnější kvůli specializovaným procesům a mají menší environmentální dopad, i když některé metody, jako je EDM, mohou ovlivňovat prostředí kvůli používání specializovaných plynů nebo kapalin. [3]



Obrázek 3 Princip laserového řezání [5]



Tabulka 1 Hlavní rozdíly mezi metodami konvenčního a nekonvenčního obrábění [3,4]

Rozdíl č.	Konvenční obrábění	Nekonvenční obrábění
1.	Řezný nástroj a obrobek jsou vždy ve fyzickém kontaktu a vzájemném relativním pohybu, což má za následek tření a opotřebení.	Mezi nástrojem a obrobkem není žádný fyzický kontakt, V některých nekonvenčních procesech dochází k opotřebení nástroje.
2.	Rychlost úběru materiálu je omezena mechanickými vlastnostmi obrobku.	NMO mohou obrábět obtížně a těžko řezatelné materiály jako je titan, keramika, SST, kompozity, polovodičové materiály.
3.	Relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem je typicky rotační nebo vratný. Tvar dílce je tedy omezen na kruhové nebo ploché tvary. Navzdory CNC systémům je výroba 3D povrchů stále obtížným úkolem.	Mnoho NMO je schopno vytvářet složité 3D tvary a dutiny.
4.	Obrábění malých dutin, štěrbin nebo průchozích otvorů je obtížné.	Obrábění malých dutin, štěrbin a výroba nekruhových, malých rozměrů s velkým poměrem stran, se vstupními úhlovými otvory jsou snadné pomocí NMO.
5.	Použití relativně jednoduchých a levných strojů s velice dostupnými řeznými nástroji.	Netradiční procesy vyžadují drahé nástroje a zařízení a kvalifikovanou pracovní sílu, což výrazně zvyšuje výrobní náklady.
6.	Náklady na provoz a náklady na údržbu jsou nízké.	Náklady na provoz a náklady na údržbu jsou vysoké.
7.	Tradiční postupy jsou dobře známy a fyzika procesu je dobře pochopena.	Mechaniky odstraňování materiálu některých z procesů NMO jsou stále předmětem výzkumu.
8.	Konvenční proces většinou využívá mechanické energie.	Většina NMO využívá energii v přímé formě. Například: laser, elektronový paprsek atd.
9.	Povrchová úprava a tolerance jsou omezena nepřesností obrábění.	Vysoká kvalita povrchu (až 0,1 mikronu) a tolerancí (25 mikronů).
10.	Vysoká rychlost úběru materiálu.	Nízká rychlost úběru kovu.

### 1.3 Proces mikro-obrábění u nekonvenčních obráběcích metod

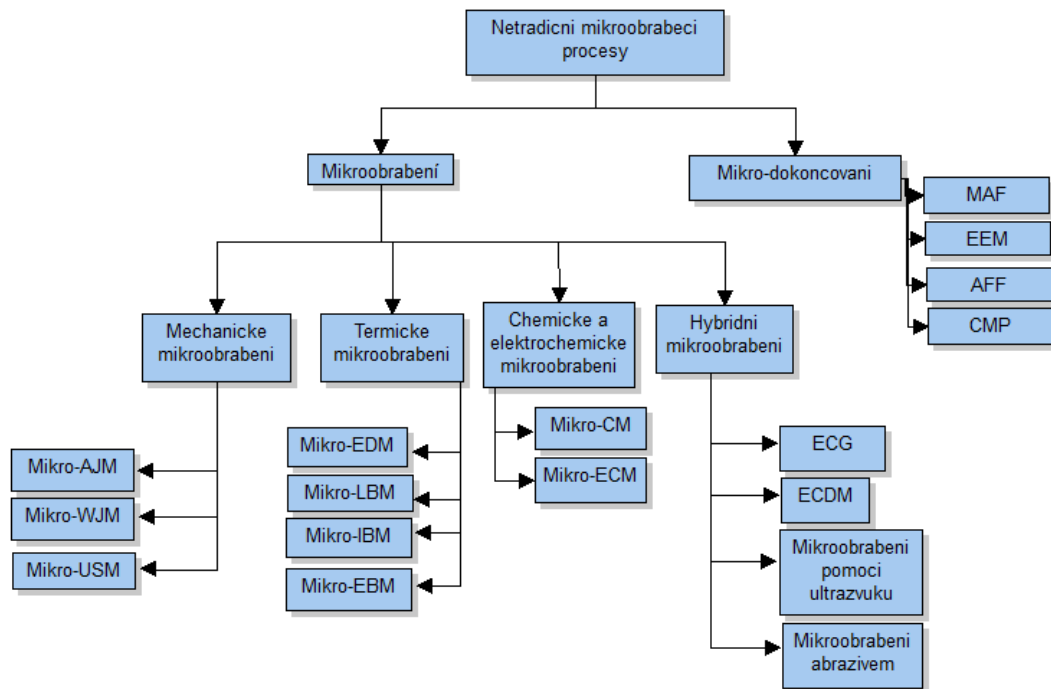
Tradiční i netradiční obráběcí procesy lze dále rozdělit do dvou oblastí: **makro-obrábění** a **mikro-obrábění**. Makro-obrábění se zabývá obráběním konstrukcí nebo dílů, které lze snadno vidět pouhým okem a lze je měřit jednoduchými technikami i stroji, které jsou obvyklé a snadno dostupné. Na druhé straně mikroobrábění zahrnuje ty techniky obrábění a mechanismy úběru materiálu, kde vyrobené díly nelze jasně pozorovat pouhým okem a mají rozměry v rozmezí mikronů (1–999  $\mu\text{m}$ ). Takové mikro prvky vyžadují po výrobě sofistikované techniky a nástroje pro jejich měření. [6]

**Podmínky a přístupy** k mikroobrábění musí být pro různé metody specifické a systematické. Tyto přístupy však mohou být korelovány a zaměřeny na mikroobrábění podle dvou zásad: [6]

- koncepce jednotkového úběru (UR), která je definována jako úběr materiálu za impuls nebo za jednotku času pro vytvoření nejmenších nastavitelných rozměrů mikroproduktu [6]
- požadavek přesného obráběcího zařízení pro získání požadovaného mikroproduktu s vyšší přesností, snížením rozměrové chyby úměrně velikosti mikroproduktů. [6]

Mikroobrábění je klíčové pro výrobu miniaturizovaných dílů v dnešním pokročilém světě, zahrnuje maloměřítkové frézování, vrtání a další operace pro vytváření složitých funkcí a povrchů až na úroveň mikronu. Tato technika umožňuje výrobu mikroelektromechanických systémů (MEMS), senzorů, lékařských zařízení a integrovaných obvodů pro elektroniku, což významně přispívá k různým oblastem, jako jsou letectví, medicína a elektronika. Přestože má mikroobrábění obrovský potenciál a prokázané schopnosti, průmyslové přijetí mikroobrábění čelí výzvám kvůli omezeným znalostem o obrábělnosti materiálů. Nicméně, pokračující výzkum a vývoj v procesech a zařízeních mikroobrábění jsou klíčové pro uspokojení rostoucí poptávky po miniaturizovaných produktech, nabízející výhody jako snížená spotřeba energie a použití materiálů. [6]

Na základě typu požadované energie, média přenosu energie, vlastního mechanismu a základních požadavků lze netradiční mikroobráběcí procesy klasifikovat jako mechanické mikroobrábění, tepelné mikroobrábění, chemické a elektrochemické mikroobrábění, hybridní mikroobrábění. [6]

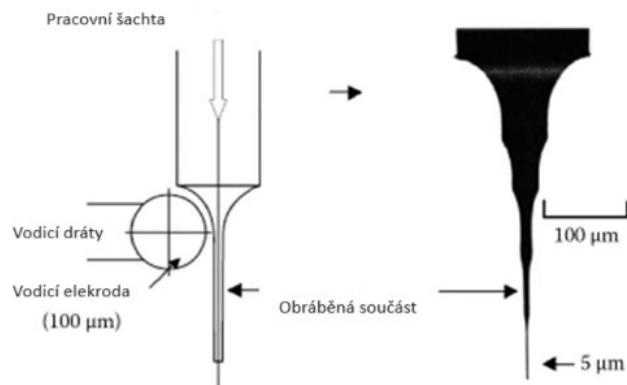


Obrázek 4 Rozdělení mikroobráběcích procesů [6]

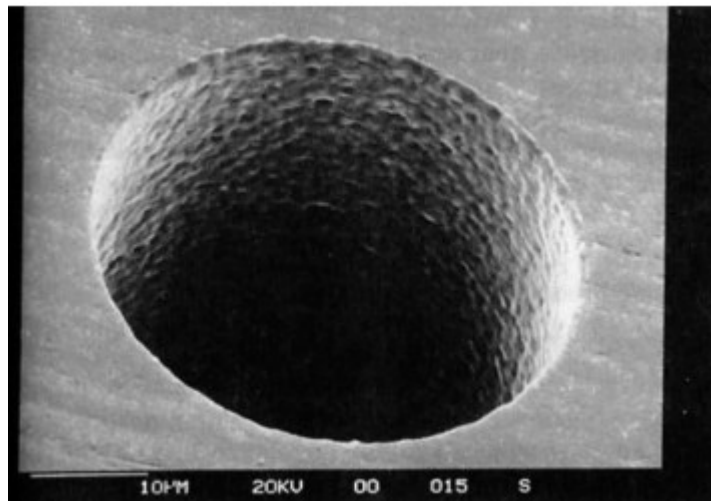
### 1.3.1 Mikro-obrábění pomocí tepelné eroze

Procesy tepelného mikroobrábění, jako je EDM (Obrábění elektrickým výbojem), LBM (Obrábění laserovým paprskem) a EBM (Obrábění elektronovým paprskem), odstraňují materiál z obrobku tavením nebo odpařováním prostřednictvím koncentrované tepelné energie. Tato technika dosahuje přesného úběru materiálu, aniž by byla ovlivněna mechanickými vlastnostmi obrobku, ale spíše jeho tepelnými charakteristikami, jako jsou body tání a varu. Mezi výhody patří minimální obráběcí síla, umožňující použití velmi tenkých nebo elastických obrobků a širší výběr nástrojových materiálů. Problémy však zahrnují potíže se specifikováním přesných rozměrů v důsledku toho, že mezi nástrojem a obrobkem nedochází ke kontaktu, a vytváření tepelně ovlivněné vrstvy na povrchu obrobku. [6]

Micro-EDM, specifická aplikace, vyniká ve vytváření malých a přesných prvků, jako jsou mikroelektrody a mikrootvory, prostřednictvím řízených elektrických výbojů. WEDG (Wire Electro Discharge Grinding) umožňuje výrobu složitých tvarů a komponentů s vysokým poměrem stran nezbytných pro různá průmyslová odvětví, včetně hlav inkoustových tiskáren a mikrofiltrů. [6]



Obrázek 5 Schéma mikro EDM [6]

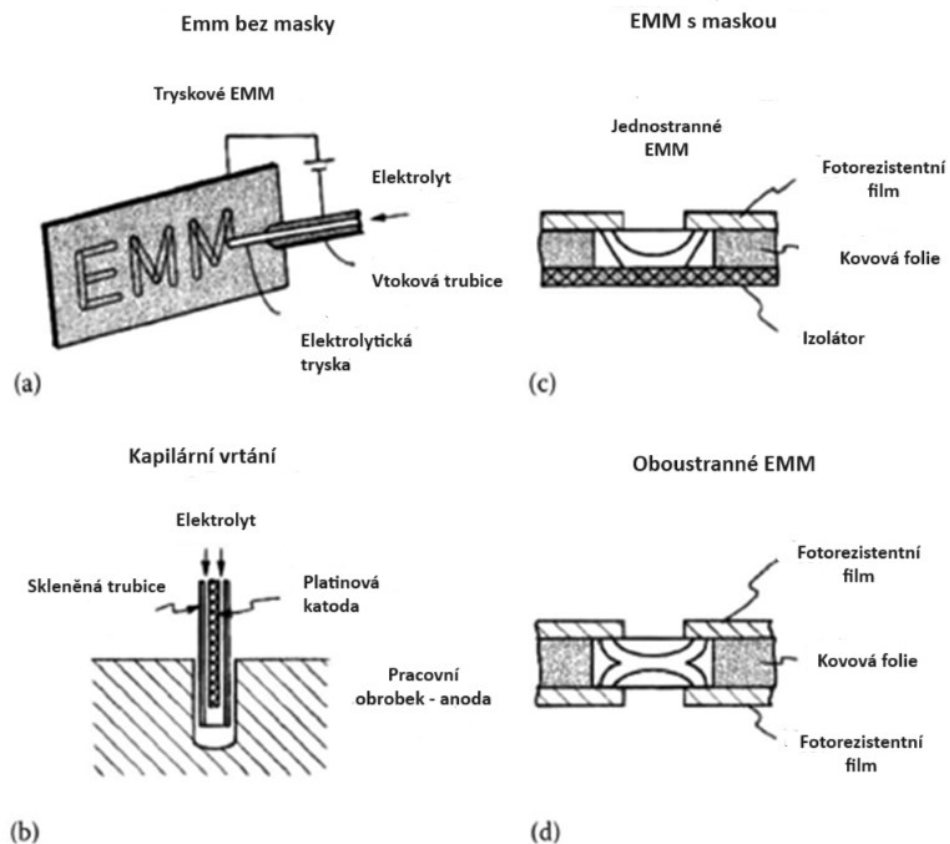


Obrázek 6 Inkoustová tryska vyrobená metodou micro-EDM die sinking [6]

Laserové mikroobrábění zaměřuje laserový paprsek na obrábění mikrootvorů a struktur s různou přesností. Různé lasery, včetně CO<sub>2</sub>, Nd:YAG a excimerových laserů, jsou určeny pro specifické aplikace od vrtání mikroděr až po mikrostrukturování povrchů pro různé aplikace, jako jsou lékařské přístroje a výroba polovodičů. Technologie nabízí přesnost, ale musí řídit tepelně ovlivněné zóny, aby byla zachována integrita obrobku. [6]

### 1.3.2 Mikro-obrábění elektrochemickou erozí

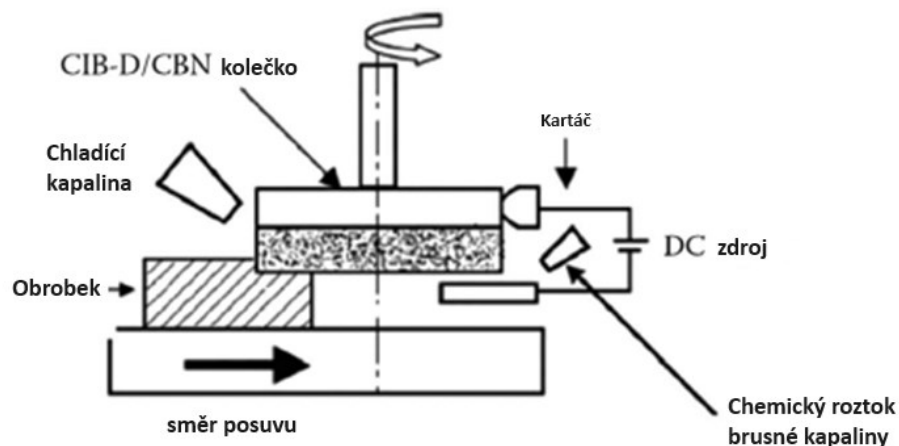
Mikroobrábění prostřednictvím elektrochemické eroze zahrnuje chemické a elektrochemické rozpouštění v kapalině za účelem odstranění materiálu z obrobků prostřednictvím iontových reakcí. Na rozdíl od konvenčního elektrochemického obrábění (ECM), kde je tvar obrábění určen tvarem elektrody, micro-ECM umožňuje přesnější úběr materiálu díky své schopnosti vytvářet hladké povrchy. Pomocí krátkých pulzů a nízkých proudů dosahuje micro-ECM jemné kontroly nad úběrem materiálu na mikroúrovni. Electrochemical Micromachining (EMM) aplikuje ECM na mikrovýrobu, včetně procesů bez masky nebo přes masku pro chemické reakce v atomovém měřítku. Fotochemické obrábění (PCM) a fotovýroba jsou procesy založené na masce pro vytváření tenkých nebo mělkých struktur, které jsou klíčové pro mikroelektronické obaly, senzory a mikroelektromechanické systémy. Tyto techniky nabízejí potenciál pro hromadnou výrobu, i když mnohé z nich stále nejsou vyvinuty pro velkoobjemovou výrobu. [6]



Obrázek 7 Různé typy bezmaskových (a, b) a průchozích masek (c, d) [6]

### 1.3.3 Hybridní mikro-obráběcí procesy

Hybridní mikroobráběcí procesy zlepšují povrchové úpravy v různých průmyslových odvětvích prostřednictvím specializovaných technik. Chemicko-mechanické leštění (CMP) využívá chemickou kaši na rotující podložce k leštění povrchů, což je klíčové v elektronickém průmyslu pro výrobu waferů a displejů. Mechanochemické leštění používá abrazivní prášky, které chemicky reagují s obrobkem, dosahující povrchů bez škrábanců jemnějších než 1 nm Ra, ideální pro silikonové wafery a keramiku. Elektrolytické obtékání během procesu (ELID) obtéká brusná kola elektrolyticky, aby udrželo ostré řezné hrany a zabránilo přilnavosti třísek, což poskytuje vysokou přesnost a hladké povrchy na keramice a optických materiálech s povrchovými úpravami mezi 0,011–0,36  $\mu\text{m}$  Ra. [6]



Obrázek 8 Princip elektrolytického obtékání [6]

## 1.4 Proces nano-obrábění u nekonvenčních obráběcích metod

Vývoj struktur s rozměry menšími než 100 nm je klíčový v oblastech fyziky, elektrotechniky, materiálové vědy, chemie a biologie, což otevírá cestu pro pokročilé výzkumné nástroje a zařízení napříč různými obory. Tato nanometrová fabrikace je nezbytná pro zlepšení základního porozumění a vytváření nových technologií pro komerční aplikace, zejména v elektronice, kde umožňuje hustější, rychlejší obvody a potenciálně nové kvantové zařízení. Avšak výzvy v návrhu obvodů, interakci zařízení, odvádění tepla a integraci obvodů musí být řešeny, aby bylo možné realizovat složité nanozařízení. Mimo elektroniku

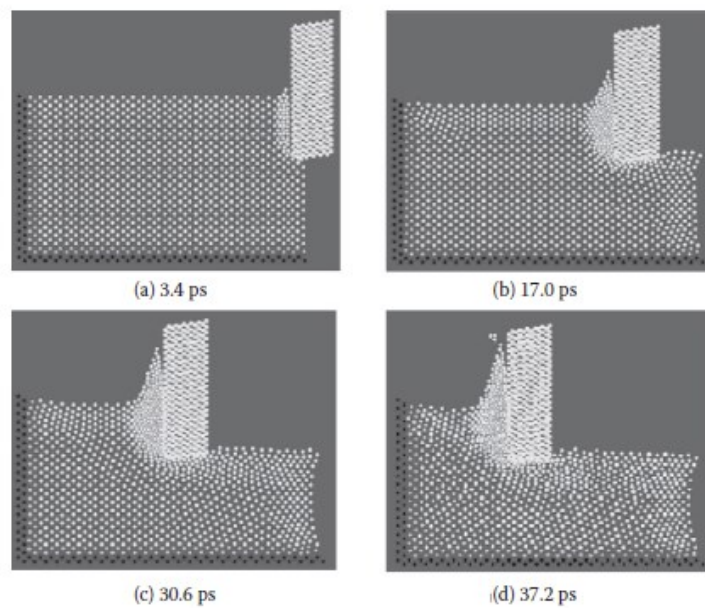
najdou nanostruktury uplatnění v ultramalých senzorech, optických prvcích a nástrojích pro biologii buněk, což podněcuje zájem o techniky nanofabrikace. [7,8]

#### 1.4.1 Mechanický úběr materiálu v nanometrii

Tato metoda využívá nástroje jako při běžném mechanickém obrábění k odstraňování materiálů v měřítku desítek nanometrů. Dráha a povrch nástroje určují tvar a kvalitu obrobku, který má být vyroben. Mechanické nanometrické obrábění je upřednostňováno před jinými metodami obrábění díky své schopnosti generovat složité trojrozměrné geometrické prvky v různých délkových měřítcích. Například mechanické nanometrické obrábění se používá k vytvoření mikroforem se složitými geometrickými a tvarovými rysy v nanometrickém měřítku. [7,8]

Nanometrické obrábění využívá přesné metody odstraňování materiálu k dosažení struktur s nanometrovou přesností, včetně deterministických a nemechanických technik. Mezi klíčové mechanické aplikace úběru materiálu, jako je jednobodové diamantové soustružení a ultrapřesné broušení, umožňují výrobu vysoce přesných mikroproduktů, které jsou klíčové pro komercializaci nanotechnologií. [7,8]

Tato oblast se primárně zaměřuje na pochopení rezných sil, energie a teploty, které jsou klíčové pro zlepšení stability obrábění, jakosti povrchu a trvanlivosti nástroje. Simulace molekulární dynamiky byly zásadní při identifikaci lineárního vztahu mezi reznými silami a hloubkou řezu a vlivu poloměru řezné hrany na výsledky obrábění. Tento proces složitě zahrnuje tvorbu třísky a generování povrchu, což zdůrazňuje roli minimální nedeformované tloušťky třísky – dosažitelné minimálně 1 nm – a kritického poloměru břitu pro optimální kvalitu obrábění. Mikrostruktura materiálů obrobků dále významně ovlivňuje přesnost a kvalitu obrábění, což vyžaduje výběr vhodných materiálů. Nanometrické obrábění se odlišuje od konvenčního obrábění díky svému jedinečnému rozsahu a specifickým fyzikálním jevům, které zahrnuje, což podtrhuje jeho kritickou roli při prosazování technik nanovýroby a přispívá k širší oblasti nanotechnologií. [7]

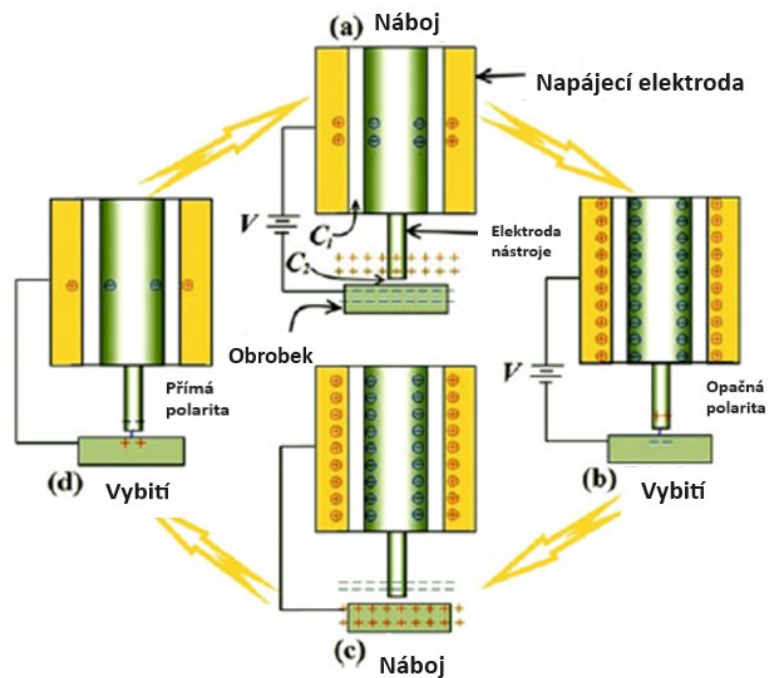


Obrázek 9 Molekulární dynamika procesu nanometrického obrábění [8]

#### 1.4.2 Nemechanické nanometrické obrábění

Tyto metody zahrnují mikroelektrické výbojové stroje (EDM) a obrábění fokusovaným iontovým paprskem atd., které jsou klíčové pro dosažení vysoké přesnosti u komponent na nanometrové úrovni. Nano-EDM využívá ultra-jemné výbojové pulzy a pokročilou technologii generátorů pulzů k dosažení vysoké přesnosti obrábění, snižuje velikost kráterů na méně než 100 nm a dosahuje povrchové drsnosti pod 10 nm. Nano-ECM s využitím ultra-krátkých pulzů umožňuje přesné odstraňování materiálu pro funkce menší než 100 nm, což zdůrazňuje jeho schopnost vytváření složitých nano-funkcí. Přes slibné pokroky obě metody vyžadují další výzkum pro plnou průmyslovou aplikaci, uprostřed širších výzev, kterým čelí pokročilé obráběcí procesy na nanometrové úrovni. [9]





Obrázek 10 Princip elektrostatičkého indukčního generátoru pulzů [9]

### 1.4.3 Litografické metody pro nanometrickou výrobu

Fotolitografie je klíčová metoda, využívá buď kontaktní nebo projekční tisk k přenosu vzorů na rezistový film. Kontaktní tisk čelí omezením způsobeným difrakcí a potenciálním poškozením mechanickým kontaktem, typicky dosahuje rozlišení mezi 0,5-0,8  $\mu\text{m}$  s UV světlem. Naopak projekční tisk, který promítá zmenšený obraz masky na rezist bez přímého kontaktu, umožňuje menší velikosti prvků a snadnější zarovnání. Tato metoda, zejména s použitím strojů typu step-and-repeat (stepper), se stala zásadní při výrobě integrovaných obvodů s rozlišením omezeným Rayleighovou difrakcí a zlepšeným buď zvýšenými numerickými aperturami nebo sníženými osvětlovacími vlnovými délkami. [9]

Rozvíjející se litografické technologie, jako je rentgenová litografie (XRL) a litografie s elektronovým paprskem (e-beam), posouvají hranice možností rozlišení a vzorování. XRL, zkoumající krátkovlnný limit, čelí problémům s výrobou masek a optikou vhodnou pro projekci masek. E-paprsková litografie, využívající fokusované elektronové paprsky k vytváření vzorů elektronově citlivých rezistových filmů, dosahuje schopností vysokého rozlišení a minimálního rozptylu, což je ideální pro vytváření nanostruktur a fotomasek navzdory jeho sekvenční povaze, která omezuje životaschopnost hromadné výroby.

Litografie s fokusovaným iontovým paprskem (FIB) nabízí další slibnou cestu pro nanostrukturování s výhodami v citlivosti na expozici a minimalizovaným rozptylem, ačkoliv poškození vzorku zůstává problémem. Společně tyto litografické pokroky podtrhují pokračující vývoj výrobních technik, které jsou klíčové pro další generaci mikroelektronických zařízení a výzkum v nanoměřítku. [8,9]

## 2 TECHNOLOGIE NEKONVENČNÍHO OBRÁBĚNÍ

Moderní nebo netradiční výrobní procesy jsou definovány jako skupina procesů, které odstraňují přebytečný materiál různými technikami zahrnujícími mechanickou, tepelnou, elektrickou nebo chemickou energii nebo kombinaci těchto energií, ale nepoužívají ostré řezné nástroje, které je třeba použít pro tradiční výrobní procesy. Extrémně tvrdé a křehké materiály se obtížně obrábějí tradičními obráběcími procesy, jako je soustružení, vrtání, tvarování a frézování. Netradiční obráběcí procesy, nazývané také pokročilé výrobní procesy, používáme tam, kde tradiční obráběcí procesy nejsou proveditelné, uspokojivé nebo ekonomické ze speciálních důvodů, jak je uvedeno níže. [10]

- Velmi tvrdé křehké materiály obtížně upínatelné pro tradiční obrábění
- Když je obrobek příliš pružný nebo štíhlý
- Když je tvar součásti příliš složitý

Netradiční obráběcí metody (NTM) jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1.1 se kategorizují podle typu energie využívané pro odstranění materiálu z obrobku. Tyto metody lze rozdělit do tří hlavních skupin: [10]

### 2.1 Mechanická energie:

Zahrnuje využití fyzikální síly pro odstranění materiálu, jako jsou ultrazvukové obrábění (USM), abrazivní průtokové obrábění (AFM), magnetické abrazivní dokončování (MAF), obrábění abrazivním paprskem (AJM), obrábění vodním paprskem (WJM) a abrazivní vodní paprsek obrábění (AWJM). Tyto procesy se vyznačují použitím mechanické energie, jako je vysokorychlostní proud vody nebo abraziva, pro erodování nežádoucího materiálu. [10]

Mezi nejvíce využívané a stále se rozvíjející metody tohoto energetického typu úběru materiálu patří:

#### 2.1.1 Obrábění ultrazvukem

Ultrazvukové obrábění (USM) je netradiční proces mechanického odstraňování materiálu, který využívá vysokofrekvenční mechanický pohyb, tvarovaný nástroj a brusnou kaši k erozi tvrdých nebo křehkých obrobků. Tento proces je zvláště výhodný pro obrábění materiálů, se kterými je obtížné pracovat pomocí konvenčních výrobních metod, jako jsou monokrystaly, skla a polykrystalická keramika. USM se vyznačuje oscilací nástroje při nízkých

amplitudách (25-100  $\mu\text{m}$ ) a vysokých frekvencích (15-30 kHz) pro pohánění brusiva obsaženého v kaši proti obrobku, což usnadňuje složité tvary a profily. [10]

- **Princip:**

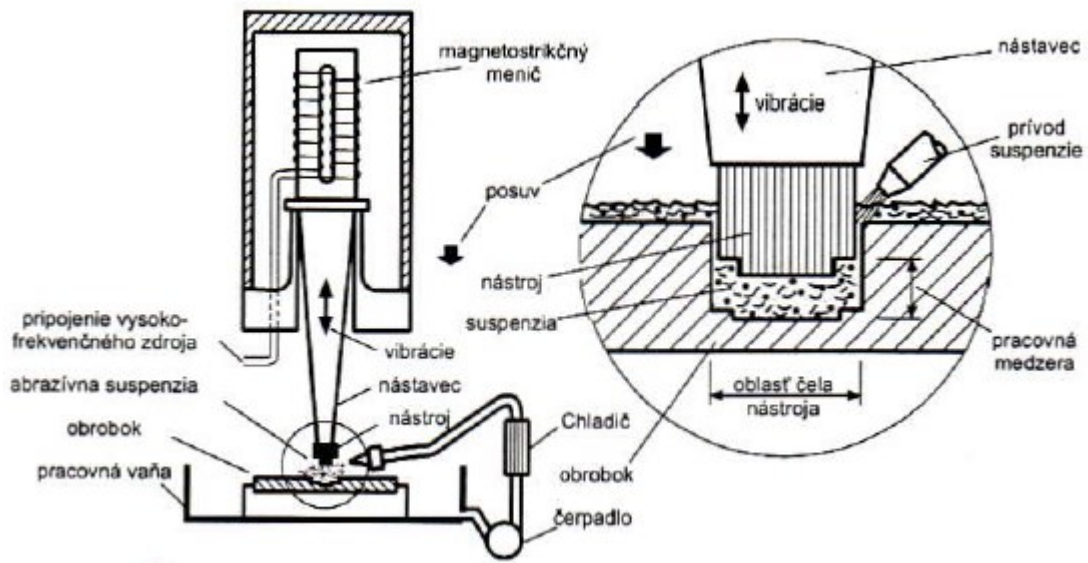
USM, vyvinutá v 50. letech 20. století, původně pro konečnou úpravu povrchů zpracovávaných elektroerozivním obráběním (EDM), funguje na principu vyvolání křehkého lomu, kavitační eroze a chemické eroze prostřednictvím nárazu a vtlačení brusných zrn. Výsledkem procesu je úběr materiálu primárně prostřednictvím vtlačování tvrdých brusných zrn na křehký pracovní materiál, doplněný nárazovou erozí. Materiály nástrojů jsou vybírány pro jejich tažnost, houževnatost a pevnost, aby se zabránilo křehkému selhání při vtlačení brusnými zrn. [10]



Obrázek 11 Princip metody USM [4]

- **Zařízení:**

U zařízení pro USM patří mezi klíčové komponenty systém čerpadlo pro dodání a odvod suspenze, podávací mechanismus pro působení síly směrem dolů na nástroj, magnetostrikční měnič pro generování ultrazvukových vibrací a koncentrátor pro zesílení těchto vibrací. Převodníky mohou pracovat na základě piezoelektrických, magnetostrikčních nebo elektrostrikčních efektů, přičemž nejrobustnější jsou magnetostrikční typy. Nástavec, který může mít různý tvar, slouží ke koncentraci, vedení a zesílení vibrací na nástroj. [10]



Obrázek 12 Schéma zařízení USM [4]

- **Využití:**

Procesní proměnné USM zahrnují amplitudu a frekvenci vibrací, podávací sílu a tlak, velikost abraziva a materiál a sílu toku a kontaktní plochu materiálů obrobku i nástroje. Aplikace USM se rozšiřují na obrábění různých tvrdých a křehkých materiálů včetně kovových slitin, polovodičů, skla, keramiky a karbidů, vhodných pro vytváření složitých tvarů otvorů a povrchových otisků bez změny mikrostrukturních, chemických nebo fyzikálních vlastností obrobku. [10]

- **výhody a nevýhody:**

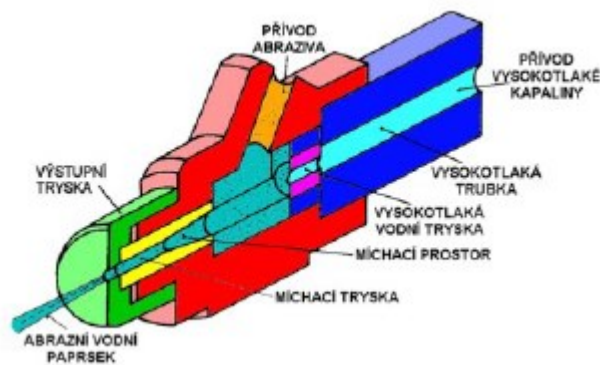
Mezi hlavní výhody USM patří jeho použitelnost na jakýkoli materiál bez ohledu na elektrickou vodivost, vhodnost pro křehké materiály, vynikající povrchová úprava a zachování integrity obrobku bez zavádění tepelného, elektrického nebo chemického namáhání. Tento proces je však spojen s vyšší spotřebou energie, rychlým opotřebením nástrojů a omezeními v oblasti obrábění a hloubky ve srovnání s tradičními výrobními procesy. [10]

### 2.1.2 Technologie abrazivního vodního paprsku

Řezání abrazivním vodním paprskem (AWJM) představuje pokročilou iteraci obrábění vodním paprskem, která integruje abrazivní částice, jako je karbid křemíku nebo oxid hlinitý, aby se zvýšila rychlost úběru materiálu nad míru dosažitelnou při samotném obrábění vodním paprskem. Tato metoda umožňuje řezání širokého spektra materiálů, od tvrdých křehkých látek, jako je keramika, kovy a sklo, až po extrémně měkké materiály, jako je pěna a pryž. Přesnost a účinnost řezání abrazivním vodním paprskem je podpořena jeho úzkým řezným proudem a počítačem řízeným pohybem, díky čemuž je zvláště vhodný pro materiály, které jsou citlivé na teplo nebo nemohou být zpracovány laserem nebo metodami tepelného řezání. [10]

- **Princip:**

Princip řezání abrazivním vodním paprskem spočívá v urychlení abrazivních částic nosným plynem nebo vzduchem na vysoké rychlosti, což umožňuje úběr materiálu mikrořezáním a křehkým lomem. Všeestrannost tohoto procesu je demonstrována jeho schopností řezat kovové, nekovové a pokročilé kompozitní materiály různých tloušťek, aniž by došlo k tepelnému poškození. [10]

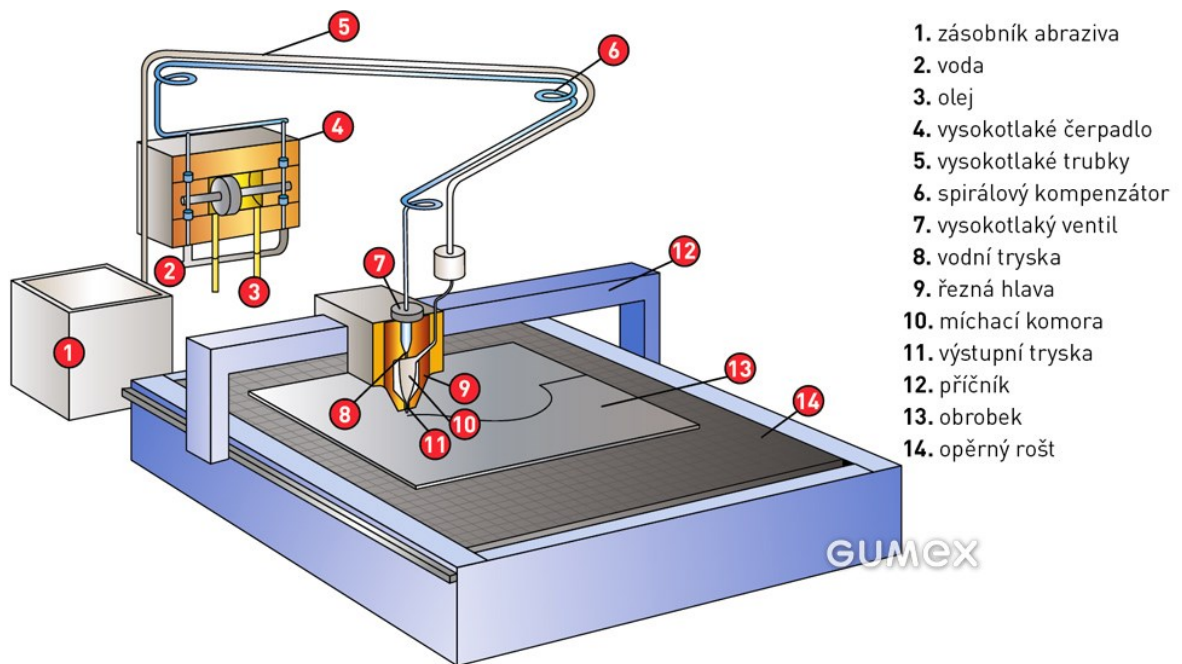


Obrázek 13 Schéma technologie AWJM [4]

- **Zařízení:**

Uspořádání technologie abrazivního vodního paprsku (AWJM) zahrnuje vzduchový kompresor, regulátor tlaku, filtry a směšovací komoru, kde se abrazivní částice mísí s nosným plynem předtím, než jsou nasměrovány na obrobek. Provozní účinnost je

závislá na několika parametrech, včetně typu, tvaru, velikosti a hmotnostního průtoku abraziva, stejně jako složení, tlaku a průtoku nosného plynu. [10]



Obrázek 14 Průběh řezání vodním paprskem [11]

- **Procesní parametry:**

Klíčové parametry ovlivňující rychlost úběru materiálu zahrnují hmotnostní průtok abraziva, vzdálenost hrotu trysky, tlak plynu, rychlost abrazivních částic, směšovací poměr a velikost brusného zrna. Každý z těchto faktorů hraje rozhodující roli při určování účinnosti, přesnosti a povrchové úpravy procesu řezání. [10]

- **Aplikace, výhody a omezení:**

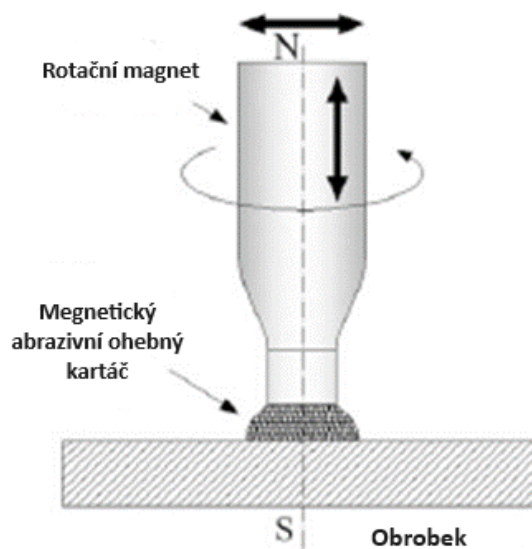
Řezání abrazivním vodním paprskem je široce používáno v leteckém, automobilovém a elektronickém průmyslu díky svým četným výhodám, jako jsou minimální nebo žádné požadavky na sekundární dokončování, absence zkreslení způsobeného frézou, nízké řezné síly a schopnost produkovat přesné vícenásobné - rovinné řezy bez ovlivnění strukturální integrity materiálu. Proces navíc eliminuje tepelně ovlivněné zóny a tím zachovává vlastnosti materiálu. [10]

Navzdory svým výhodám má metoda omezení, včetně neschopnosti vrtat plochá dna a řezat materiály, které se po vystavení vlhkosti rychle zhoršují. Kromě toho se může

povrchová úprava zhoršovat při vyšších řezných rychlostech a proces je spojen s vysokými investičními náklady a provozními hladinami hluku. [10]

### 2.1.3 Magnetické abrazivní dokončování

Magnetické abrazivní dokončování (MAF) je efektivní metoda pro odstranění nepravidelných topografií povrchu s využitím magnetických a abrazivních vlastností. Magnetické částice smíchané s abrazivem jsou považovány za magnetický kartáč. Magnetické pole v MAF přitahuje magnetické abrazivní částice k vnitřní stěně obrobku. Tím se koncentrace směsi magnetických abrazivních částic u stěny obrobku zvyšuje oproti zbytku média. Tato koncentrovaná směs zvyšuje radiální sílu působící na magnetické abrazivní částice, což vede k vyšší hloubce řezu, lepší rychlosti odstraňování materiálu a kvalitě povrchové úpravy ve srovnání s běžným abrazivním tokem. [10]



Obrázek 15 Schéma technologie MAF [6]

Během dokončovací operace tento proces nevytváří vibrace ani chvění a není omezen na žádný typ obrobků. Také má schopnost snížit drsnost povrchu z několika mikronů na nano úroveň během několika minut. Navíc různě složité povrchy lze tímto procesem taktéž snadno dokončit. Schéma MAF ukazuje schopnost procesu vytvářet hladší vnější povrchy na optice, turbínových lopatkách, řezných nástrojích atd. a vnitřní povrchy na kapilárních trubicích, zakřivených potrubích atd. Proces také může leštit různé magnetické materiály jako železo,



kobalt, nikl atd., stejně jako nemagnetické materiály jako sklo, keramiku, nerezovou ocel, měď ekonomicky a efektivně. Tento proces je vhodnou kombinací homogenní směsi abrazivních částic a magnetických částic v magnetickém poli s obráběcí silou pro dokončovací operaci. V současné době se procesy dokončování s pomocí magnetického pole stávají atraktivnějšími pro jejich širokou aplikaci v oblastech medicínských komponent a optických dílů. Nicméně, MAF stále má některé problémy s jemným dokončením na nanometrové úrovni plochých a mikrokompexních povrchů tvrdších pracovních materiálů. [12]

## 2.2 Chemická a elektrochemická energie:

Při tomto procesu dochází k erozi materiálu mechanismem vytěšňování iontů nebo chemickým rozpouštěním pomocí chemických činidel nebo leptadel (kyseliny, alkalické roztoky). Tento proces vyžaduje vysoký proud jako zdroj energie a elektrolyt jako médium, ve kterém proces probíhá. Za účelem zlepšení schopností stroje a zvýšení účinnosti procesu se kombinují různé formy energie a vyvíjí se hybridní proces kombinující chemické a jiné druhy obrábění. Mezi obráběcí procesy, které zahrnují chemickou či elektrochemickou energii, patří: [10]

### 2.2.1 Elektrochemické obrábění

ECM představuje beztržkovou metodu pro zpracování elektricky vodivých materiálů, založenou na principu elektrolyzy. [6,10]

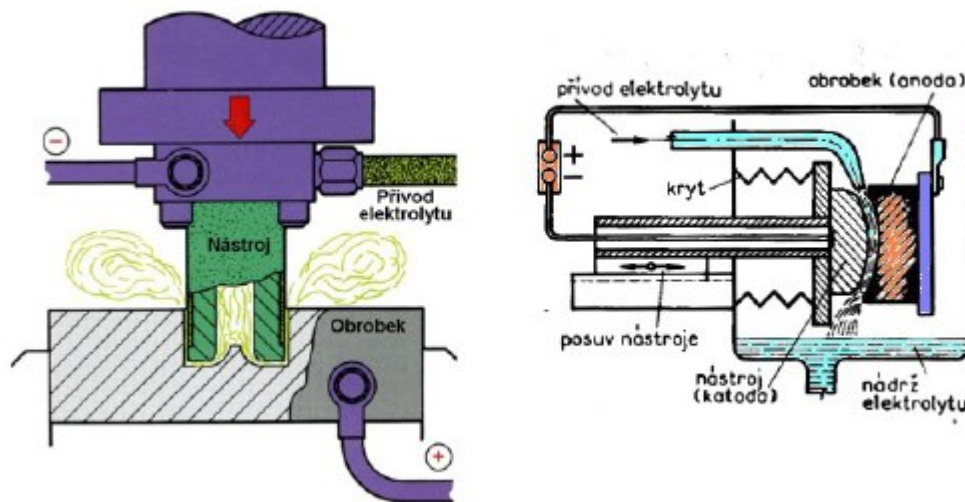
- **Princip:**

Základní principy ECM (Electrochemical machining) jsou určeny Faradayovými zákony, teorií elektrolytů a termodynamikou galvanických článků. Tento proces využívá elektrolyt jako např. NaCl, NaNO<sub>3</sub>, HCl a zahrnuje postupné odstraňování kovu z anody respektive obrobku reakcí s kationty elektrolytu, čímž se umožňuje přesné formování obrobku podle tvaru katody neboli nástroje. Efektivita a přesnost ECM závisí na řadě parametrů, včetně teploty, složení elektrolytu, pracovní mezeru mezi elektrodami a rychlost proudění elektrolytu. [10]

- **Aplikace a výhody:**

ECM se aplikuje v různých technologických procesech, jako je hloubení dutin, vrtání malých průměrů, odstraňování otřepů, dělení materiálů, a kombinuje se i s mechanickými metodami úběru pro broušení, lapování a honování. Specifické

aplikace zahrnují elektrochemické leštění pro zlepšení povrchové kvality a elektrochemické značení pro aplikace s požadavkem na vysokou přesnost. Kromě toho, kombinované metody, jako je anodomechanické dělení, rozšiřují možnosti využití ECM tím, že kombinují elektrochemické a mechanické účinky pro zvýšení efektivity a přesnosti obrábění. [10]



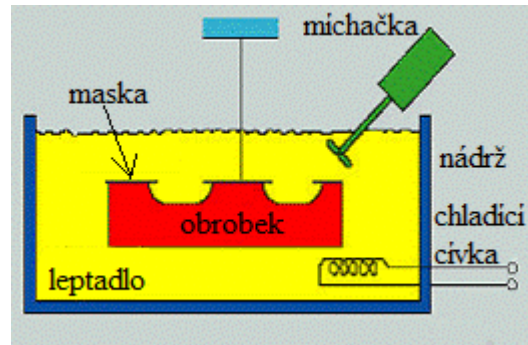
Obrázek 16 Schéma technologie ECM [4]

### 2.2.2 Chemické obrábění

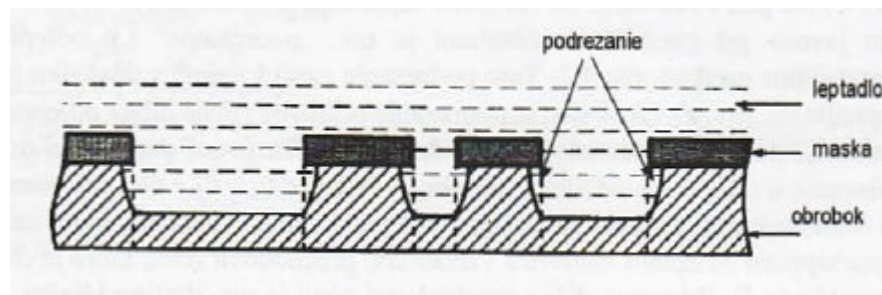
Technologie chemického obrábění využívá chemické reakce pro řízený úběr materiálu z povrchu obrobku, a je vhodná pro leptání a termické odstraňování otřepů, kde tepelný efekt chemických reakcí umožňuje efektivní odstranění nežádoucích materiálů bez mechanického zásahu. Dále se dělí na: [10]

#### Chemické frézování

Chemické frézování je proces leptání používaný pro přesné modelování kovových dílů. Obráběné části jsou ponořeny do leptacího roztoku nebo jím stříkány. Jeho složení a koncentrace jsou vybírány tak, aby byl kov odebírán v množství přibližně 0,025 mm/min. Části, které nemají být odstraněny, jsou chráněny vhodným materiálem, tzv. maskou; jsou to materiály na bázi laků, pryskyřic, gemy, plastů. [10]



Obrázek 17 Schéma pro proces chemického obrábění [4]



Obrázek 18 Princip chemického obrábění [2]

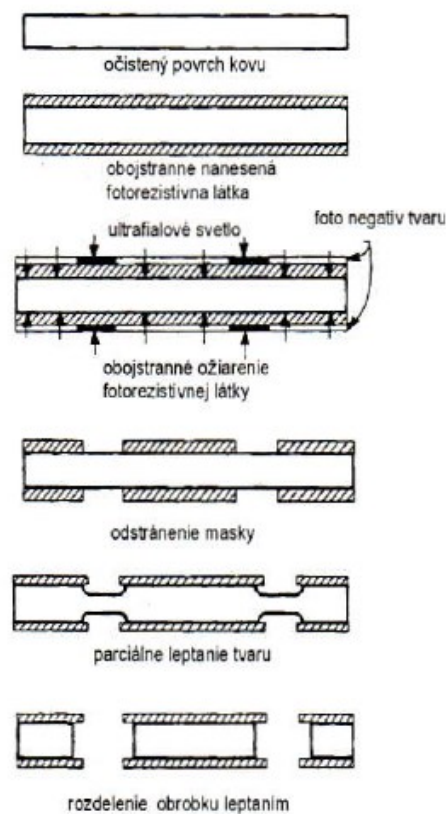
### Fotochemické obrábění

Fotochemické obrábění nebo leptání (PCM Photochemical Machining) je modifikace chemického frézování, při kterém je materiál odstraňován z povrchu fotografováním. Je vhodné pro přesné tvarování kovových i nekovových materiálů díky svým specifickým výhodám, jako je: [10]

- tvarování mimořádně tenkých materiálů např. fólií
- opracování tvrdých a křehkých materiálů, kde by mechanické obrábění mohlo způsobit poškození (lom, koncentrace napětí v podpovrchových vrstvách)
- výroba dílů, které musí být bez ostrých hran
- výroba mimořádně složitých tvarů
- výroba vývojových prototypů a modelů, kde je potřeba rychlé a levné zhotovení modelů (technologie Rapid Prototyping),
- výroba mikrokomponent a využití v oblasti nanotechnologií.

Použití PCM technologie je vhodné pro relativně tenké materiály s tloušťkami v rozmezí 0,003 až 1,27 mm. Omezení tloušťky materiálu je spojeno s požadovanými tolerancemi rozměrů. Faktory, které ovlivňují přesnost rozměrů při fotochemickém obrábění, jsou: [10]

- druh zpracovávaného materiálu
- předepsané rozměry hotového dílu
- přesnost tvaru vytvořeného fotonegativu
- přesnost procesu maskování a leptání



Obrázek 19 Schéma Fotochemického obrábění [2]

### Termické odstraňování otřepů

Tento chemicko-tepelný proces (TEM) odstraňuje otřepy z obrobků, které jsou umístěny ve uzavřené komoře, působením jednorázové tepelné vlny o teplotě 3 000 až 3 300°C. Tepelná vlna vzniká při zapálení směsi vodíku a kyslíku, obvykle v poměru 2:1 nebo 1:1 a působí velmi krátkou dobu, asi 2 až 3 milisekundy. Zapálení směsi je provedeno elektrickou jiskrou. [10,12]

Pro otřepy je charakteristické, že mají malý poměr hmotnosti k povrchu ve srovnání s celým obrobkem. To umožňuje, že se za velmi krátký čas ohřejí na reakční teplotu a spolu s přebytečným kyslíkem shoří na oxidy kovů. Vznikající oxidy kovů se ukládají na stěnách komory nebo i na povrchu obrobků, odkud jsou odstraněny vodním roztokem. Oceli, které po odstranění otřepů budou dále tepelně zpracovávány, není nutné oplachovat. [10,12]

Pro správnou funkci procesu TEM je nutné zachovat rozdíl v poměrech mezi povrchem a hmotností obrobku a otřepu, aby ohřátí povrchu obrobku během procesu nepřesáhlo teplotu 100 °C. [10,12]

Dílce mohou být kovové i nekovové materiály, také plasty a guma. Ukládají se do tlakové komory, kde se otřepy dokonale odstraní nebo vypaří ze všech částí. Původní vlastnosti materiálu i tvar zůstávají zachovány, protože obrobek v tak krátkém čase není schopen absorbovat tolik tepla, které by podstatně ovlivnilo jeho mechanické i tvarové parametry. [10,12]

Termické odstraňování otřepů je široce použitelný proces, ale nemůže být považován za univerzální náhradu mechanického odstranění otřepů. [10,12]

Mezi hlavní výhody procesu patří vysoká automatizace procesu, flexibilita při přestavování na jiný tvar dílce, spolehlivost při odstraňování dutin a hlubokých otvorů. [10,12]

## **2.3 Tepelná nebo elektrotepelná energie:**

Tepelná energie se využívá k roztavení a odpařování malých oblastí pracovní plochy koncentrováním tepelné energie, jako je teplo vyvinuté v důsledku vysokého napětí, zesíleného světla nebo ionizovaného materiálu. Do této skupiny patří: [10]

### **2.3.1 Elektroerozivní obrábění:**

Elektroerozivní metody obrábění vodivých materiálů jsou založeny na využití tepelné energie, která se transformuje z elektrického výboje vznikajícího mezi elektrodami respektive nástrojem a obrobkem. V závislosti na typu elektrického výboje, jiskře a/nebo oblouku, parametrech obrábění a zdrojích impulsního proudu existuje několik způsobů elektroerozivního obrábění. [10]

V současnosti se elektroerozivní klasifikuje se podle jeho technologických možností:

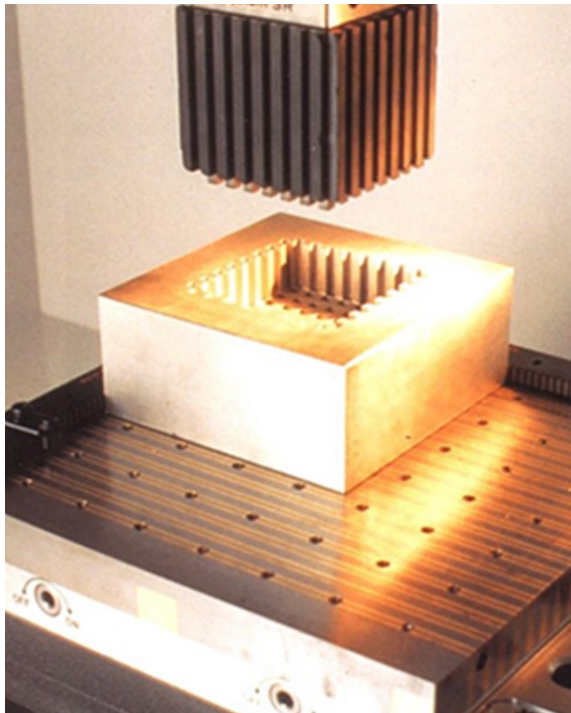
- hloubení, neboli tvarové elektroerozivní obrábění (EDM Sinking),
- drátové řezání (WEDM - Wire Electrical Discharge Machining),

- broušení (EDG - Electrical Discharge Grinding).

Každá metoda se liší počátečními technologickými charakteristikami, používaným zařízením a oblastí průmyslového využití.

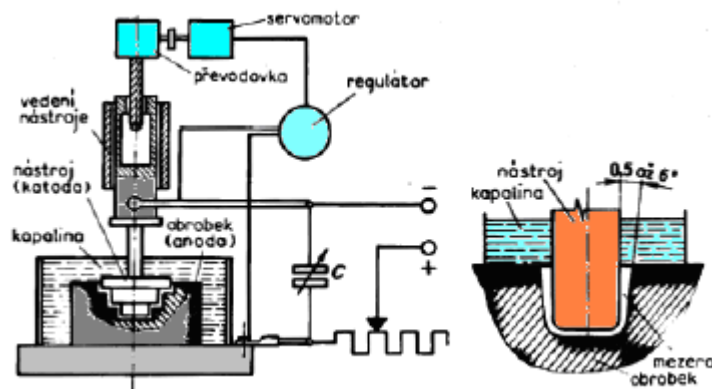
**Princip:**

Elektroerozivní nebo elektrojiskrové obrábění je technologický proces, při kterém k odstranění materiálu dochází elektricky, pomocí rychle se opakujících periodických impulsů jiskrového výboje za přítomnosti dielektrika. Mikročástice ve formě dutých kuliček jsou odstraněny z materiálu tavením a odpařováním. Produkty elektrolyzy jsou z mezery mezi nástrojem a obrobkem odnášeny pomocí dielektrické kapaliny, která mezi nimi proudí. [10]



Obrázek 20 Elektrojiskrové hloubení [4]

Obrobek, jedna z elektrod, mezi kterými probíhá výboj, musí být z elektricky vodivého materiálu. Druhá elektroda (nástroj), také z vodivého materiálu, je umístěna v těsné blízkosti obrobku, ale není s ním v kontaktu. Pro technologii hloubení se používají jako nástroje tvarové elektrody, které jsou posouvány směrem do obrobku a vytvářejí požadovaný profil, čímž se dosahuje trojrozměrného obrábění. [10]



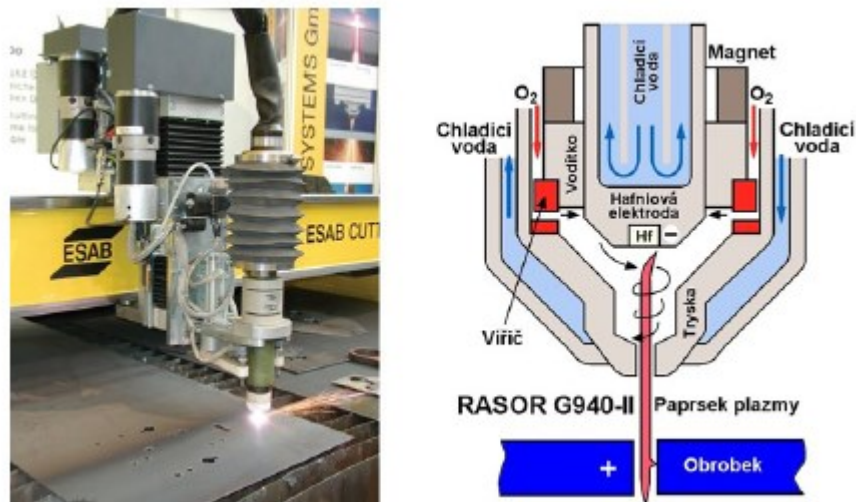
Obrázek 21 Schéma principu hloubení [4]

### 2.3.2 Obrábění plazmou

Plazmové obrábění představuje sofistikovanou techniku, která využívá vlastnosti plasmy k efektivnímu zpracování materiálů. Plasma, definovaná jako vodivý stav plynu charakterizovaný přítomností volných elektronů a iontů, dosahuje během procesu extrémně vysokých teplot, mnohdy až do 30 000°C. Tato metoda zahrnuje použití plazmatického paprsku generovaného plazmovým hořákem, který materiál nejenže rychle odtavuje, ale také odpařuje a rozprašuje. [10]

Jedná se o vysoce intenzivní proces, při kterém dochází k rychlému odtavení částic materiálu. Díky této intenzitě je tepelně ovlivněná vrstva materiálu obvykle méně než 1 mm, což minimalizuje potenciální tepelné poškození a umožňuje vyšší úroveň detailu a přesnosti. Avšak, je důležité poznamenat, že přesnost plazmového obrábění je typicky srovnatelná s hrubovacími operacemi, což naznačuje, že metoda je vhodnější pro hrubé tvarování než pro dokončovací práce vyžadující vysokou přesnost. [10]

Plazmové obrábění tedy představuje unikátní spojení fyzikálních principů a inženýrského designu, nabízí řadu výhod včetně rychlosti a efektivity při zpracování různých materiálů. Tato metoda nachází uplatnění v různých průmyslových odvětvích, kde jsou požadovány specifické charakteristiky materiálů a kde je klíčová efektivnost zpracování. [10]

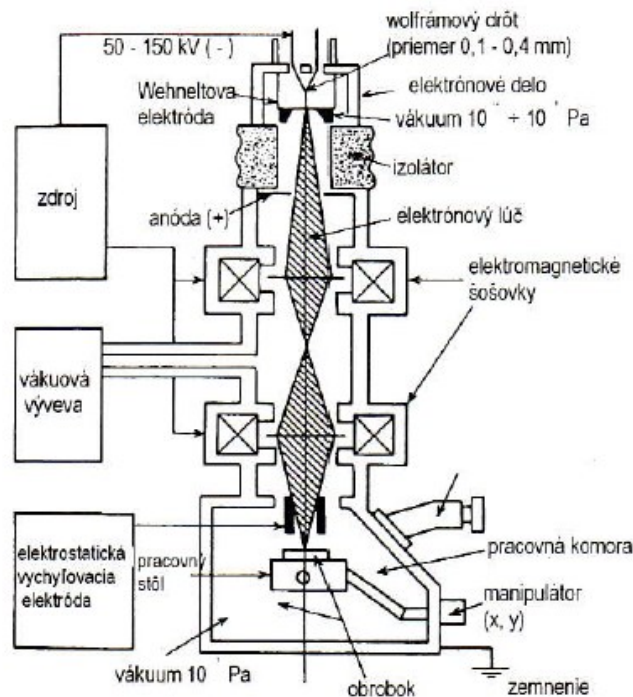


Obrázek 22 Proces řezání plazmou a schéma plazmového hořáku [4]

### 2.3.3 Obrábění elektronovým paprskem

Obrábění elektronovým svazkem (EBM - Electron Beam Machining) představuje pokrokový výrobní proces, zejména v oblasti mikroobrábění. Tento proces využívá kinetickou energii zrychlených elektronů, která se při nárazu na materiál přeměňuje na tepelnou energii schopnou materiál roztavit a odpařit na místě dopadu. Proces probíhá ve vakuu a jeho fyzikální základy byly položeny několika významnými fyziky, včetně Sira Williama Crookesa a J.J. Thomsona, od konce 19. století. [10]





Obrázek 23 Schéma procesu EBM [2]

**Princíp:**

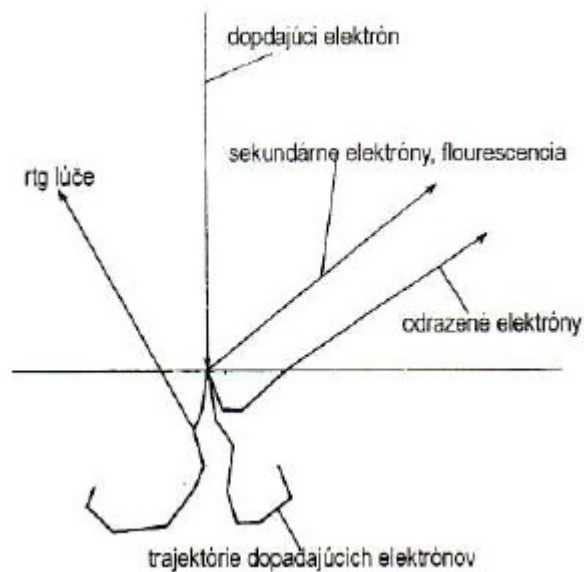
Elektron, elementární částice s hmotností  $m = 9,109 \times 10^{-31}$  kg a záporným nábojem  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C, je součástí atomu. Počet elektronů v atomu závisí na chemickém prvku a je určen atomovým číslem v periodické tabulce prvků. [10]

Emise elektronů, tj. vypuštění elektronů z povrchu pevných látek a kapalin, nastává překonáním potenciální bariéry mezi kovem a prostředím. K překonání této bariéry je nutné dodat elektronům energii nazývanou výstupní práce. [10]

Výstupní práce je množství energie potřebné k přemístění elektronu z Fermiho hladiny na hladinu vakua nebo do okolí povrchu ve vzdálenosti 10 cm. Tato práce je rozdílem mezi energií volného elektronu  $E$  a Fermiho energií  $E_F$  a určuje pravidla pro emisi elektronů z kovu za daných fyzikálních podmínek. [10]

Elektrony se uvolňují, když dosáhnou alespoň energie rovnající se výstupní práci. V závislosti na typu dodané energie (tepelná, tok fotonů, tok elektronů) rozlišujeme termoemisi, fotoelektronovou emisi nebo sekundární emisi. Pro generování toku elektronů potřebných pro technologii EBM se využívá termoemise. [10]

Volné elektrony mohou být poháněny, fokusovány a řízeny působením elektrického nebo magnetického pole. [10]



Obrázek 24 Mechanismus dopadu elektronů na povrch [2]

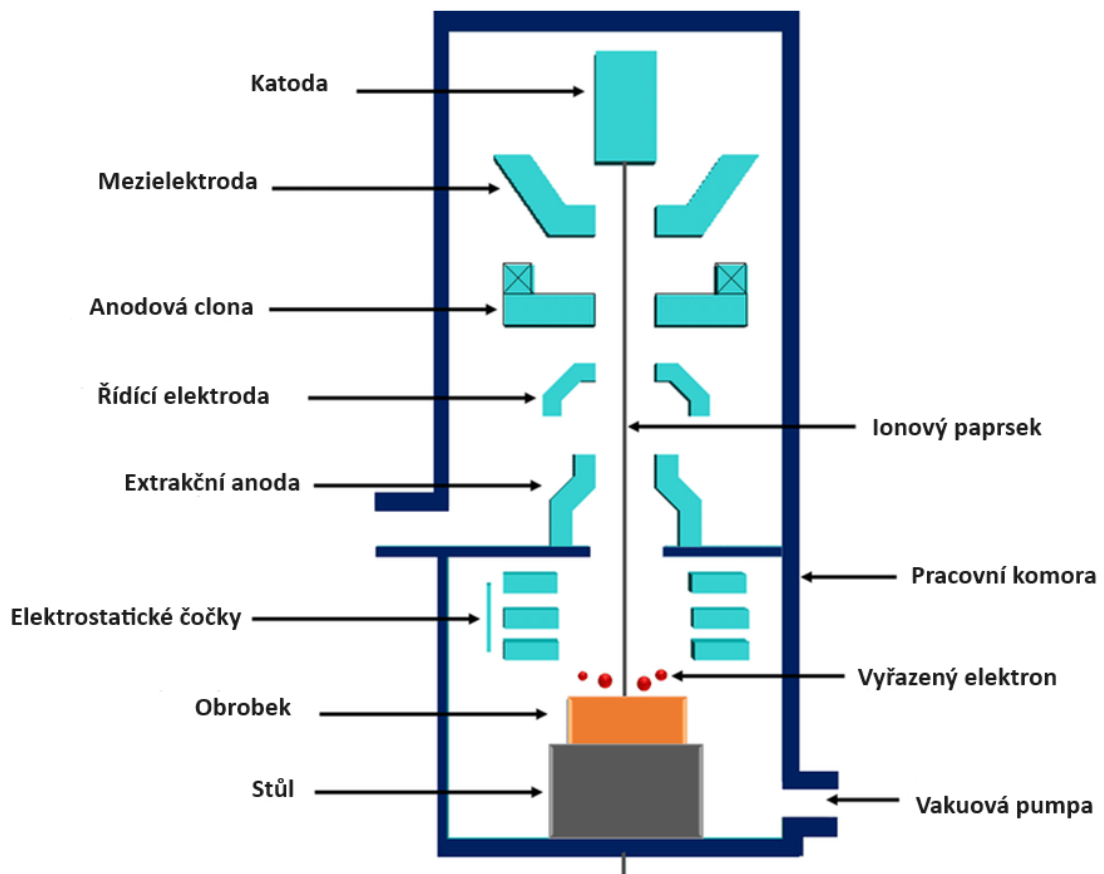
### 2.3.4 Obrábění iontovým paprskem

Technologie zpracování iontovým paprskem, známá také pod označením IBM (Ion Beam Machining), se v posledních letech rychle vyvíjí, zejména v kontextu výroby polovodičů a integrovaných obvodů v elektrotechnickém průmyslu. Tato technologie nicméně nachází uplatnění i v čistě strojírenské výrobě. Využívá se ve třech hlavních oblastech materiálového zpracování: odstraňování materiálu, nanášení tenkých vrstev a modifikace povrchu. IBM je proces prováděný ve vakuu, kde nabité částice, respektive ionty z iontového zdroje bombardují povrch cílového materiálu pod vysokým urychlovacím napětím. Mechanismus odstraňování materiálu v procesu IBM se liší od toho, který je charakteristický pro zpracování elektronovým paprskem. Tento proces je úzce spojen s jevem rozprašování (sputtering). [13]

Procesy zpracování materiálů iontovým paprskem lze klasifikovat jako dynamické nebo reaktivní. Dynamické procesy zahrnují rozprašování, smíšení, leštění, nanášení vrstev a chemické leptání s asistencí iontového paprsku. Reaktivní procesy využívají chemicky aktivní ionty pro zpracování materiálů, například  $\text{CCl}_4$  pro hliník a jeho slitiny a  $\text{CF}_4$  pro čistý křemík používaný v elektronice, a jsou rychlejší než tradiční chemické metody zpracování díky urychlení procesu aktivní energií dopadajících iontů. [13]

**Princip:**

Princip iontového paprsku a příslušná zařízení spočívají ve využití svazku vysokoenergetických iontů inertního plynu, jako jsou argon, krypton a xenon, které mohou být snadno urychleny a řízeny elektrickým polem. Dynamický proces zpracování iontovým paprskem je založen na vyražení atomů z povrchu cílového materiálu elektroelastickou kolizí, což se nazývá iontové rozprašování. Princip rozprašování spočívá v přenosu hybnosti z iontu plynu na částici materiálu, přičemž kinetická energie iontů při rozprašování překračuje energii vazby atomů nebo molekul v materiálu, což vede k jejich vypuzení z povrchu. Hloubka pronikání dopadajících argonových iontů je přibližně několik nanometrů, což umožňuje precizní zpracování materiálu na atomové úrovni. [13]



Obrázek 25 Schéma systému frézování iontovým svazkem [13]

### 3 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO PAPRSKU

Obrábění laserovým paprskem (LBM) využívá technologii laseru, což je zkratka pro zesílení světla stimulovanou emisí záření, k vygenerování vysoce kolimovaného, monochromatického a koherentního světelného paprsku. Tento paprsek je soustředěn do malého bodu, dosahující vysokých hustot výkonu  $10^6 \text{ W/mm}^2$ . Na trhu je k dispozici široká škála laserů, včetně laserů s pevným tělesem tzv. pevnolátkových, iontových a molekulárních laserů, které mohou pracovat v kontinuálním nebo v pulsním režimu. [14]

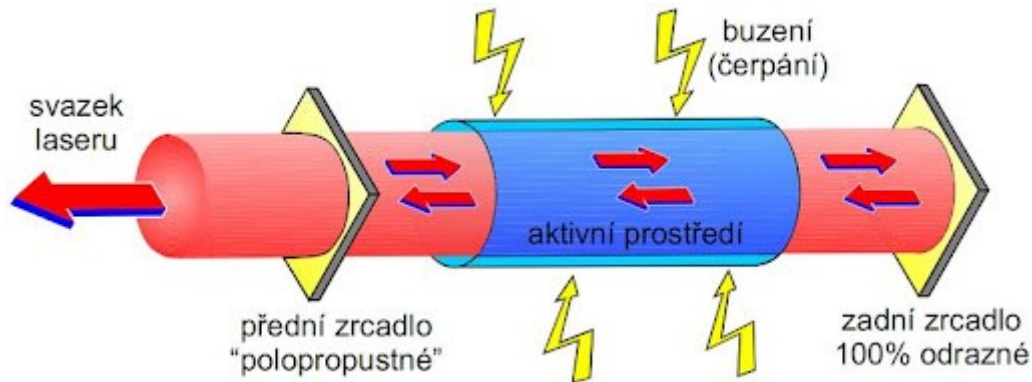
Výhody LBM jsou významné. Eliminuje se obava z opotřebení a lámání nástrojů a umožňuje přesné umístění děr pomocí optického laserového systému pro zarovnání. Je schopen vytvářet velmi malé díry s velkým poměrem stran, efektivně zpracovává širokou škálu tvrdých a obtížně obrobitelných materiálů. Proces obrábění je charakterizován svou rychlostí a ekonomickou přípravou. Navíc umožňuje vrtání pod obtížnými vstupními úhly až do 108 stupňů vzhledem k povrchu a vyznačuje se významnou flexibilitou, což usnadňuje automatizaci. Kromě toho jsou provozní náklady spojené s LBM relativně nízké. [14]

Nicméně LBM není bez omezení. Počáteční náklady na vybavení jsou významné. Proces často vede k vzniku kuželovitých děr při přímém vrtání a dosažení slepé díry s přesnou hloubkou pomocí laserového paprsku může být výzvou. Tloušťka materiálu, který lze efektivně vrtat, je omezena na 50 mm. Navíc je nutné odstranit přilnavý zbytkový materiál, který se obvykle nachází na výstupních otvorech. [14]

#### 3.1 Princip funkce laseru

Laser, což je zkratka pro "zesílení světla stimulovanou emisí záření", představuje zařízení, které generuje vysoce koherentní světelný paprsek prostřednictvím procesu stimulované emise. Tento princip lze vysvětlit s využitím kvantové fyziky a planetárního modelu atomu, kde laserové světlo vzniká v důsledku převládání stimulované emise nad spontánní emisí v prostředí určitého elektromagnetického záření. [14]

Na rozdíl od běžného světelného záření, které se šíří všemi směry, laserové světlo je charakterizováno svou vysokou monochromatickostí, což znamená, že světlo v laserovém paprsku má prakticky jedinou vlnovou délku. Tato vlastnost, spolu s vysokým stupněm prostorové a časové koherence, umožňuje všem částicím světelné vlny kmitat se stejnou fází. [14,15]



Obrázek 26 Základní schéma laseru [16]

### 3.1.1 Stimulovaná emise a energetické hladiny

Základním jevem při tvorbě laserového světla je stimulovaná emise, kde atom přechází z vyšší energetické hladiny na nižší a emituje foton se stejnou frekvencí jako je foton, který tento proces inicioval. Tento jev lze popsat rovnicí, kde rozdíl energetických hladin  $E - E_1$  je roven součinu Planckovy konstanty  $h$  ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ) a frekvence fotonu  $\nu$ . [14,16]

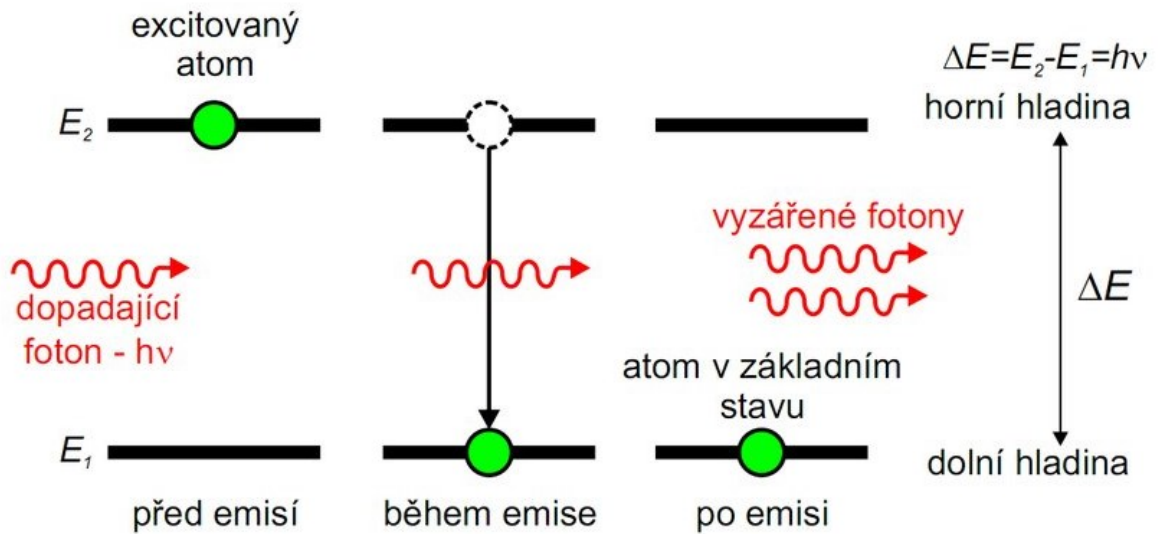
$$E = h \cdot \nu = E - E_0 \quad (1)$$

Díky čemu dochází k vytvoření infračerveného, ultrafialového nebo viditelného světla v závislosti na rozdílu těchto hladin. [14,15]

Obecně můžeme říci, že aktivní prostředí vždy obsahuje element, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšší energií. Tímto elementem je nejčastěji atom, ale není tomu tak vždy (může to být např. vibrační stav molekuly, chemická vazba apod.). Pro tuto chvíli je důležité, že při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton (kvantum elektromagnetického záření). Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií – ve stavu termodynamické rovnováhy. Právě díky buzení tento stav porušíme a převedeme aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina našich elementů ve stavu s vyšší energií. [15]

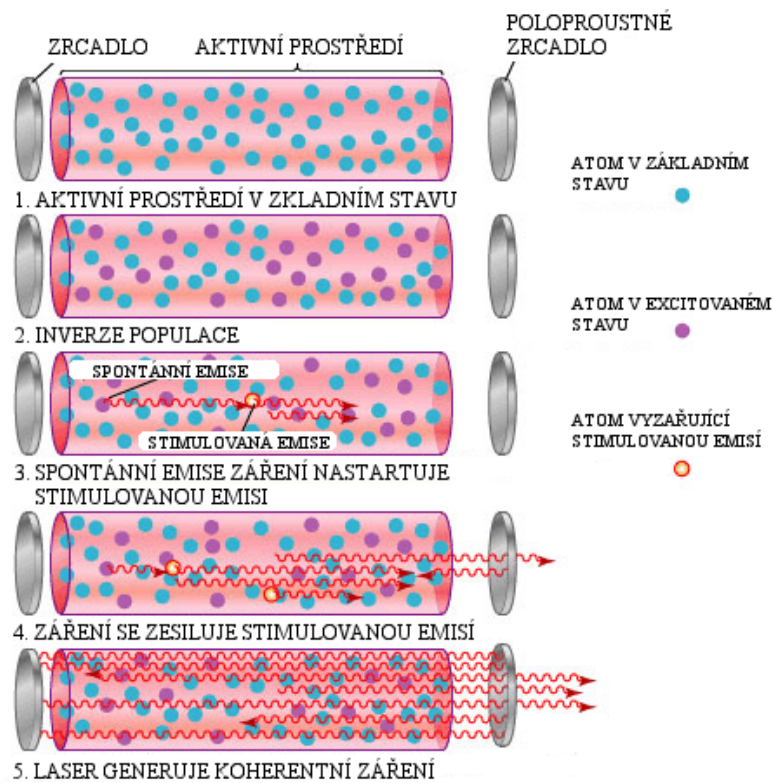
Teprve v tuto chvíli můžeme energii dodanou aktivnímu prostředí přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise, viz. obrázek níže. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy nám foton dopadající na excitovaný atom způsobí jeho

přechod z horní na dolní energetickou hladinu a při tom dojde k emisi dalšího fotonu. [15,16]



Obrázek 27 Stimulovaná emise – zesílení světla [16]

Jak fotony putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému jejich počet rapidně narůstá a dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů. [16]



Obrázek 28 Princip laseru [16]

### 3.1.2 Fokusace a ovlivnění materiálu

Při aplikaci laserových technologií je klíčové dosáhnout co nejpřesnější fokusace laserového paprsku, aby se maximalizovala hustota toku energie. [15]

V laserové optice jsou optické komponenty klíčové pro úpravu průměru, směru a intenzity laserového paprsku, aby se zvýšil výkon, přizpůsobil specifickým vstupům zařízení a upravila fokální vzdálenost. Tyto úpravy dodržují základní principy optiky, vyžadují však přesný výběr materiálů a povlaků kvůli specializované povaze laserových aplikací.

Ideální laserový paprsek je popsán rovnicí: [15]

$$\frac{\Theta}{W} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (2)$$

předpokládající perfektní podmínky. Nicméně, reálné aplikace přinášejí odchylky, což nutí zahrnout faktor kvality paprsku  $M^2$ , pro přesné vyjádření chování paprsku jako: [15]

$$\frac{\Theta}{W} = \frac{M^2 \lambda}{\pi} \quad (3)$$

Zde  $M^2 = 1$  reprezentuje ideální paprsek.

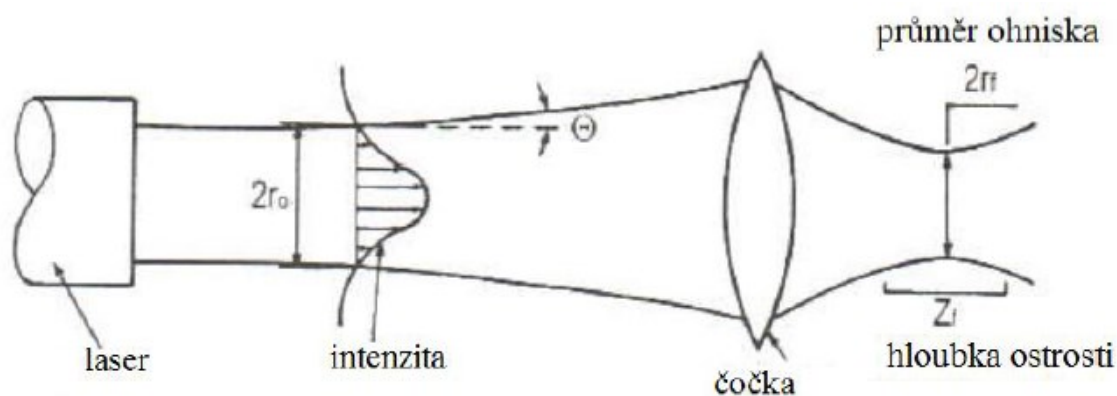
Minimální velikost bodu, která je kritická pro definování nejmenšího dosažitelného rozměru ve strojírenství laserem, je určena rovnicí: [15]

$$D_{min} = \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (4)$$

kde  $f$  je fokální délka,  $D$  průměr čočky a  $\lambda$  vlnová délka. Faktor kvality paprsku,  $M^2$ , je v tomto kontextu klíčový, což zdůrazňuje nutnost vysokokvalitních paprsků v přesných aplikacích jako je mikroobrábění, kde jsou nezbytné malé velikosti bodů. To podtrhuje vzájemnou souvislost mezi kvalitou paprsku, vlnovou délkou a fokální délkou při dosahování požadovaných výsledků obrábění. [15]

Rozptyl, který je definován jako polovina úhlu na vrcholu kužele vycházejícího z plochého laserového okénka o průměru  $2r$ , kde divergence laserového svazku s vlnovou délkou  $\lambda$  je určena vzorcem: [15]

$$\Theta = \frac{\lambda_w}{\pi r_0} \quad (5)$$



Obrázek 29 Profil paprsku [15]

### 3.2 Typy laserů a jejich rozdělení

V současném technologickém prostředí, charakterizovaném rozmanitostí dostupných laserových systémů, rozdílnými vlastnostmi a širokým spektrem aplikací, se nabízí nutnost systematické klasifikace a typologie laserů. Lasery lze kategorizovat na základě několika klíčových parametrů: [17]

1. **Aktivního média**, tj. skupenství materiálu využívaného pro generaci laserového záření, které se dělí na: [17]
  - Pevné (krystalické nebo dielektrické),
  - Plynové,
  - Kapalné,
  - Polovodičové.



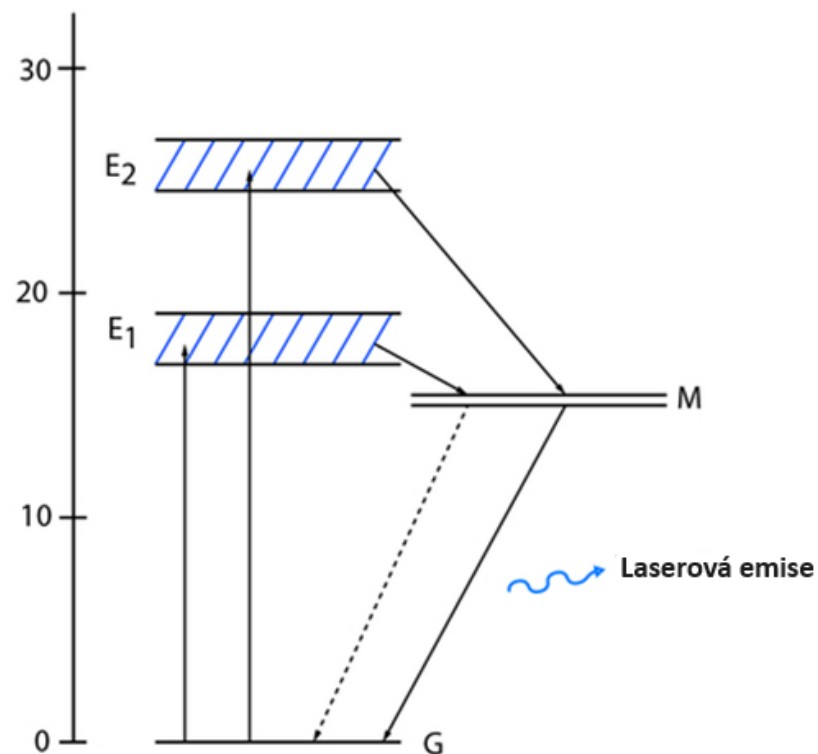
2. **Vlnové délky emitovaného záření**, na základě čehož rozlišujeme: [17]
  - Infračervené záření (IR),
  - Viditelné záření,
  - Ultrafialové záření (UV),
  - Rentgenové a gama záření.
3. **Režimu generování laserového paprsku**, včetně: [17]
  - Kontinuálního režimu,
  - Pulsního režimu,
  - Q-switched režimu, který umožňuje vysokou energii impulsu při kontinuálním čerpání.
4. **Dosahovaného výkonu**, dělicí lasery na: [17]
  - Nízkovýkonné, pro aplikace jako řezání a vrtání,
  - Vysokovýkonné, používané pro zvarování a tepelné zpracování.

### 3.2.1 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkový laser je zařízení, které využívá pevné aktivní médium, obvykle ve formě tyče. Uvnitř aktivního materiálu je příměs, která slouží jako zdroj světelné emise. K vytvoření obrácení populace aktivního materiálu se používá optické čerpání. Pevnolátkové lasery obecně využívají indukovanou emisi jako mechanismus pro vytváření vysoce energetického paprsku. [17]

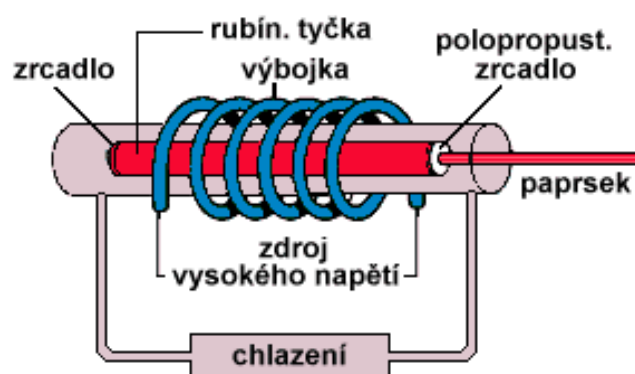
#### Rubínový laser

Rubínový laser představuje první funkční laser a je založen na trojúrovňovém energetickém systému viz. Obrázek 30. Jako aktivní materiál se používá oxid hlinitý, v němž jsou některé atomy hliníku nahrazeny chromem. Aktivní součástí laseru je chrom v krystalu oxidu hlinitého. Elektrony v základním stavu chromu absorbují dopadající světlo a jsou povýšeny do vyšších energetických stavů. Krátkodobě excitovaný stav se uvolňuje do metastabilního stavu s delší životností. Emise laseru nastává při relaxaci z metastabilního stavu zpět do základního stavu. [17]



Obrázek 30 Pracovní schéma rubínového laseru [17]

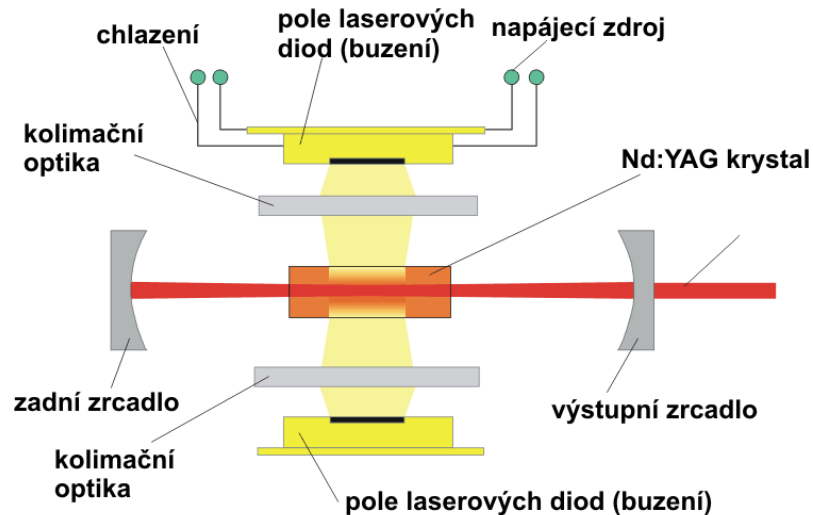
Xenonová blesková lampa emituje světlo o vlnových délkách 6600Å a 4000Å (odpovídající energii potřebné k excitaci atomů chromu). Aby byla v aktivním materiálu vytvořena rezonance dopadajícího světla, byly oba konce tyče z rubínu pokryty stříbrným povlakem. Jeden konec byl úplně pokryt, zatímco druhý konec byl částečně pokryt, aby mohlo světlo laseru systém opustit. [17]



Obrázek 31 Schematický popis rubínového laseru [16]

## Laser Nd:YAG

Laser Nd:YAG patří mezi nejpobulárnější typy pevnolátkových laserů. Látkové médium je krystal  $Y_3Al_5O_{12}$ , který je běžně označován jako YAG, což je akronym pro yttrium hliníkový granát. [17]



Obrázek 32 Schéma Nd:YAG laseru [17]

Nejstarší typ nasazený v průmyslu. Používají se Nd:YAG lasery buzené buď výbojkami (LPSS) nebo laserovými diodami (DPSS). [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, proto je nutné chlazení vodou. DPSS Nd:YAG lasery mají vyšší účinnost a lepší kvalitu svazku. [17]

V dnešní době se LPSS Nd:YAG lasery používají zejména v pulsním režimu pro laserové svařování a vrtání. Výhodou těchto laserů je vysoká energie v pulsu (až 100 J/ms), kterou tyto aplikace vyžadují. Nevýhodou je nízká účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost výbojek, průměrně cca 1000h. [17]

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 100W. 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. Používání těchto laserů nicméně již několik let silně klesá a jsou nahrazovány vláknovými pulsními lasery, které nabízejí v podstatě pouze výhody. [17]

### 3.2.2 Plynové lasery

Aktivní plynné prostředí může být tvořeno atomy, ionty nebo molekulami. Plynové lasery pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. Jejich excitace je většinou pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, optická excitace se používá jen zřídka. [17]

Plynové lasery mají homogenní aktivní prostředí, které zajišťuje jejich výborné parametry. Nevýhodou je poměrně malý výkon. [17]

K nejrozšířenějším typům patří červeně zářící helium - neonový laser, v průmyslu a medicíně se nejvíce používá infračervený laser CO<sub>2</sub>. Světelné efekty poskytuje např. modře a zeleně zářící laser argonový. Zvláštním typem plynových laserů jsou lasery excimerové, které jsou výkonným zdrojem ultrafialového záření. Aktivním prostředím jsou molekuly, vzniklé spojením dvou atomů různých vzácných plynů (argon - krypton, krypton - fluor apod.) působením svazku elektronů. [17]

#### **Helium-neonový laser**

Helium-neonový (He-Ne) laser, laser s kontinuálním vlněním, pracuje ve viditelném spektru, primárně na vlnové délce 632,8 nm v červené oblasti. Jeho aktivní médium obsahuje směs plynů přibližně 85 % helia a 15 % neonu, která je buzena vysokonapětovým stejnosměrným elektrickým výbojem okolo 10 kV. He-Ne lasery najdou široké uplatnění v různých oborech včetně interferometrie, holografie, spektroskopie, skenování čárových kódů a optické vzdělávání díky jejich koherenci a stabilitě. [17]

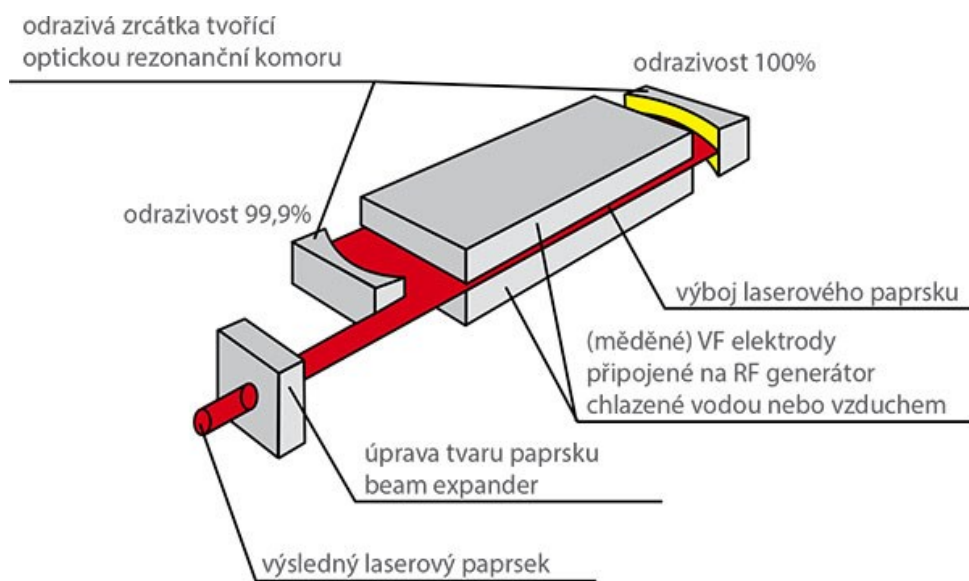
#### **Argonový laser**

Využívá jako své aktivní médium ionizovaný argonový plyn, který produkuje laserové světlo na kratších vlnových délkách, konkrétně 488 nm (modrá) a 514 nm (zelená). Vznik plazmatu v argonem naplněné trubici prostřednictvím intenzivního elektrického výboje umožňuje emisi těchto vlnových délek. Argonové lasery jsou používány v řadě aplikací od forenzní medicíny a zábavy po obecnou a oftalmologickou chirurgii, stejně jako v holografii a slouží jako zdroj optického „pumpování“ kvůli jejich vysokému výkonu a specifickým vlnovým délkám. [17]

## CO<sub>2</sub> lasery

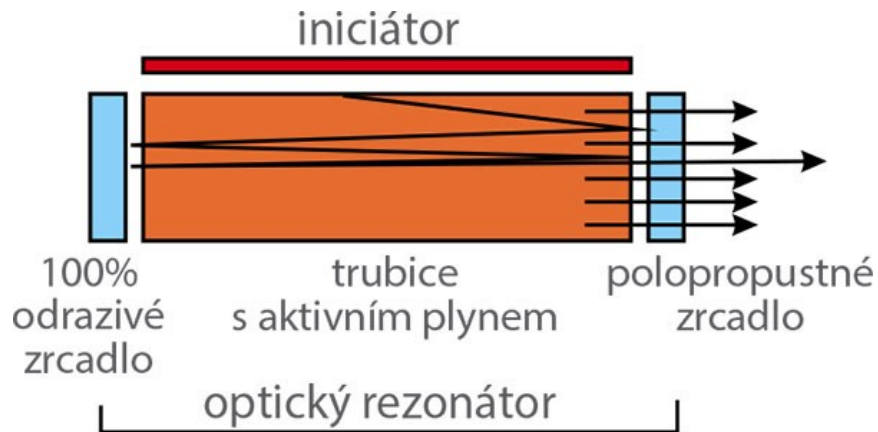
Tento laser využívá pro generování stimulované emise záření kvantové energetické přechody asociované s oscilací molekul CO<sub>2</sub> a dusíku N<sub>2</sub>. V jádru CO<sub>2</sub> laseru se nachází laserová trubice s plynovou směsí CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a helia, kde je energie pro excitaci získávána tlejícím výbojem mezi elektrodami napájenými z generátoru vysokého napětí. Tento proces umožňuje efektivní přenos vibrační energie mezi excitovanými molekulami N<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>, což vede k emisi energie při přechodu molekul CO<sub>2</sub> z vyšší na nižší energetickou úroveň. [17]

Pro udržení inverze populace, která je nezbytná pro laserovou akci, je nutné systém neustále energizovat tlejícím výbojem a zároveň efektivně odvádět přebytečnou energii pomocí střetů s heliem, které funguje jako tepelný odvod díky své vysoké tepelné vodivosti. [17,18]



Obrázek 33 Schéma CO<sub>2</sub> laseru [18]

Laserový paprsek je vytvářen rezonátorem a veden do laserové hlavice, kde je soustředěn fokusační čočkou. Pro ochranu optiky a optimalizaci procesu řezání je do hlavice zaváděn pomocný plyn, který odstraňuje taveninu a páry z řezaného materiálu, zajišťuje čistší řez a může vytvářet specifické atmosféry pro zpracování materiálu. [17,18]



Obrázek 34 Tvorba paprsku [18]

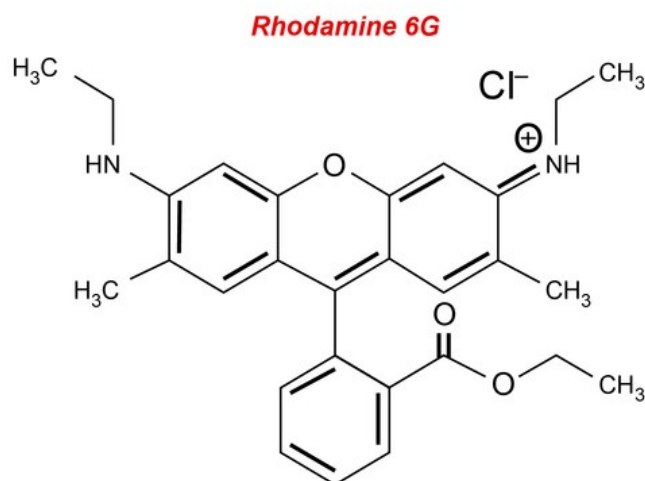
CO<sub>2</sub> lasery jsou kategorizovány podle uspořádání toku plynu vzhledem k optické ose na axiální a transverzální, s rozdíly v konstrukci a výkonu. Axiální lasery mají delší trubice a jsou vhodné pro standardní aplikace, zatímco transverzální lasery dosahují vyššího výkonu a jsou adaptabilní pro speciální použití. [18]

### Excimerové lasery

Emitují v ultrafialové oblasti, se vyznačují použitím halogenidů vzácných plynů, jako jsou argon, krypton a xenon, jako svého aktivního média. Tyto lasery pracují prostřednictvím vysokonapěťového elektrického výboje v krátkých nanosekundových proudových pulsech, produkují koncentrované UV světlo. S vlnovými délkami specifickými pro typ excimeru, jako je 193 nm pro ArF, 248 nm pro KrF, 308 nm pro XeCl a 351 nm pro XeF, jsou excimerové lasery klíčové v ultrafialové litografii pro výrobu polovodičových čipů a v přesných chirurgických postupech, využívající jejich schopnosti produkovat vysoce zaměřené světlo s krátkou vlnovou délkou. [17]

### 3.2.3 Kapalinové lasery

Kapalinové lasery se skládají z kapalného aktivního materiálu obvykle složeného ze sloučeniny organického barviva. Nejběžnější typ tekutého laseru používá barvivo rhodamin 6G. [17]



Obrázek 35 Organické barvivo u kapalinových laserů [17]

Smíchané s alkoholem a je excitován různými typy laserů, jako je argon-iontový laser nebo dusíkový laser. Organická barviva jsou velké sloučeniny, které mají absorpční pásy v UV nebo viditelné oblasti se silným intenzivním fluorescenčním spektrem. Volné  $\pi$  elektrony barviva jsou excitovány pomocí optického čerpacího zdroje a přechodem ze stavu  $S_1$  do stavu  $S_0$  vzniká laserové světlo (viz. Jablonského diagramy). [17]

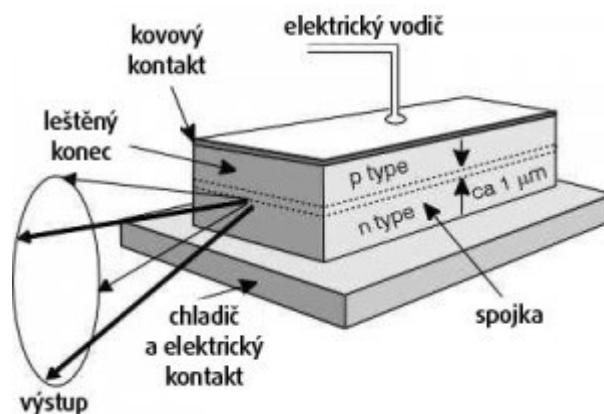
Kapaliny se obecně používají, protože je lze snadno naladit tak, aby vyzařovaly určitou vlnovou délku změnou rezonanční frekvence v dutině. Lze pokrýt vlnové délky od viditelného po infračervené záření. Kapalně lasery mají mnoho výhod, některé zahrnují to, že mohou být ochlazeny v relativním čase, nelze je poškodit na rozdíl od pevnolátkových laserů a jejich výroba je nákladově efektivní. Účinnost kapalinových laserů je nízká, protože životnost vybuzeného stavu je relativně krátká. Existuje mnoho neradiačních procesů rozpadu a materiál se časem rozkládá. Kapalinové lasery mají tendenci být používány pouze jako pulzní lasery, když je vyžadována laditelnost. Lze je použít pro spektroskopii s vysokým rozlišením, protože se snadno ladí v širokém rozsahu vlnových délek. Mohou být také použity, protože mají koncentrace, které jsou zvládnutelné, když jsou rozpuštěny v pevných látkách nebo jiných kapalinách. [17]

### 3.2.4 Polovodičové lasery

Tato skupina laserů dnes patří mezi nejrozšířenější, zdrojem záření je tzv. laserová dioda. Diody mají velmi malé rozměry, což je na jedné straně jejich výhodou, na druhé straně je jejich paprsek rozbíhavější než u jiných typů laserů. Účinnost diod je vysoká (až 50 %), jejich výkon se dá snadno měnit (modulovat) změnou elektrického proudu. Proto našly laserové diody velké uplatnění zejména v telekomunikacích, ve výpočetní technice i spotřební elektronice. [17]

#### Laserová dioda

Při průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem PN se může za vhodných podmínek přeměnit část elektrické energie na světlo. Tento jev se běžně využívá u luminiscenčních svítivých diod LED. Přechod PN, opatřený na protilehlých stranách zrcadly, kde jedno z nich je polopropustné, se může stát i zdrojem laserového světla. Musí však mít velmi přesné rozměry s ohledem na vlnovou délku vyzařovaného světla. Polovodičové laserové diody o výkonu jen několik mW jsou součástí řady běžných zařízení, najdeme je např. v laserovém ukazovátku, laserové tiskárně nebo kopírce, čtečce čárového kódu v obchodě, v přehrávačích disků CD atd. [17]

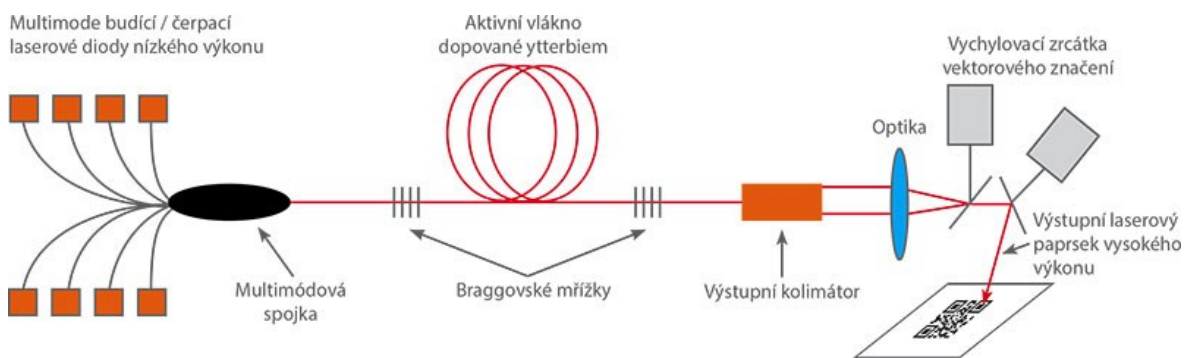


Obrázek 36 Princip diodového laseru [19]



### 3.3 Vlákenný laser

Základní vlákenný laser se skládá z vlákenného zesilovače umístěného v dutině, která umožňuje optickou zpětnou vazbu, kde generování laseru je dosaženo excitací molekul prostřednictvím pumpování diodami. Jádrové struktury vláken, typicky složené ze skleněných křemíků kvůli jejich čistotě, podporují šíření režimu lasingu, zatímco plášť zajišťuje šíření a omezení pumpovacího paprsku, čímž se zvyšuje pumpování jádra vysokovýkonnými paprsky. Tato konfigurace využívá rozdílné indexy lomu mezi jádrem a pláštěm k přeměně budícího světla nízké jasnosti na jasnější laserový paprsek. [18,19]

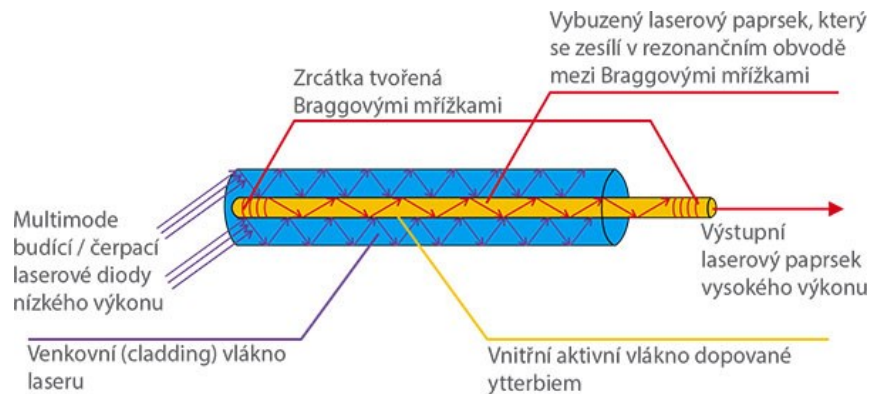


Obrázek 37 Princip vlákenného laseru [19]

Zvláště, vzácné zeminy jako neodym ( $\text{Nd}^{3+}$ ), ytterbium ( $\text{Yb}^{3+}$ ), a erbium ( $\text{Er}^{3+}$ ) jsou dopovány do optických vláken, přičemž  $\text{Yb}^{3+}$  je zvláště upřednostňován pro jeho nízké kvantové vady a vysokou kvantovou účinnost, téměř 95%.  $\text{Yb}^{3+}$  dopovaná vlákna také umožňují modulaci indexu lomu a kontrolu absorpce fotonů. Jako alternativa ke skleněným křemíkům, fosfátová skla nabízejí vyšší průřez emise ytterbiem a účinnost laseru, což je demonstrováno vývojem tepelně stabilního  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ -vysoko dopovaného fosfátového skla v systému oxidů, které vykazuje vysokou propustnost a nízké koeficienty absorpce přes široké spektrum vln. délek (320–2700 nm). [18,19]

Návrh a provozní efektivita vlákenných laserů jsou také ovlivněny faktory jako typ vlákna, velikost, numerická apertura, index lomu a úroveň dopování. Braggovy mřížky, integrální součást struktury laseru, fungují jako zrcadla, která regulují odrazy specifických vlnových délek, efektivně umožňující kontrolované uvolnění světelné energie na užitečných vlnových délkách. Inovativní použití vláken s dvojitým pláštěm zahájilo éru vlákenných laserů vyznačujících se vysokým výkonem, elektrickou účinností a jasem, překonávající výzvy

spojené s interakcí budícího světla a excitací dopantních iontů v jádru vlákna. Navíc, řízení nelineárních efektů, jako jsou stimulované Brillouinovy a Ramanovy rozptyly, vyžadují úpravy délky vlákna a průměru jádra, spolu se strategickým ohýbáním vlákna a použitím zbytkových pumpovacích odstraňovačů k minimalizaci ztráty tepelné energie, čímž se zajišťuje efektivní generování a šíření laseru. [17,19]



Obrázek 38 Princip aktivního vlákna [19]

### 3.3.1 Dělení vláknových laserů

Vláknové lasery se dělí na kontinuální a pulzní typy, přičemž podkategorie zahrnují jednofrekvenční lasery, Q-spínané lasery a lasery s uzamčeným režimem. Kontinuální vláknové lasery využívají vysoké reflektory a výstupní vazební členy, zatímco jednofrekvenční lasery, obvykle napájené jednovidovými diodami, produkují výkony od desítek do stovek miliwattů. Q-spínané lasery generují delší pulsy a riskují přerušení pulsu, pokud doba trvání překročí dobu oběhu v dutině. Lasery s uzamčeným režimem však produkují krátké pulzy tím, že využívají strukturu režimu vnitřní dutiny vlákna. Pokroky v návrzích výkonových zesilovačů hlavního oscilátoru (MOPA) plně sepnatých s hlavním oscilátorem usnadnily pulzní operace v polovodičových laserech s vláknovou vazbou. Kontinuální lasery jsou preferovány pro řezání silných materiálů, zatímco pulzní lasery se používají pro úkoly vyžadující paprsky s vysokou špičkovou intenzitou, jako je vytváření mikrokanálů a mikrootvorů, a jejich kategorizací do nanosekundových, pikosekundových nebo femtosekundových režimů na základě šířky pulzu. Obecně lze tedy vláknové lasery rozdělit: [20]

**a) Na základě provozního režimu**

**Lasery s kontinuálním vlněním (CW Fiber Lasers):** Tyto lasery vydávají nepřetržitý paprsek laserového světla. Jsou široce používány v aplikacích vyžadujících konstantní laserový výkon po určitou dobu, jako je svařování, řezání a vrtání. [20]

**Pulzní vláknové lasery:** Tyto vydávají laserové světlo v pulsech, nikoli v nepřetržitém toku. Pulzní vláknové lasery lze dále kategorizovat na základě délky pulzu: [20]

- Nanosekundové vláknové lasery: Vydávají pulsy v rozsahu nanosekund. Vhodné pro značení a mikroobrábění.
- Pikosekundové vláknové lasery: Vydávají pulsy v rozsahu pikosekund, používají se pro ultra přesné obrábění a lékařské aplikace.
- Femtosekundové vláknové lasery: Vydávají extrémně krátké pulsy v rozsahu femtosekund. Tyto lasery se používají pro vysoce přesné řezání a ablační procesy, kde je klíčová minimální ovlivněná tepelná zóna.

**b) Na základě materiálu**

**Erbiumové vláknové lasery (EDFL):** Provozují se v rozsahu vlnové délky 1550 nm, což je dělá ideálními pro telekomunikace a lékařské aplikace díky jejich bezpečné vlnové délce pro oči. [20]

**Ytterbiové vláknové lasery (YDFL):** Typicky provozované kolem vlnové délky 1060-1120 nm. Jsou známé svým vysokým výkonem a účinností, široce se používají v průmyslových aplikacích řezání a svařování. [20]

**Thuliové vláknové lasery (TDFL):** Provozují se v oblasti vlnové délky 2  $\mu\text{m}$ , vhodné pro lékařské aplikace a spektroskopii středního IR. [20]

**Neodymové vláknové lasery (NDFL):** Mohou emitovat na několika vlnových délkách, včetně kolem 900 nm, 1060 nm a 1300 nm, používají se v různých aplikacích od zpracování materiálů po lékařské ošetření. [20]

### 3.3.2 Pracovní módy vláknového laseru

Tyto módy definují, jak je elektromagnetické pole světla rozloženo v prostoru v daném okamžiku a jak se vyvíjí v čase. Jsou klíčové pro návrh laserů pro specifické aplikace, kvůli jejich vlivu na kvalitu paprsku, účinnost a schopnost laseru být přizpůsoben pro specifické úkoly. [20]

#### a) Prostorové Módy

Prostorové módy popisují rozložení intenzity světla napříč průřezem optického vlákna. Jsou určeny průměrem jádra vlákna, profilem indexu lomu a vlnovou délkou světla. [20]

#### b) Lasery s jedním módem (Single-Mode Fiber Lasers):

Tyto lasery podporují pouze jeden prostorový mód šíření světla. Provoz v jednom módu je žádoucí pro aplikace vyžadující vysokou kvalitu paprsku a přesnost, jako jsou telekomunikace a jemné zpracování materiálů. Paprsek má dobře definovaný, Gaussovský intenzitní profil, což vede k minimální difrakci a vynikající možnosti zaostření. [20]

#### c) Lasery s více módy (Multimode Fiber Lasers):

Vlákna s více módy podporují několik prostorových módů. I když to může vést k vyššímu výkonu díky větší velikosti jádra umožňující přeměnit více budícího světla na laserové světlo, často to vede k nižší kvalitě paprsku ve srovnání s výstupy v jednom módu. Lasery s více módy se používají v aplikacích, kde je vysoký výkon důležitější než kvalita paprsku, jako jsou některé typy svařování a řezání. [20]

#### d) Časové Módy:

Časové módy se vztahují k charakteristikám v časové doméně laseru, konkrétně k tomu, jak se výkonový výstup mění v čase. [20]

Kontinuální vlnění (CW):

V režimu CW laser vydává konstantní, stálý paprsek světla. Tento mód se používá v aplikacích vyžadujících konzistentní intenzitu laseru v čase. [20]

### e) Pulzní provoz:

V pulzních módech laser vydává světlo v krátkých záblescích nebo pulzech. Délka těchto pulzů se může široce lišit, od milisekund po femtosekundy, v závislosti na aplikaci. Pulzní provoz je nezbytný pro aplikace vyžadující vysoké špičkové výkony nebo přesnou kontrolu nad množstvím energie dodané cíli. Pulzní lasery lze dále kategorizovat podle délky pulzu:

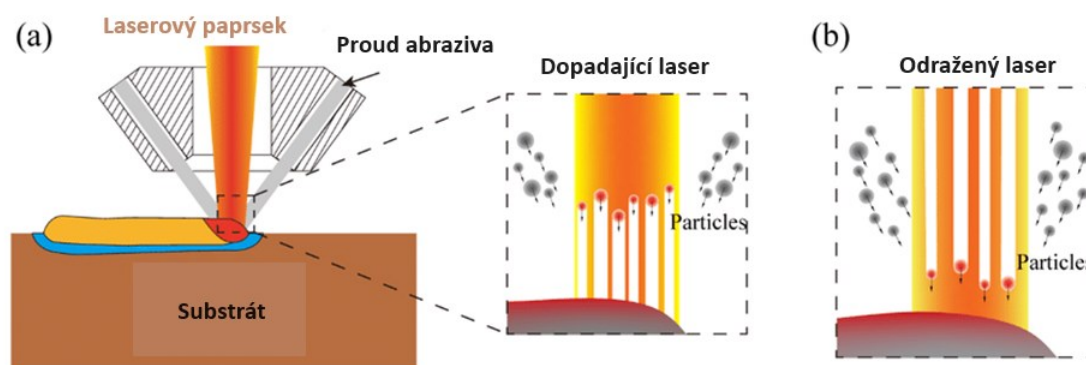
- **Q-switching:** Produkuje pulzy v nanosekundovém rozsahu. Q-switching je metoda používaná v laserech k vytvoření krátkého, intenzivního pulzu světla. To se provádí umístěním proměnného atenuátoru, známého jako Q-spínač, do dutiny laseru. Zpočátku Q-spínač zabraňuje cirkulaci světla v dutině, což umožňuje akumulaci energie v zesilovacím médiu, aniž by došlo ke spuštění laseru. Tento stupeň odpovídá nízkému faktoru Q pro optický rezonátor, což ukazuje na vysoké ztráty. Jak je médium čerpáno, energie se hromadí, dokud nedosáhne maximální úrovně. V tomto okamžiku se aktivuje Q-spínač, aby umožnil světelnou zpětnou vazbu, rychle zvýšil Q faktor dutiny a umožnil spuštění laserového procesu. Rychlý nárůst intenzity světla vyčerpává energii uloženou v zesilovacím médiu, což má za následek silný, krátký světelný puls. Lasery s Q-switchingem se používají pro aplikace jako odstraňování tetování a značení. [21]
- **Mode-locking:** Je technika používaná k vytváření velmi krátkých laserových pulzů, jako jsou pikosekundové nebo femtosekundové pulzy, synchronizací laserových režimů za účelem vytvoření pravidelného sledu pulzů. Tento proces má za následek laser s uzamčeným režimem emitující pulzy s extrémně vysokým špičkovým výkonem ve srovnání s jeho průměrným výkonem. Doba trvání pulzu se obvykle pohybuje od 30 femtosekund do 30 pikosekund. Uzamčení režimu je dosaženo použitím zařízení v laserovém rezonátoru, které může být buď aktivním prvkem, jako je optický modulátor, nebo pasivním prvkem, jako je satureovatelný absorbér. Tato zařízení zajišťují, že laser nepracuje v režimu nepřetržité vlny, ale místo toho vysílá pulzy. Aby laser zůstal v ustáleném stavu, kdy se charakteristiky pulsu nemění po každé okružní cestě, musí se vyrovnat všechny vlivy ovlivňující puls – jako je zisk, ztráty, nelinearity a disperze. Dosažení této rovnováhy může být v některých případech přímočaré, jako je zamykání v režimu soliton, ale v jiných může vyžadovat složité numerické simulace, zejména u vláknových laserů s uzamčeným režimem. [21]

### 3.4 Vliv Laserového paprsku na materiál

Při interakci laserového paprsku s materiálem, dochází k jejich vzájemnému působení, jehož výsledky závisí na vlastnostech materiálů a jejich schopnosti absorbovat a odrážet laserové záření. Klíčové faktory pro použití laserového paprsku zahrnují: [17,20]

- reflektivitu
- absorpci
- tepelnou vodivost materiálu
- tavení povrchové vrstvy
- odpařování.

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsků odráží, část absorbuje do materiálu a část materiálem prochází. Absorbované paprsky zahřívají materiál, který se následkem zahřátí roztaví a poté se z ohřáté oblasti odpaří. Množství odražených paprsků závisí na odrazivosti materiálu. [20]



Obrázek 39 Působení dopadajících částic na povrch (a) a odražených od povrchu (b) [17]

Odrazivost  $R$  [%] je vyjádřena Hagen-Rubensovým vztahem. [17,20]

Absorpce  $A$  [%] světelného záření způsobuje ohřátí povrchové vrstvy. Reflexe i absorpce jsou komplexní jevy a jejich vzájemné působení je vyjádřeno vztahem. [17,20]

Odrazivost infračerveného světla od kovových povrchů je velmi vysoká. Ve skutečnosti na odrazivost působí přítomnost oxidické vrstvy na povrchu, stejně jako zbytková napětí pod

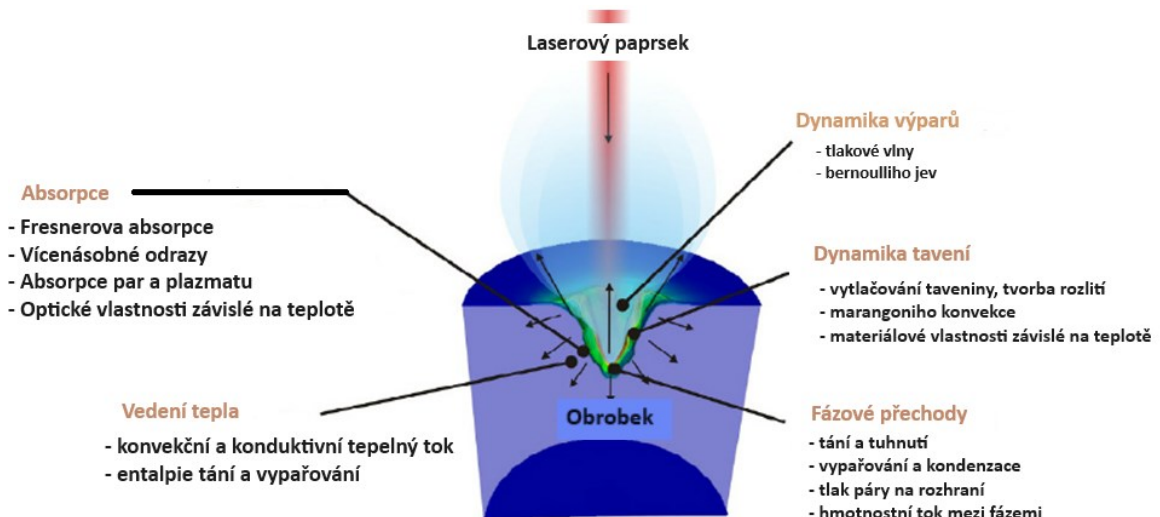
povrchem, takže reálné hodnoty odrazivosti mohou být ve skutečnosti jiné. Obecně platí, že s rostoucí vlnovou délkou světelného záření reflektivita kovů stoupá. [17,20]

Odrazivost paprsků lze snížit například zdrsněním povrchu, vytvořením krycí nekovové vrstvy, narušením oxidické vrstvy ozářením povrchu laserovým paprskem s vysokou energií, ohřátím materiálu na teplotu blízkou teplotě tavení. S rostoucí teplotou povrchu odrazivost klesá a minimální hodnotu dosahuje při teplotě tavení kovů. [17,20]

Absorpce světelných paprsků do materiálu závisí na tepelném gradientu kovového povrchu a mění se s drsností povrchu. S rostoucí drsností povrchu klesá schopnost absorpce paprsků. To platí i o zbytkových napětích v povrchové vrstvě po předchozí mechanické operaci. Absorpce světelného záření a následné ohřátí kovového povrchu, ale i jiných materiálů závisí na tepelné vodivosti materiálů. [17,20]

Klíčovým mechanismem při odstraňování materiálu na bázi laseru je ablace, které se dosahuje tavením a odpařováním materiálu. Tento proces je silně závislý na hustotě výkonu laseru a době trvání jeho pulzů. Kratší pulzy, zejména v rozsahu pikosekund, minimalizují difúzi tepla a tepelně ovlivněnou zónu, čímž snižují nežádoucí tepelné poškození okolního materiálu. [17,20]

Působením intenzivního zaostřeného laserového paprsku na materiál dochází k jeho roztavení. Když laserový paprsek s určitou hustotou výkonu ozáří povrch materiálu, absorbované paprsky lokálně zahřívají částice materiálu až na teplotu tavení. Povrch roztavené oblasti se rychle rozšiřuje a materiál se dalším intenzivním působením paprsku začne odpařovat. V roztavené zóně při odpařování částic materiálu vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je přemísťována a vytlačována z vznikajícího otvoru tlakem páry. Na místě dopadu paprsku se následkem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do otvoru. Pokud záření přestane, nebo pokud se laserový paprsek posouvá dopředu, tavenina začíná tuhnout nebo rekrystalizovat a v tuhnoucí tavenině vznikají a zůstávají zbytková napětí. [17,20]



Obrázek 40 Schéma působení laserového paprsku na materiál [17]

### 3.5 Využitelnost laseru pro mikroobrábění a nanoobrábění

Laserové mikroobrábění zahrnuje odstranění materiálu v mikroměřítku prostřednictvím interakce intenzivního laserového světla s hmotou. Proces je řízen složitými interakcemi usnadňujícími přesné odebrání materiálu, kde významnou roli hrají pyrolitické a fotolitické jevy. Lasery, charakteristické svým monochromatickým a koherentním světlem, usnadňují tuto interakci přenosem optické energie na materiál, což vede k ohřevu a následnému odstranění materiálu. [6,22]

Naopak rozvíjející se techniky laserové nanofabrikace se zaměřují na vytváření struktur v nanoměřítku bez konvenčního vzorování. Techniky, jako je laserově zaměřená atomová depozice a použití optických pinzet, demonstrují potenciál pro přesnou manipulaci s atomy a nanočásticemi a dláždí cestu pro nové nanovýrobní procesy. [6,22]

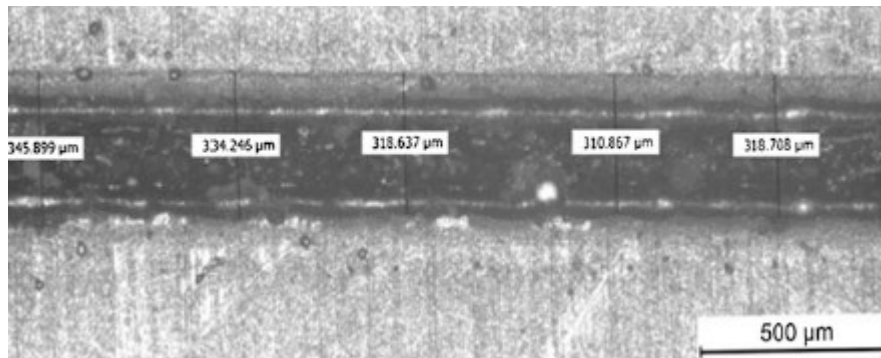
#### 3.5.1 Mikroobrábění vláknovým laserem

Princip mikroobrábění vláknovým laserem zahrnuje využití laserového světla v blízkém infračerveném nebo infračerveném rozsahu pro interakci s povrchem materiálů, což usnadňuje odstranění nepatrného množství materiálu. Tento proces je řízen energií fotonu, která je nepřímo úměrná vlnové délce, což umožňuje změnu vlastností materiálu prostřednictvím fototermálních a fotochemických procesů. Fototermální procesy, převládající v kovech, keramice a slitinách, zahrnují rychlé tepelné cykly vedoucí k ohřevu, tavení a částečnému odpařování. Naproti tomu fotochemické procesy, vhodné pro polymery a plasty, zahrnují fotonovou energii narušující chemické vazby. [6,22]



Mikroobrábění vláknovým laserem sahá od režimu nanosekundy po femtosekundu, přičemž doba interakce mezi laserem a materiálem ovlivňuje kvalitu mikroobrábění. Proces lze rozlišit na nanosekundovou ablací, která může způsobit tepelně ovlivněnou zónu škodlivou materiálu, a pikosekundovou ablací, která minimalizuje, ale neeliminuje tepelně ovlivněnou zónu (HAZ). Femtosekundová ablace však HAZ zcela eliminuje a umožňuje přesné mikroobrábění bez přenosu tepla do mřížky materiálu. [6,22]

Při výrobě zdravotnických prostředků se mikroobrábění vláknovým laserem stalo preferovanou metodou díky své přesnosti a minimálnímu poškození materiálu, což umožňuje výrobu malých, složitých zařízení. Získal trakci při mikrořezání kardiovaskulárních stentů a dalších aplikacích vyžadujících jemné a přesné řezy. Vláknové lasery nabízejí výhody oproti tradičním Nd-YAG a CO<sub>2</sub> laserům při řezání tenkých i tlustých materiálů, prokazují vynikající účinnost a kvalitu řezu. Všestrannost vláknových laserů se rozšiřuje i na značení a gravírování, kde se stále více používají pro různé aplikace, včetně elektronického zboží, dezénování vstřikovacích forem a plastových pouzder s tvrdým povlakem, aniž by byla ohrožena integrita povrchu. Jejich využití při zpracování tenkých vrstev pro aplikace s dotykovou obrazovkou navíc ukazuje jejich přizpůsobivost měnícím se parametrům pro řízené zahřívání a značení, polohování vláknových laserů jako všestranného nástroje v mikroobrábění v různých průmyslových odvětvích. [6,22]



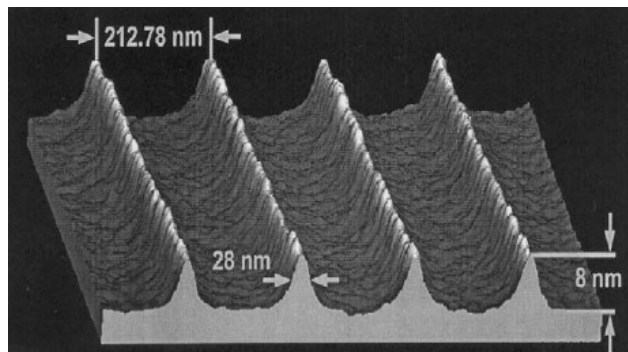
Obrázek 41 Mikroskopický pohled na šířku mikrodrážky při různém počtu průchodů [22]

### 3.5.2 Laserové nanoobrábění

Laserová nanofabrikace využívá laserové světlo naladěné na téměř atomické rozlišení k vytváření atomových čoček, které koncentrují atomy do řad o délkách přibližně 30 nm, což umožňuje tvorbu nanostruktur bez použití rezistu nebo jiné techniky přenosu vzoru. Technika se uplatňuje při fokusaci sodíkových, hliníkových a chromových atomů silou vytvářenou uzly stojícího světelného vlnění, které se dotýká těchto atomů. [22]

Základní princip spočívá v tom, že atomy procházejí skrze téměř rezonanční stojící laserovou vlnu a jsou ukládány na povrch, kde na ně působí síla směrem k uzlům vlnění, což vede k tvorbě nanostruktur o velikosti až 28 nm. Tyto vložené prvky lze dále využít jako vzory pro polymerové formovací procesy vhodné pro vývoj nanovýrobních procesů. Kombinací s postupy reaktivního iontového leptání lze vytvářet rýhy a kanálky pro nanofluidické aplikace. [22]

Vývoj zahrnuje také použití laserů jako optických pinzet pro manipulaci s materiálem v koloidní formě, což otevírá cestu k novým formám nanovýroby. Laserová nanofabrikace je v počátečním stadiu vývoje a pravděpodobně bude potřeba ji kombinovat s jinými procesy pro vytvoření hybridních nanofabrikačních a nanovýrobních postupů, což je předmětem aktuálního výzkumu mnoha vědců. [22]



Obrázek 42 Snímek nanostruktur zaměřených laserem pomocí mikroskopu atomárních sil [22]

## 4 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU PO OBROBENÍ VLÁKNO-LASEROVÝM PAPRSKEM

V současné době dochází k rozvoji nekonvenčních metod obrábění včetně technologie laserového obrábění, která má široké uplatnění ve většině klíčových průmyslových odvětví. Laserová technologie přináší mnoho výhod včetně vysoké přesnosti, nízkých provozních nákladů, tichého chodu, nulového opotřebení řezného nástroje, ostrých hran, relativně malé tepelně ovlivněné plochy a především širokého rozsahu řezaných materiálů, kovových či nekovových materiálů ve srovnání s konvenčními metodami třískového obrábění. V minulosti bylo realizováno několik výzkumů zaměřených na obrábění laserem, ať už pro ocel, neželezné materiály, těžkoobrobitelné nebo plastové materiály a jejich vliv na kvalitu povrchu. Kvalitu obrobení ovlivňují zejména vstupní parametry, volba řezaného materiálu a procesní nastavení laseru. Proces laserového obrábění je velmi komplikovaný, proto nastavení parametrů, jako je výkon laseru, tlak ochranného plynu, rychlost řezání a poloha ohniska, může výrazně ovlivnit výslednou kvalitu řezu. Správnou kombinací těchto parametrů lze dosáhnout snížení drsnosti při obrábění. Defekty, jako jsou skluzy, natavení horní hrany, přítomnost železných okují, otřepů apod. mají významný vliv na hodnocený povrch z hlediska drsnosti povrchu a poměru materiálu. [23]

### 4.1 Metody hodnocení jakosti povrchu

Při hodnocení drsnosti povrchu se uplatňují různé techniky, které lze kategorizovat do dvou hlavních skupin: kvalitativní neboli porovnávací a kvantitativní respektive parametrické metody. Kvalitativní přístupy využívají vzorníky, mikroskopy a další pomůcky k vizuálnímu porovnání a hodnocení, zatímco kvantitativní metody se spoléhají na speciální přístroje jako jsou profilometry a interferometry, které měří a vyjadřují drsnost povrchu pomocí konkrétních číselných parametrů. Tyto parametry jsou definovány v normách pro hodnocení jakosti povrchu. [23]

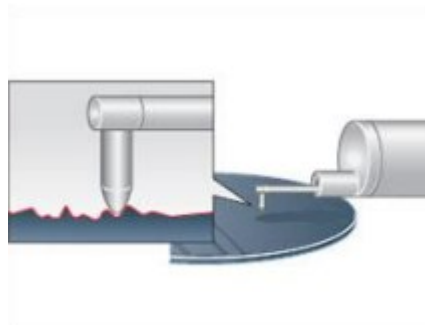
Zatímco kvalitativní metody mohou být považovány za zastaralé kvůli své subjektivitě a omezené přesnosti, kvantitativní techniky nabízejí vysokou úroveň přesnosti a opakovatelnosti měření. Přístroje používané pro kvantitativní měření mohou být založeny na bezdotykových nebo dotykových principech a často jsou schopny měřit nejen drsnost, ale také vlnitost a tvar povrchu. [23]

Při měření struktury povrchu je klíčové zohlednit řadu faktorů, jako je směr měření drsnosti, délka měřeného úseku, počet opakování měření a výběr místa měření. Je nezbytné minimalizovat vliv povrchových chyb na výsledek měření. Tato opatření zajišťují, že výsledky měření jsou co nejpřesnější a nejreprezentativnější pro danou plochu. [23]

#### 4.1.1 Dotykové metody měření

Kontaktní měřicí techniky jsou stěžejní při hodnocení kvality povrchu materiálů, poskytují přímou fyzickou interakci k měření nepravidelností povrchu. Tyto metody, často založené na přesných přístrojích, jako jsou dotekové profilometry, umožňují podrobné zkoumání topografie povrchu. Tažením jemného stylusu po povrchu se měří odchylky výšky, což nabízí pohled na drsnost, zvlnění a celkovou strukturu povrchu. [24]

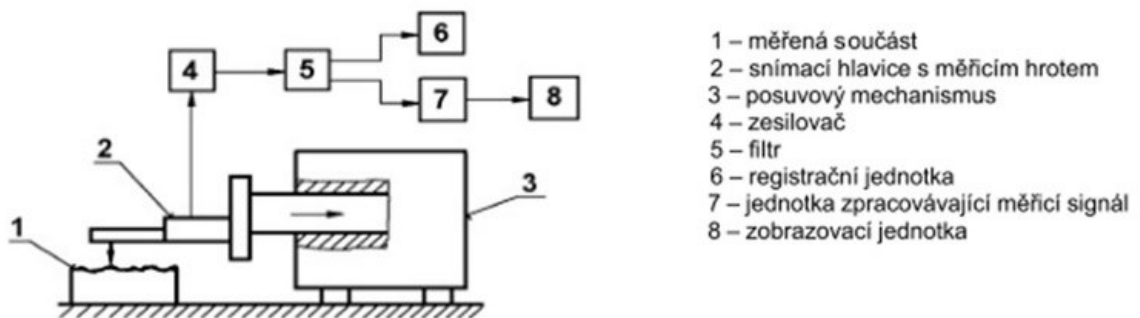
Princip kontaktního měření je přímočarý, hrot s diamantovým hrotem prochází povrch materiálu za kontrolovaných podmínek a zaznamenává vertikální posuny, když se setká s vrcholy a prohlubněmi. Tato data, jakmile jsou zachycena, jsou analyzována pro vytvoření profilu povrchu, kvantifikující jeho parametry drsnosti, jako je  $R_a$  (průměrná drsnost),  $R_z$  (průměrná maximální výška profilu) a  $R_t$  (celková výška profilu). Ovlivňujícími faktory mohou být tření, opotřebení a adheze k povrchu. Mezi další případné ovlivňující faktory mohou patřit vibrace. [24]



Obrázek 43 Měření drsnosti [24]

Kontaktní metody měření však nejsou bez omezení. Fyzická interakce mezi dotekem a povrchem může potenciálně změnit jemné povrchy a ovlivnit přesnost měření. Rozlišení měření je navíc omezeno velikostí hrotu doteku, což ztěžuje měření extrémně jemných prvků. Navzdory těmto výzvám zůstává kontaktní měření cenným nástrojem v oblasti hodnocení kvality povrchu a poskytuje základní údaje pro průmyslová odvětví od leteckého průmyslu po mikroelektroniku, kde je integrita povrchu prvořadá. [24]

Navzdory svým omezením, schopnost metody poskytovat základní údaje o drsnosti a struktuře povrchu z ní činí nepostradatelný nástroj v materiálové vědě a inženýrství. [24]

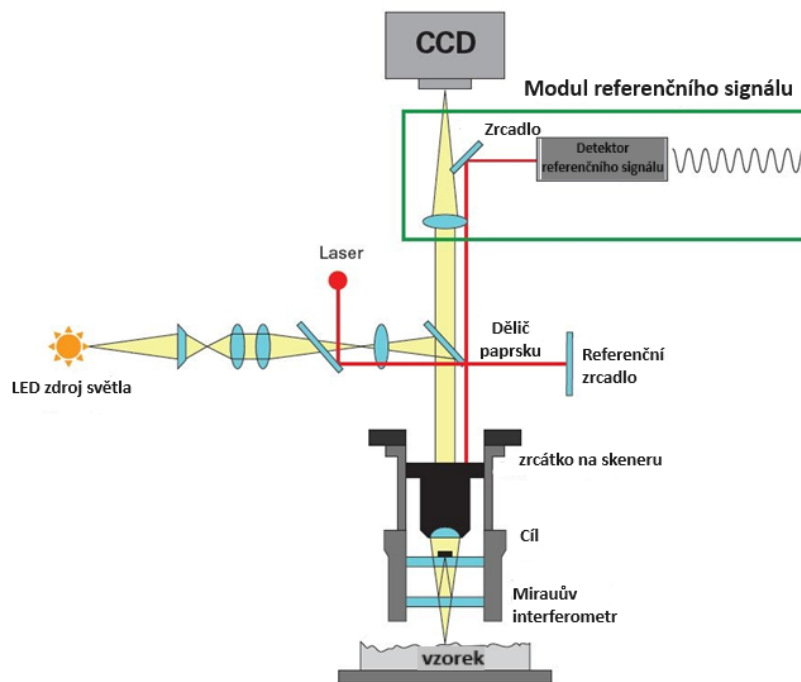


Obrázek 44 Schéma kontaktního snímání povrchu [25]

#### 4.1.2 Bezkontaktní měřicí metody

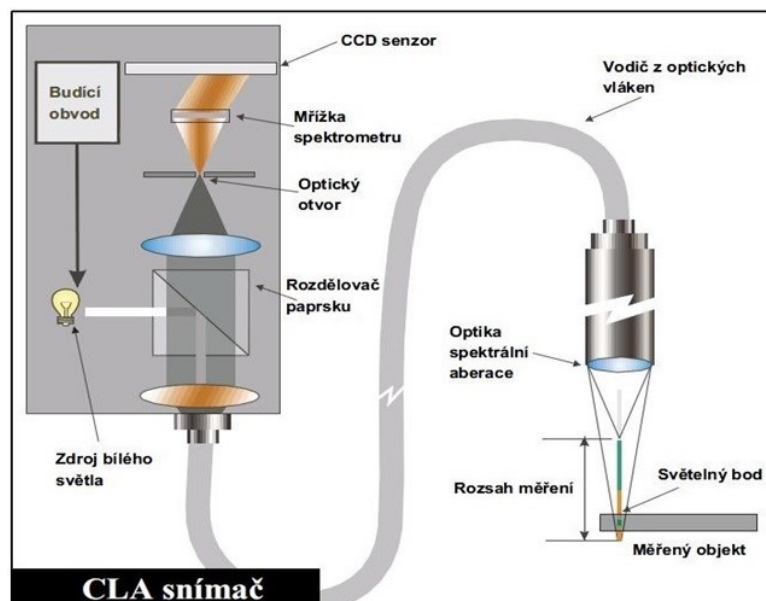
Bezkontaktní měření kvality povrchu je klíčovou technikou v oblasti přesného strojírenství, kontroly kvality a materiálové vědy, která nabízí významné výhody oproti tradičním kontaktním metodám. Tento přístup spoléhá na optické nebo elektromagnetické vlny pro měření povrchových charakteristik bez fyzického dotyku materiálu, čímž se zabrání potenciálnímu poškození nebo změně měřeného povrchu. [26]

Jednou z nejběžnějších bezkontaktních měřicích technik je laserové skenování, kdy laserový paprsek směřuje k povrchu a odražené světlo se analyzuje za účelem určení topografie povrchu. Tato metoda je vysoce přesná, dokáže měřit prvky v rozsahu mikrometrů až nanometrů, díky čemuž je vhodná pro aplikace ve výrobě polovodičů, leteckém inženýrství a nanotechnologiích. [26]



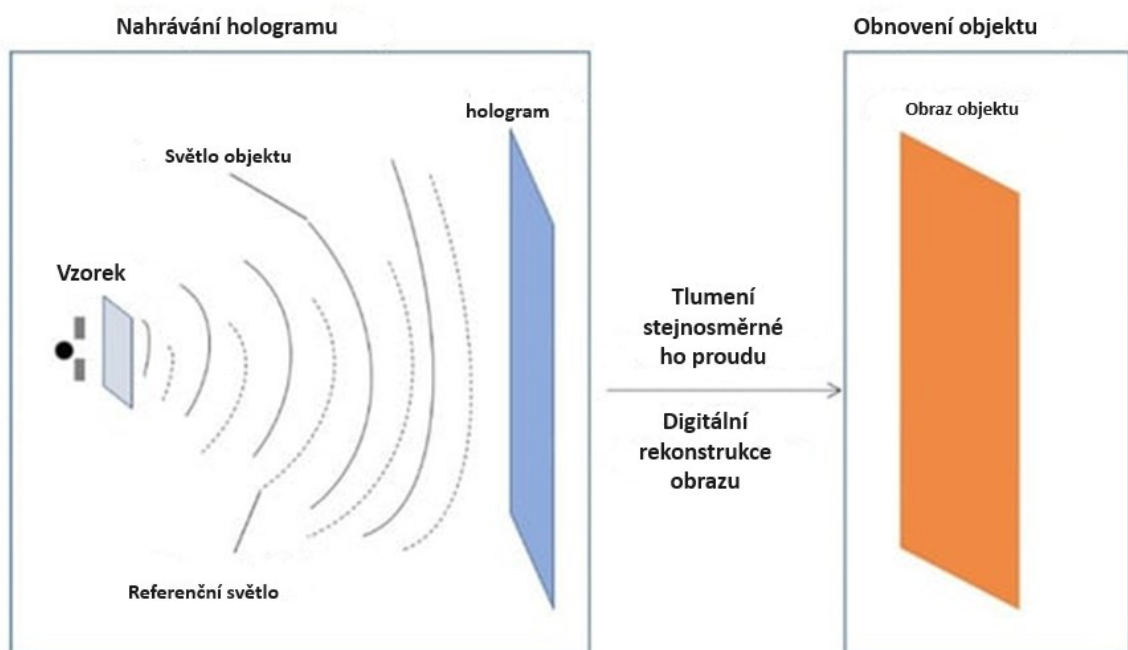
Obrázek 45 Základní schéma interferometrie v bílém světle [26]

Další technikou je interferometrie bílého světla, která využívá širokospektrální světelný zdroj k vytvoření interferenčního vzoru. Analýzou tohoto vzoru je možné získat vysoce přesná měření profilu povrchu. Tato metoda je zvláště užitečná pro měření drsných nebo složitých povrchů, které mohou být náročné pro jiné techniky. [26]



Obrázek 46 Schéma CLA snímače [25]

Navíc digitální holografie, metoda, která je vysoce pokročilá optická technika pro získávání a rekonstrukci trojrozměrných obrazů objektů. Funguje na principu holografie, která zahrnuje zaznamenávání světelného pole jako interferenčního vzoru pro pozdější rekonstrukci původního světelného pole, čímž umožňuje vizualizaci trojrozměrného tvaru předmětu. Na rozdíl od tradiční holografie, která používá k záznamu hologramů fotografické desky, digitální holografie zachycuje tyto interferenční obrazce přímo na digitální snímač, jako je CCD (charge-coupled device) nebo CMOS (komplementární metal-oxide-semiconductor). Toto digitální zachycení usnadňuje okamžité zpracování a analýzu holografických dat pomocí výpočetních algoritmů. [26]



Obrázek 47 Schéma principu digitální holografické mikroskopie [26]

Tyto bezkontaktní měřicí techniky nabízejí několik výhod, včetně vysoké rychlosti, vysoké přesnosti a schopnosti měřit jemné nebo měkké povrchy bez poškození. Jsou nepostradatelné v průmyslových odvětvích, kde je kvalita povrchu rozhodující pro výkon a dlouhou životnost produktu. [24,26]

Tyto metody však také přicházejí s problémy, jako je citlivost na faktory prostředí (např. vibrace, kolísání teploty). [24,26]

## 4.2 Normy popisující drsnost povrchu

Norma ČSN EN ISO 21920 určuje termíny, definice a metriky pro hodnocení povrchových struktur, včetně drsnosti, vlnitosti a profilu základní vrstvy, a to pomocí profilové metody. Rozdělení profilů na periodické a neperiodické zůstává otevřené interpretaci uživatele.

Pro rozlišení těchto metrik se využívají specifické vlnové délky. V kategorii největších vlnových délek spadají formy, které mohou být buď úmyslně vytvořené nerovnosti povrchu nebo vznikají nechtěně během výrobních procesů, jako je obrábění nebo tepelná deformace. [28]



Obrázek 48 Tvar povrchu [28]

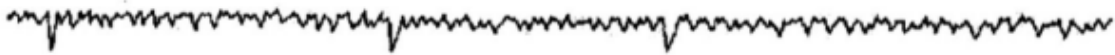
Menší vlnové délky bude zahrnovat vlnitost. Je to parametr, který se dá popsat jako periodicky se opakující nerovnosti. Vlnitost může být způsobena chvěním, špatným nastavením řezných podmínek, nebo malou tuhostí. [28]



Obrázek 49 Vlnitost povrchu [28]



Pod drsnost se řadí nejmenší vlnové délky. Jsou to nejmenší nerovnosti, které zanechává řezný nástroj a jsou ovlivněny především nastavenými řeznými podmínkami. Jedná-li se o technologie vstřikování, odlévání, nebo kování drsnost povrchu výrobku je dána drsností stěn formy. [28]



Obrázek 50 Drsnost povrchu [28]

#### 4.2.1 Obecné termíny:

##### **Skin model**

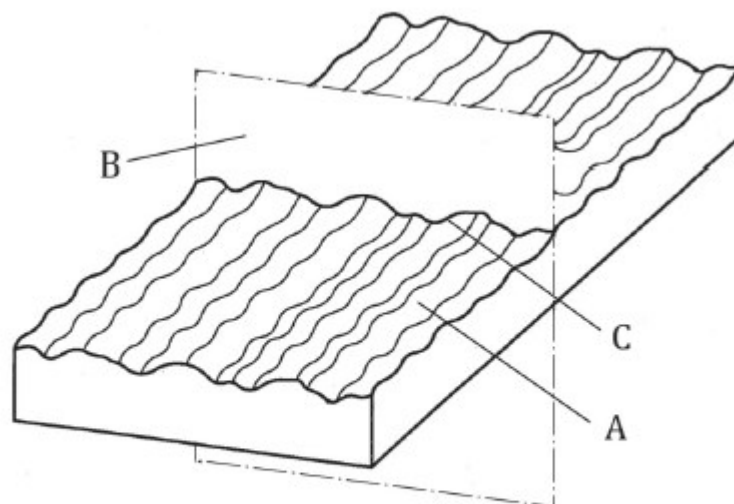
Model neideálního povrchu součásti, model fyzického rozhraní součásti s jeho okolím [27,28]

##### **Textura povrchu**

Geometrické nepravidelnosti obsažené v měřítku vymezeném povrchu [27,28]

##### **Čára profilu**

Průniková čára skin modelu a sečné roviny kolmé ke skin modelu a ve stanoveném směru [27,28]



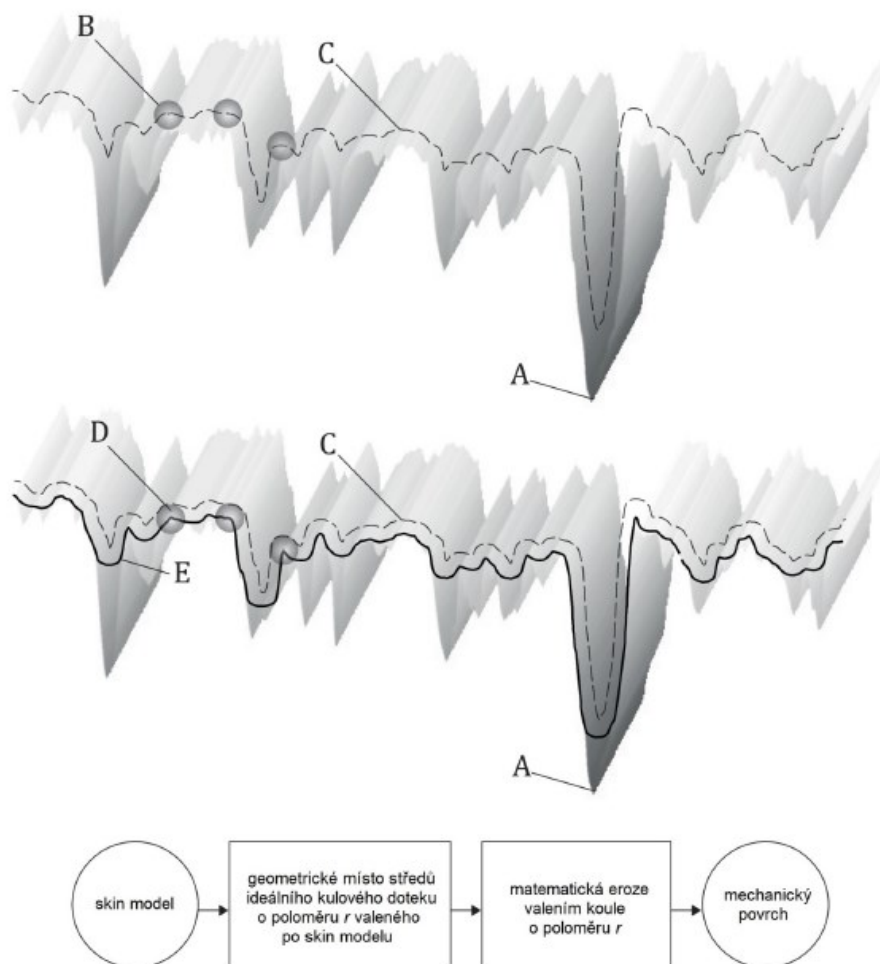
##### **Legenda**

- A skin model
- B sečná rovina
- C čára profilu

Obrázek 51 Čára profilu napříč skin modelem [28]

## Mechanický povrch

Rozhraní eroze vzniklé valením koule o poloměru  $r$  po geometrickém místě středů ideálního kulového doteku o poloměru  $r$ , který je valen po skin modelu součásti [28]



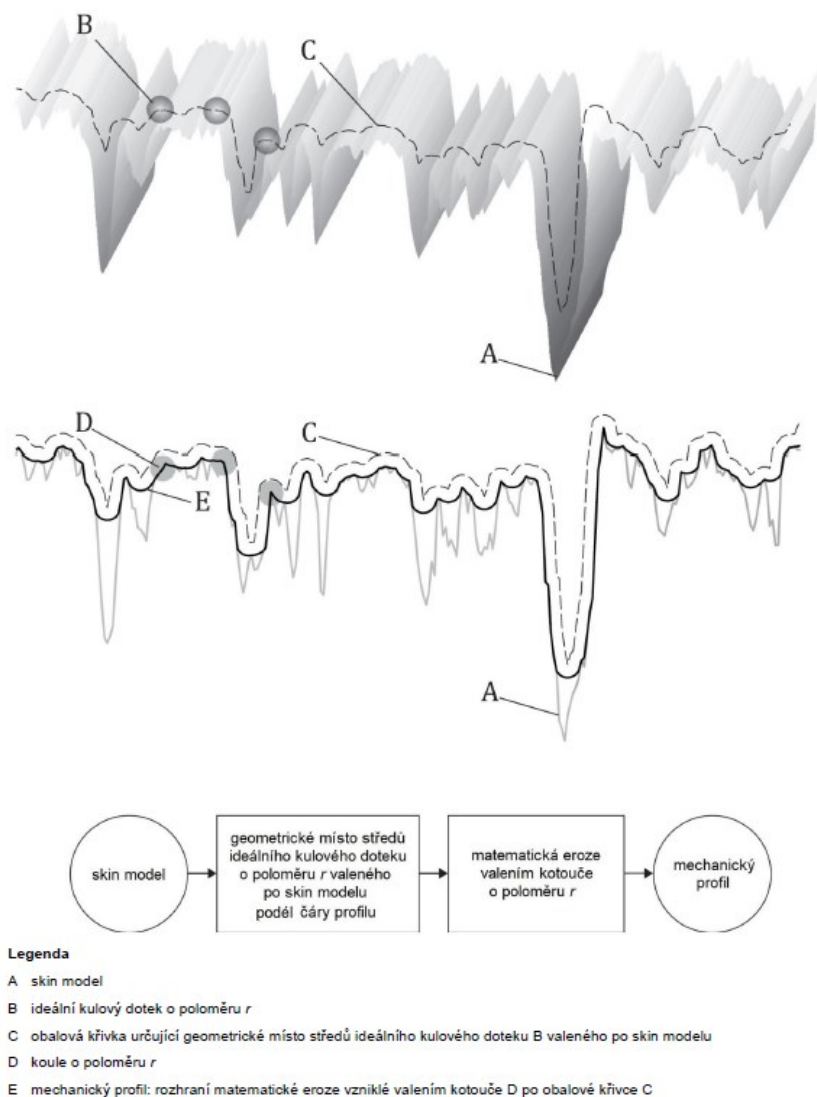
### Legenda

- A skin model
- B ideální kulový dotek o poloměru  $r$
- C obalová křivka určující geometrické místo středů ideálního kulového doteku B valeného po skin modelu
- D koule o poloměru  $r$
- E mechanický povrch: rozhraní matematické eroze vzniklé valením koule D po obalové křivce C

Obrázek 52 Mechanický povrch [28]

## Mechanický profil

Rozhraní matematické eroze vzniklé valením kotouče o poloměru  $r$  po geometrickém místě středů ideálního kulového doteku o poloměru  $r$ , který je valen podél čáry po skin modelu součásti [27,28]



Obrázek 53 Mechanický profil

## Pomocný povrch

Povrch, jiný než mechanický nebo elektromagnetický, získaný interakcí se skin modelem součásti [27,28]

## Pomocný profil

Profil, jiný než mechanický nebo elektromagnetický, získaný interakcí se skin modelem součásti [27,28]

## Filtr profilu

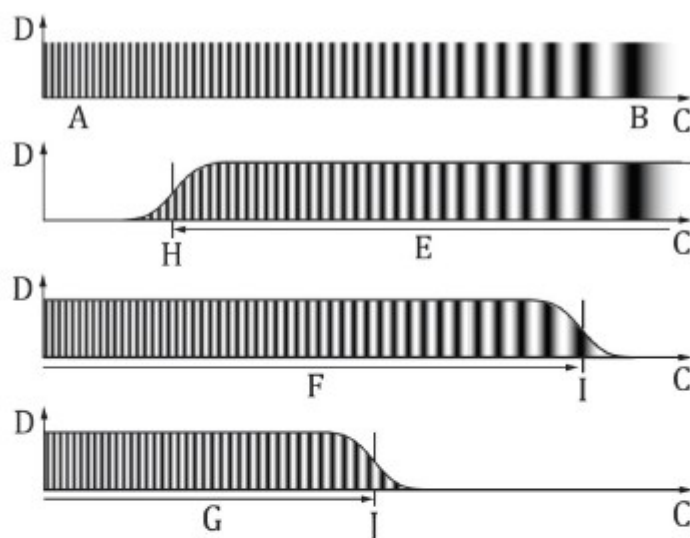
Filtr profilu je operátor filtrace aplikovaný na povrch

Rozeznáváme tři filtry profilu definované v ISO 21920-2.

**S** – profilový filtr, který odstraní laterální složky malého měřítka z profilu [28]

**L** - filtr profilu ,který odstraní laterální složky velkého měřítka z profilu. [28]

**F** – operace, která vyloučí vliv tvaru z profilu [28]



### Legenda

- A malé měřítko (např. krátké vlnové délky)
- B velké měřítko (např. dlouhé vlnové délky)
- C souřadnicová osa pro měřítko
- D souřadnicová osa pro amplitudu
- E složky vymezené měřítkem a extrahované profilovým S-filtrem
- F složky vymezené měřítkem a extrahované profilovou F-operací
- G složky vymezené měřítkem a extrahované profilovým L-filtrem
- H index vložení  $N_s$  pro profilový S-filtr
- I index vložení  $N_f$  pro profilovou F-operaci
- J index vložení  $N_L$  pro profilový L-filtr

Obrázek 54 Vztah mezi S,L a F operací [28]

**Souřadnicový systém**, je systém, ve kterém jsou definovány parametry textury povrchu. [28]

**Skutečný povrch** je povrch omezující těleso a oddělujícího od okolního prostředí. [28]

### Index vložení

$N_{ic}, N_{is}, N_{if}$

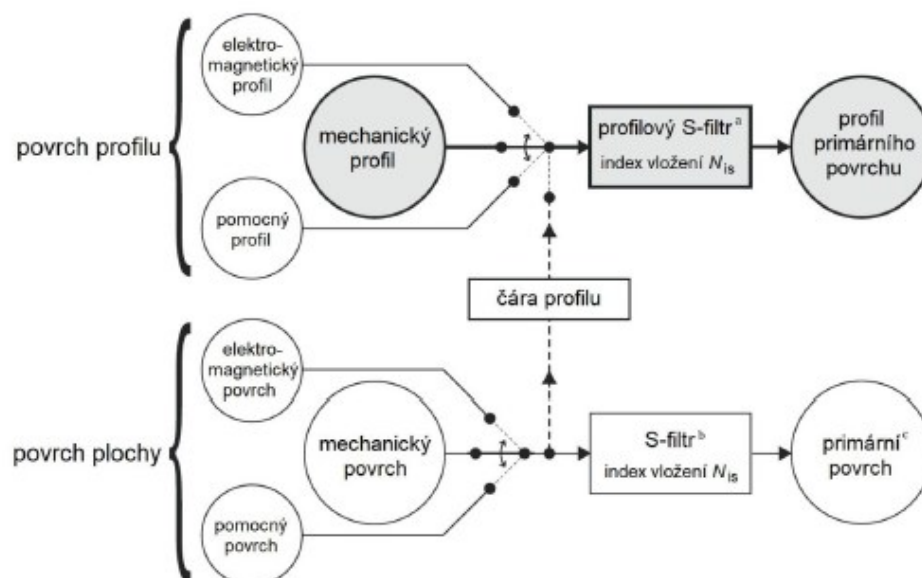
Číslo nebo soubor čísel indikující relativní úroveň vložení pro konkrétní primární matematický model

Pomocí těchto indexů vložení se extrahují určité laterální složky s daným měřítkem obsažené v měřítkem vymezeném profilu. [28]

**Primární profil povrchu (P-profil)** měřítkem vymezený profil v jakékoliv poloze  $x$  a odvozený z profilu primárního povrchu odstraněním tvaru pomocí profilové F-operace s indexem vložení  $N_{if}$ . [28]

**Profil drsnosti (R-profil)** je měřítkem vymezený profil v jakékoliv poloze umístění  $x$  a odvozený z primárního profilu odstraněním laterálních složek velkého měřítka pomocí určitého typu profilového I-filtru s indexem vložení  $N_{ic}$ . [28]

**Profil vlnitosti (W-profil)** měřítkem vymezený profil v jakékoliv poloze  $x$  a odvozený z primárního profilu odstraněním laterálních složek malého měřítka pomocí určitého typu profilového S-filtru s indexem vložení  $N_{ic}$ . [28]



Obrázek 55 Definice primárního povrchu a profilu primárního povrchu [28]

**Referenční čáry:**

**Referenční čára** je čára odpovídající konkrétní laterální složce velkého měřítka [28]

**Hodnocená délka  $l_e$** 

délka ve směru osy x použitá pro rozpoznání geometrických struktur charakterizujících měřítkem vymezený profil [28]

**Úseková délka  $l_{sc}$** 

délka ve směru osy x použitá k získání parametrů vztažených k úsekové délce [28]

**Počet úseků  $n_{sc}$** 

Celé číslo použité k získání parametrů vztažených k úsekové délce [28]

**4.2.2 Názvy vyhodnocovaných parametrů:**

**P-parametr** parametr stanovený z primárního profilu [28]

**R-parametr** parametr stanovený z profilu drsnosti [28]

**W-parametr** parametr stanovený z profilu vlnitosti [28]

**Předělová segmentace**

Operace filtrace, která prostorově rozkládá profil na vzájemně se vylučující části tohoto profilu [28]

**Výstupek profilu** je nejvyšší bod vrcholu, taktéž bod na profilu, který je vyšší než všechny ostatní body v blízkém okolí uvažovaného bodu [28]

**Prohlubeň profilu** je bod na profilu, který je nižší než všechny ostatní body v blízkém okolí uvažovaného bodu [28]

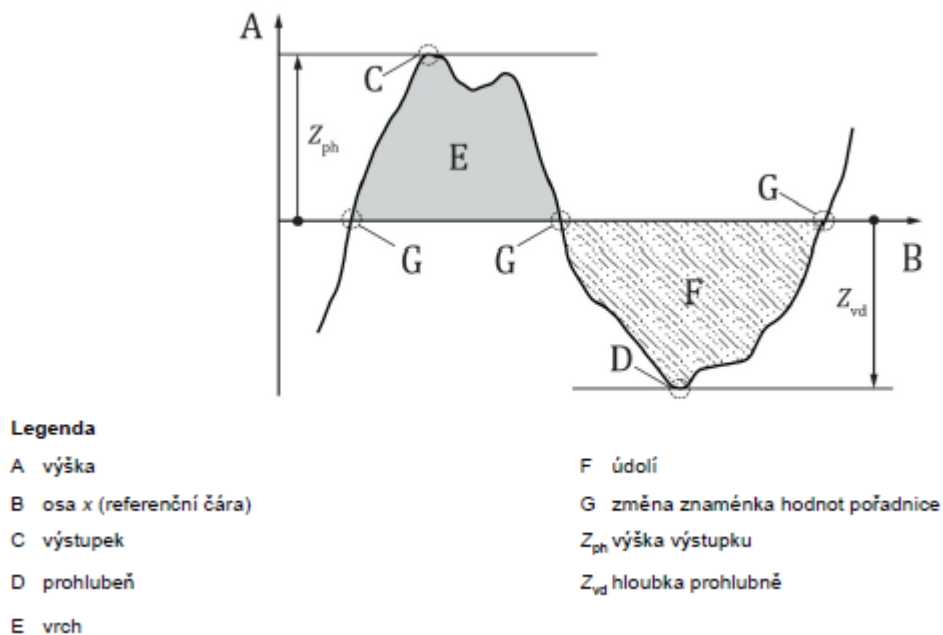
**Počet výstupků**

$n_p$  – celé číslo představující počet významných výstupků v rámci hodnocené délky [28]

**Omezení výšky anebo rozteče** je nejmenší výška a nejmenší rozteč výstupků a prohlubní posuzovaného profilu, které mohou být brány v úvahu. [28]

**Prvek profilu** (profile element) je výstupek profilu a přilehlá prohlubeň [28]

- plusová nebo minusová část zkoumaného profilu na začátku nebo na konci základní délky by měla být brána jako výstupek profilu nebo za její prohlubeň. [28]



Obrázek 56 Výška výstupku a hloubka prohlubně (referenční čára) [28]

#### 4.2.3 Definice parametrů profilu povrchu

**Popiš výškových parametrů:**

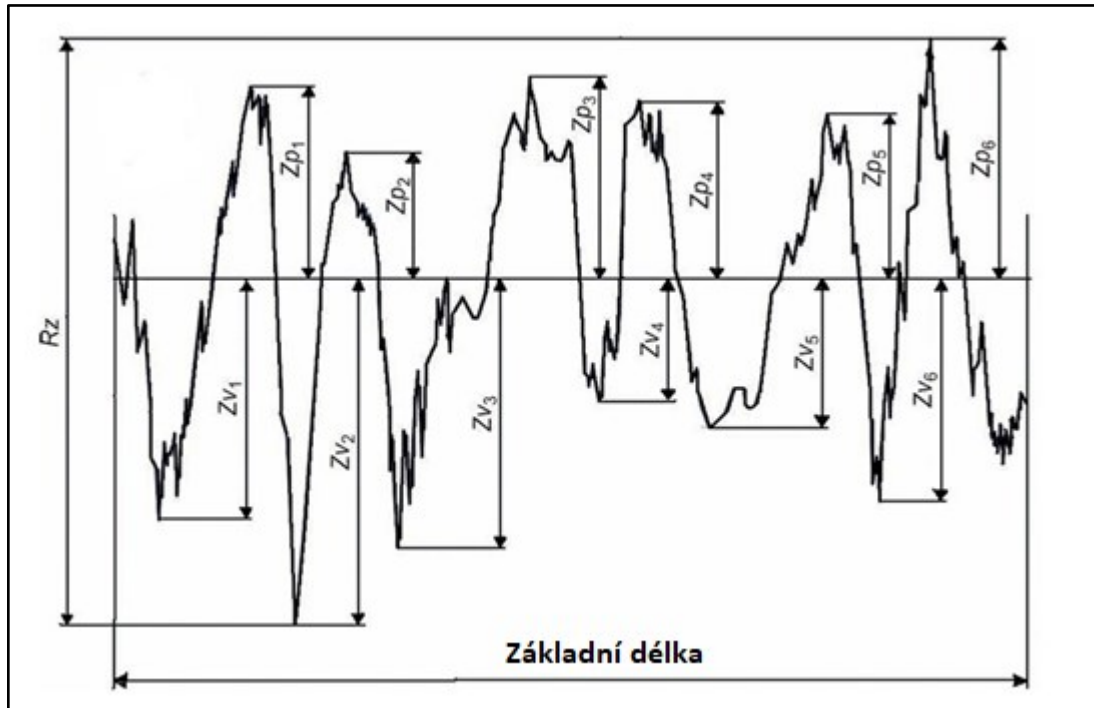
**Největší výška výstupku profilu  $R_p$**  – v rozsahu základní délky je to výška  $Z_p$  nejvyššího výstupku, která je udávána v  $\mu\text{m}$ . [28]

**Největší hloubka prohlubně profilu  $R_v$**  – v rozsahu základní délky je to hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně. [28]

**Největší výška profilu  $R_z$**  - je součet výšky  $R_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $R_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. [28]

zapsáno rovnicí:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vmi}|}{5} \quad (6)$$



Obrázek 57 Parametry výšek profilu [28]

**Celková výška profilu  $R_t$**  – je součtem výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [28]

**Střední aritmetická výška  $R_a$**  – je průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $R_a$  – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic hodnot  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ . [28]

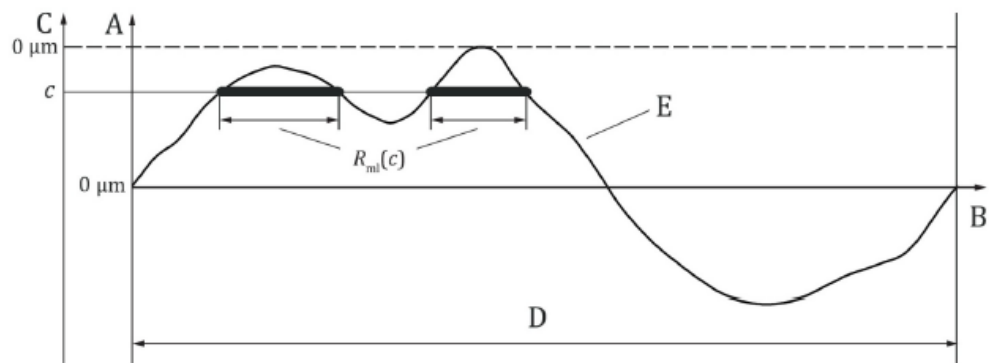
zapsáno rovnicí:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l [Z(x)] dx \quad (7)$$

**Hybridní parametry:**

**Materiálová délka  $R_{ml}$**  – je kumulovaná délka částí profilu protnutých čarou ve výškové úrovni  $c$ . Referenční výška pro úroveň  $c = 0 \mu\text{m}$  je maximální výška měřítkem vymezeného profilu v rámci hodnocené délky  $l_e$ . [28]





**Legenda**

- |   |                                    |   |                 |
|---|------------------------------------|---|-----------------|
| A | výška                              | D | hodnocená délka |
| B | osa x (referenční čára)            | E | profil          |
| C | osa pro výškovou úroveň protnutí c |   |                 |

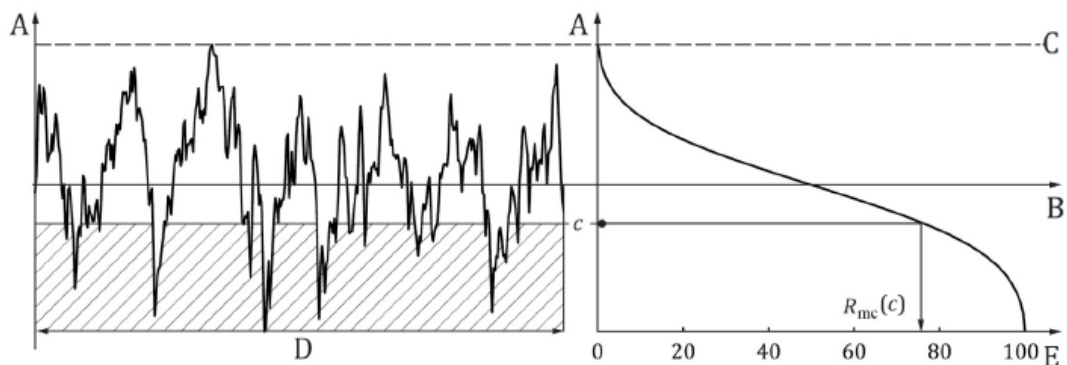
Obrázek 58 Materiálová délka [28]

**Materiálový poměr R<sub>mr</sub>** – je poměr parametu „materiálová délka“ v dané výškové úrovni protnutí c k hodnocené délce *l<sub>e</sub>*. Vypočítá se podle vzorce [28]

$$R_{mr} = \frac{R_{ml}}{l_e} \tag{8}$$

**Křivka materiálového poměru**

Křivka materiálového poměru (taktéž známá jako Abbott-Firestonova křivka) představuje materiálový poměr měřítkem vymezeného profilu jako funkci výškové úrovně protnutí c. Křivka materiálového poměru se stanovuje podle přílohy C. [28]



**Legenda**

- |   |                         |   |  |
|---|-------------------------|---|--|
| A | výška                   | D | hodnocená délka                          |
| B | osa x (referenční čára) | E | materiálový poměr vyjádřený v procentech |
| C | výšková úroveň c = 0 μm |   |  |

Obrázek 59 Křivka materiálového poměru pro R-profil [28]

## 5 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Teoretická část slouží jako souhrnný podklad pro objasnění problematiky laserového obrábění, účinků tohoto obrábění na zvolený materiál a popisu děje při procesu tohoto obrábění. Dále poskytuje informace o současných nekonvenčních metodách obrábění, jejich porovnání, rozdělení a charakteristice. Rovněž jsou v této části diplomové práce popsány metody hodnocení povrchu po obrobení nekonvenčními metodami obrábění, a to s odkazem na současné normy hodnocení jakosti povrchu ČSN EN ISO 21920-(1-3).

Mezi cíle praktické části patří porovnání předem zvolených parametrů vláknového laseru a zkoumání jejich vlivu na vybrané materiály. U těchto materiálů se bude hodnotit kvalita obrobeného povrchu na zvolených parametrech Ra a Rz a zda tyto parametry korelují při stejném nastavení laseru mezi zkoumanými materiály. Parametry těchto materiálů budou měřeny na bezkontaktním profilometru Zygo, včetně předchozí kontroly optickým mikroskopem na vrypy či různé povrchové deformace, které by mohly způsobit hrubé chyby ve vyhodnocovaných datech. Zkoumané parametry budou dále posuzovány a statisticky vyhodnocovány v programu Minitab.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 PŘÍPRAVA VZORKŮ A MĚŘENÍ

Při experimentálním studiu účinků vybraných nastavení vláknového laseru na obrobení zkoumaných materiálů byly připraveny vzorky z čistého hliníku, mosazi, oceli 12024 a nerezové oceli 19 820 - 304L. Vzorek materiálu **oceli 19 820** může být ve statistickém vyhodnocení v pozdějších kapitolách označen také jako **304L**. Pro každý materiál byla vyřezána jedna destička o rozměrech dle požadavků experimentálního designu, kde každá destička obsahovala 25 obrobených ploch. Každá plocha byla upravena s odlišným nastavením rychlosti posuvu laseru a výkonu laseru, což umožnilo analyzovat vliv těchto proměnných na kvalitu a charakteristiku obrobeného povrchu.

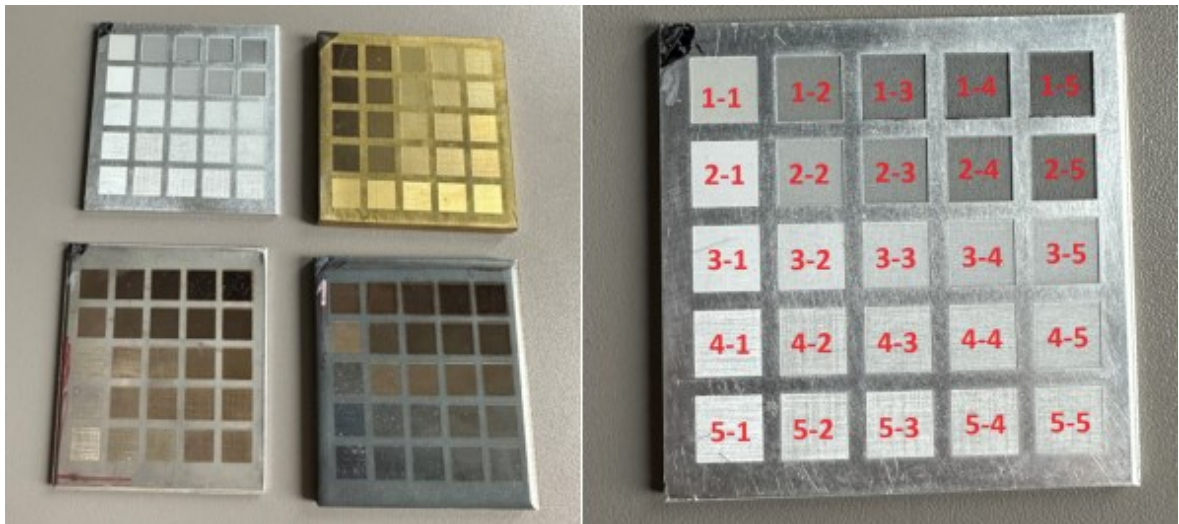
Obrobení bylo provedeno pomocí vláknového laseru Lasertec 80 Shape od firmy Sauer, který je speciálně navržen pro přesné a efektivní laserové zpracování. Tento laser poskytuje vysokou přesnost a konzistenci v obrobení, což je klíčové pro výzkumné účely.

Po dokončení laserového obrobení byly všechny plošky pečlivě zkontrolovány, aby se zjistilo, zda na nich nejsou přítomné vrypy nebo jiné defekty. Tyto defekty by mohly významně ovlivnit výsledky měření, a to jak ve smyslu odlehklých hodnot, tak ve výskytu hrubých chyb. Kontrola kvality byla provedena vizuálně i s využitím mikroskopie, což umožnilo detailní přezkoumání každé obrobené plošky. Výsledky této kontroly byly důležité pro další analýzu a zpracování dat, jelikož jakékoli zjištěné nedostatky mohly ovlivnit celkovou interpretaci výsledků experimentu. Tento pečlivý přístup k přípravě a kontrole vzorků je nezbytný pro zajištění objektivitu a spolehlivosti prováděného výzkumu

### 6.1 Popis vzorků

Vzorky použité pro diplomovou práci byly vyřezány z destiček mosazi, čistého hliníku, nerezové oceli 19 820 a oceli 12 024, tyto materiály jsou běžně využívány pro konstrukci vstříkovací forem, kde interpretované výsledky nacházejí uplatnění. Velikost destiček byla stanovena na 65x65 mm, z toho obrobené plochy ve velikosti 5x5 mm.

Příkladem pro interpretaci nastavení laseru je níže na obrázku destička čistého hliníku, která zobrazuje ve sloupcích vzestupně výkon laseru od 10W po 50W při zachování konstantní rychlosti posuvu. Řádky interpretují vzestupné nastavení rychlosti posuvu v rozsahu 500 – 2250 mm/s. Takováto nastavení parametrů laseru, dána tabulkou č. 2 jsou použita pro všechny zkoumané materiály.



Obrázek 60 Zkoumané materiály a popis nastavení laseru pro jednotlivá pole

Tabulka 2 Charakteristické parametry nastavení laseru

Označení	I [w]	d (paprsku) [um]	f [KHz]	V [mm/s]
1-1	10	10	50	500
1-2	20	10	50	500
1-3	30	10	50	500
1-4	40	10	50	500
1-5	50	10	50	500
2-1	10	15	50	750
2-2	20	15	50	750
2-3	30	15	50	750
2-4	40	15	50	750
2-5	50	15	50	750
3-1	10	30	50	1500
3-2	20	30	50	1500
3-3	30	30	50	1500
3-4	40	30	50	1500
3-5	50	30	50	1500
4-1	10	40	50	2000
4-2	20	40	50	2000
4-3	30	40	50	2000
4-4	40	40	50	2000
4-5	50	40	50	2000
5-1	10	45	50	2250
5-2	20	45	50	2250
5-3	30	45	50	2250
5-4	40	45	50	2250
5-5	50	45	50	2250

## 6.2 Materiály zkoumaných vzorků

Při realizaci tohoto experimentu byly použity vzorky ve formě čtvercových destiček o rozměrech 65x65 mm a tloušťce 6 mm. Tyto vzorky byly pečlivě vyřezány z desek, které jsou vyrobeny z různých materiálů, a to konkrétně ze čtyř typů kovů: oceli 12 024, mosazi, čistého hliníku a oceli 19 820.

Výběr těchto materiálů byl motivován jejich běžným využitím při konstrukci částí vstřikovacích forem. Chemické složení těchto kovů ovlivňuje jejich pevnost, tvrdost a další fyzikálně-mechanické vlastnosti, které jsou klíčové pro jejich využití v daných aplikacích.

Ocel 12024 a ocel 19820 jsou známé svou vysokou pevností a odolností proti opotřebení, zatímco mosaz a čistý hliník nabízejí jiné žádoucí vlastnosti, jako je dobrá obráběcí schopnost a tepelná vodivost.

Materiál Ocel 12 024 je nízkolegovaná konstrukční ocel s prvky chromu, molybdenu a niklu, které zvyšují její mechanické vlastnosti a odolnost proti korozi. Je pevná, dobře se svařuje a lze ji upravit různými druhy tepelného zpracování. Díky vysoké pevnosti a dobré tvárnosti se používá v těžkém strojírenství, automobilovém průmyslu a výrobě náradí. U vstřikovacích forem se využívá pro běžné části forem bez požadavků na extrémně vysoké mechanické vlastnosti.

Tabulka 3 Chemické složení konstrukční oceli 12 024

Chemické složení [hm. %]							
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,17 až 0,24	0,35 až 0,65	0,15 až 0,40	max. 0,25	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,040	max. 0,040

Ocel 19 820 je nástrojová ocel vynikající vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení. Obsahuje vyšší podíl uhlíku a prvky jako wolfram, vanad a molybden, které zvyšují její odolnost a tvrdost. Tato ocel je ideální pro výrobu nástrojů a forem vyžadujících přesnost a dlouhou životnost, jako jsou nárazníky a nože pro řezání. U částí vstřikovacích forem se využívá pro zvláště namáhané části jako upínací a vyhazovací desky, či tvárník s tvárnici. Je možné ji kalit a popouštět pro optimalizaci jejich vlastností.

Tabulka 4 Chemické složení rychlořezné oceli 19 820

Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	P	S
0,05 až 1,05	Max. 0,45	Max. 0,45	3,80 až 4,60	2,40 až 3,40	2,00 až 2,70	2,20 až 3,20	max. 0,035	max. 0,035

Mosaz je slitina mědi a zinku, která se vyznačuje dobrou korozní odolností, výbornou obráběcí schopností a vysokou tepelnou vodivostí. Díky těmto vlastnostem je mosaz často používána ve výrobě vstřikovacích forem, kde její tepelná vodivost zlepšuje rovnoměrné rozložení tepla a zkracuje časy chlazení formy. To umožňuje rychlejší cykly výroby a zvyšuje efektivitu výrobního procesu. Nejčastěji se využívá u přípojek a závitových vložek.

Tabulka 5 Chemické složení mosazi

Chemické složení [hm. %]							
Cu	Mn	Ni	Fe	Pb	Sn	Al	Zn
62 až 64	Max. 0,45	Do 0,3	Do 0,1	Do 0,1	Do 0,1	Do 0,03	zbytek

Čistý hliník je měkký kov s vynikající tepelnou a elektrickou vodivostí, nízkou hustotou a dobrou odolností proti korozi. Tyto vlastnosti činí hliník vhodným pro využití ve vstřikovacích formách, zejména v situacích, kde je potřeba lehkost a efektivní odvod tepla. Jeho vysoká tepelná vodivost napomáhá rychlému chlazení formy, což bývá využito a zahrnuto při konstrukci temperačních systémů. Díky své měkkosti a dobré formovatelnosti lze hliník snadno zpracovávat do požadovaných tvarů, případně i jako hliníkových fólií. Nicméně, kvůli své nižší pevnosti a tvrdosti, může být méně vhodný pro aplikace vyžadující extrémní mechanickou odolnost.

Tabulka 6 Chemické složení čistého hliníku

Chemické složení [hm. %]	
Al	Legující prvky
Min. 99	do 1

## 6.3 Popis zařízení pro experimentální část

### 6.3.1 Vlákňový laser Sauer - Lasertec 80 Shape

Tento laserový systém je vysoce pokročilé zařízení určené pro přesné a efektivní zpracování materiálů. Laserový systém Lasertec 80 Shape využívá vlákňovou laserovou technologii, která poskytuje vysokou přesnost a opakovatelnost v procesu řezání, gravírování a dalších aplikací.

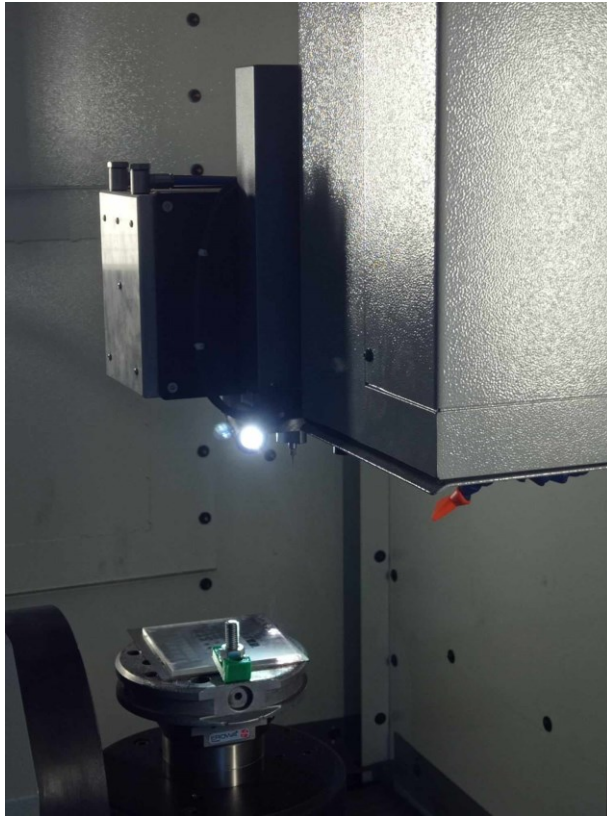
#### Technické parametry:

- **Typ laseru:** Vlákňový laser
- **Maximální výkon:** Typicky v rozsahu od 500 W do 2 kW, přesné údaje závisí na konkrétním modelu
- **Pracovní plocha:** Max. v ose X 500 mm, Max v ose Y 460 mm, Max v ose Z 700 mm
- **Přesnost umístění:** Vysoká přesnost umístění vzorku  $\pm 0,005$  mm
- **Osvětlení pracovní oblasti:** Integrované LED osvětlení pro lepší vizualizaci pracovního procesu



Obrázek 61 Vlákňový laser Sauer -Lasertec 80 Shape





Obrázek 62 Detail při obrábění vzorku Hliníku

### 6.3.2 Měřicí přístroj Zygo NewView™ 8000

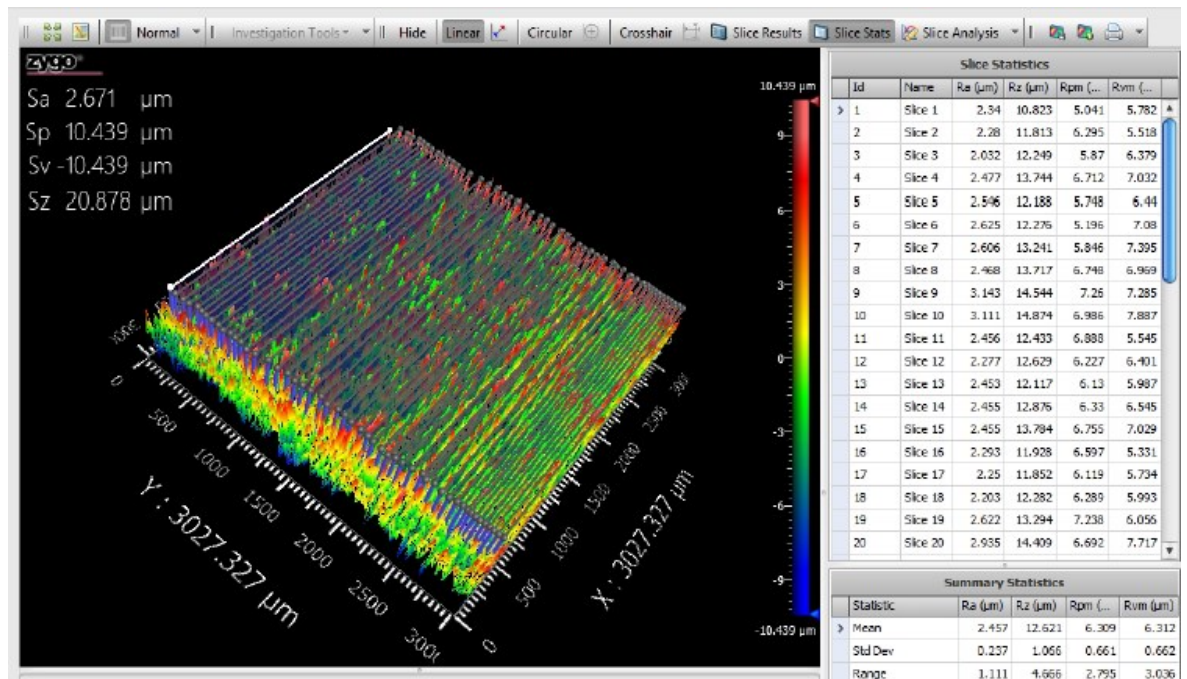
Měřicí přístroj Zygo NewView™ 8000 od firmy Ametek je pokročilé zařízení pro bezkontaktní 3D optické profilování povrchů. Tento přístroj je designován pro vysoce přesné měření topografie povrchu s rychlým skenovacím mechanismem, což umožňuje detailní měření různých typů povrchů, včetně hladkých, hrubých, plochých, šikmých či stupňovaných.

#### Technické specifikace:

- **Rozlišení:** Vysoké rozlišení až na sub-nanometrové úrovni, což zajišťuje extrémní přesnost v měření.
- **Měřicí rozsah:** Rozsah od několika mikrometrů do desítek milimetrů.
- **Rychlost skenování:** Rychlé skenování umožňuje efektivní měření velkých ploch.

**Software:**

- **Zygo MetroPro:** Tento software pro zpracování a analýzu dat nabízí intuitivní ovládání a široké možnosti pro detailní analýzu povrchu.



Obrázek 63 Ukázka softwaru pro povrch o padesáti řezech

**Výhody:**

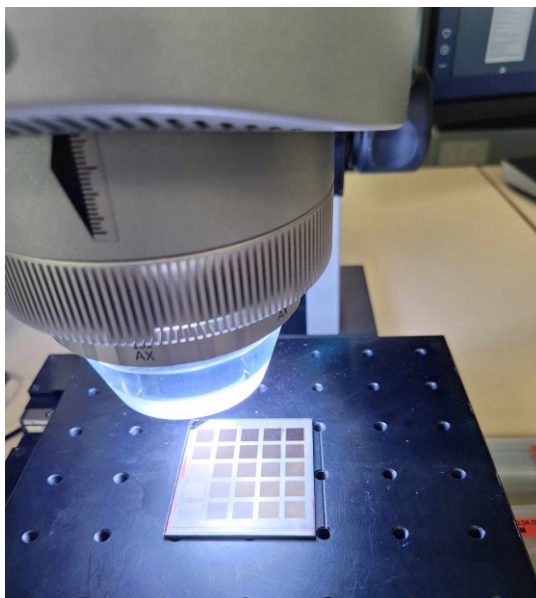
- **Přesnost a citlivost:** Umožňuje měření s vysokou přesností a citlivostí, což je klíčové pro aplikace vyžadující detailní topografické mapy.
- **Rychlost a bezkontaktní měření:** Schopnost rychle získávat data a 3D vizualizace povrchu zvyšují produktivitu a minimalizují riziko poškození vzorku.
- **Flexibilita:** Přizpůsobitelný rozsah měření a rozlišení, vhodný pro různé typy povrchů.

**Nevýhody:**

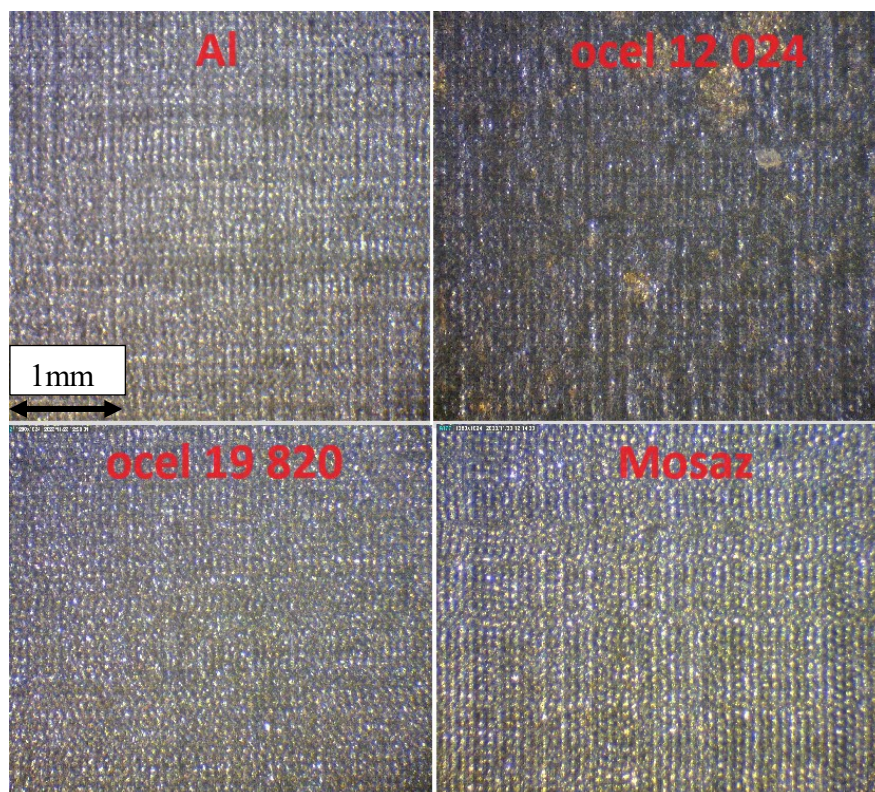
- **Cena:** Vyšší náklady na pořízení a údržbu
- **Komplexnost:** Vyžaduje školení pro efektivní využívání pokročilých funkcí, což může být výzvou pro nové uživatele.

### 6.3.3 Optický mikroskop Leica

Optický mikroskop byl v experimentu použit pro detailní vizuální kontrolu povrchů zpracovaných laserem. Hlavním účelem bylo zjistit, zda se na povrchu nacházejí vrypy či jiné nedostatky, které by mohly ovlivnit přesnost měření.



Obrázek 64 Detail vizuální kontroly mikroskopem



Obrázek 65 Foto vzorků po obrobení při nastavení laseru 5-5, viz. Tabulka 2

## 7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÝCH POVRCHŮ

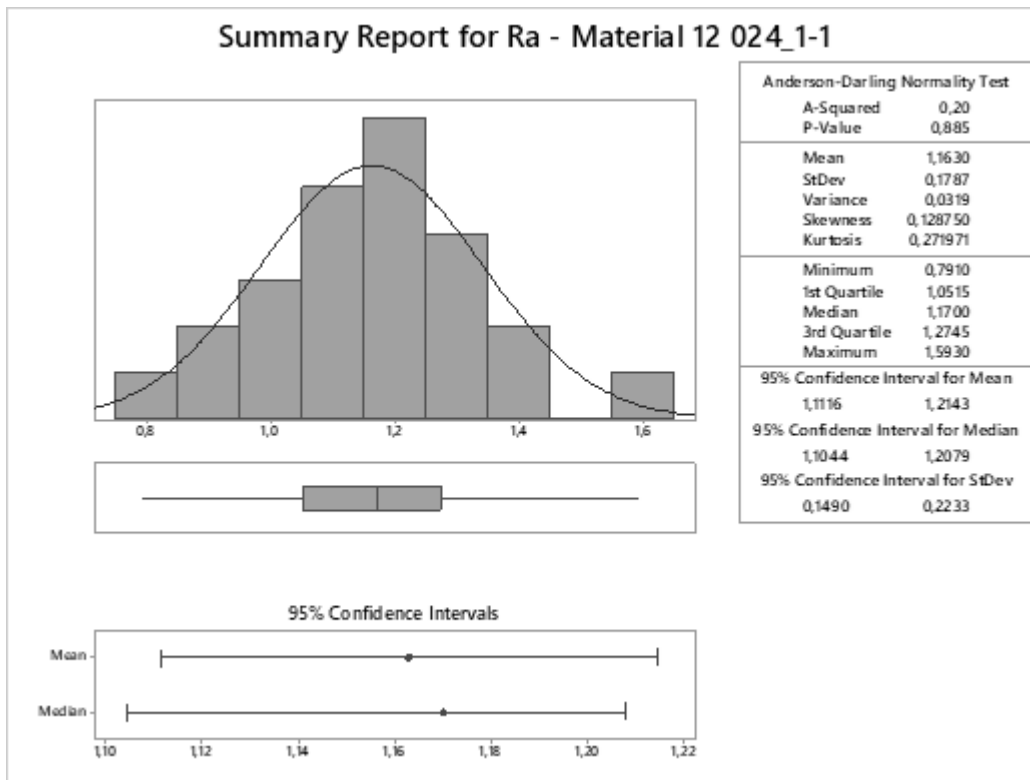
Snímání povrchu bylo realizováno pomocí bezkontaktního profilometru Zygo NewView 8000, což poskytlo 3D zobrazení vyhodnocované plochy s detailním pohledem na případná kritická místa. Před snímáním byly vzorky kontrolovány na mikroskopu Leica, aby se identifikovala místa nevhodná pro měření z důvodu potenciálního narušení struktury během laserového obrobění. Po této přípravě byly vzorky očištěny od nečistot a odmaštěny pro eliminaci jakýchkoli elementů, které by mohly ovlivnit přesnost měření. Profilometr pracuje na principu odrazení paprsku z polovodičového laseru od povrchu materiálu, přičemž odražené světlo je zachycováno optickým systémem a zpracováváno CCD snímačem, což umožňuje přesnou lokalizaci zaměřených bodů bez rizika poškození měřeného materiálu. Pro vyhodnocení byly z obrázků povrchu extrahovány řezy, na základě kterých byly měřeny a analyzovány parametry **Rz** (největší výška profilu), **Ra** (průměrná aritmetická odchylka profilu).

### 7.1 Vyhodnocení pomocí metodiky EDA

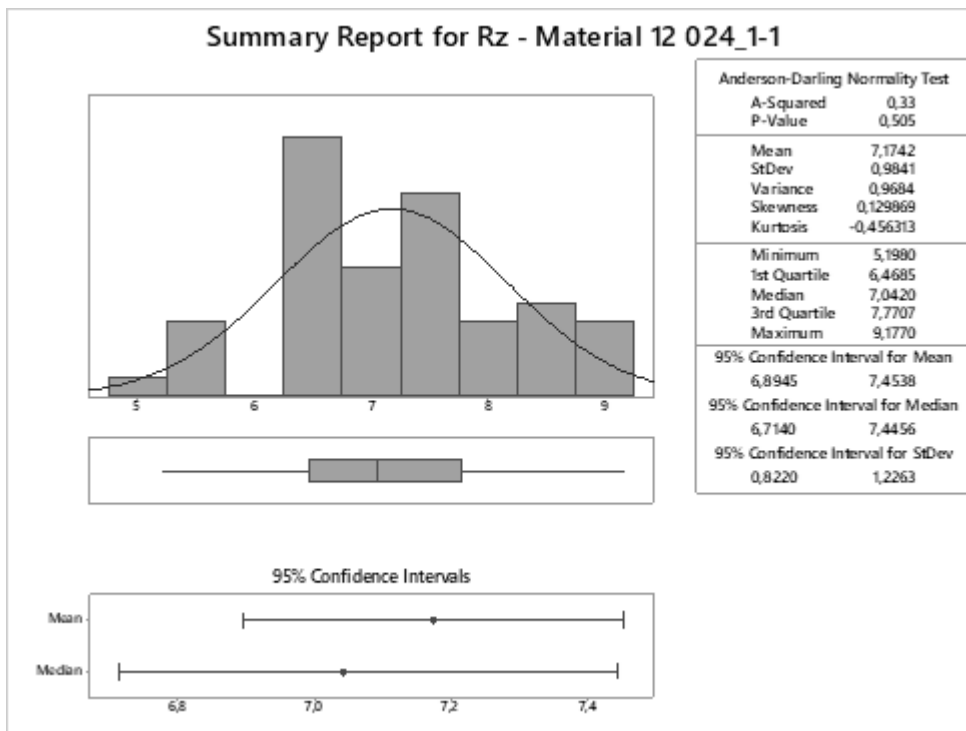
Exploratorní datová analýza (EDA) je přístup k analýze datových setů, který se zaměřuje na jejich "prozkoumání" za účelem sumarizace jejich hlavních charakteristik, často s vizuálními metodami. EDA je kritickým krokem v analytickém procesu, který předchází formalizovanému statistickému modelování a umožňuje analytikům objevovat vzory, odhalovat anomálie, testovat hypotézy a ověřit předpoklady s pomocí statistických grafů a sumarizací. Klíčovými prvky EDA jsou histogramy, scatter ploty, boxploty a mnoho dalších grafických zobrazení, která umožňují intuitivněji pochopit rozložení a vztahy v datech.

V rámci vyhodnocení naměřených výsledků byla provedena exploratorní datová analýza pomocí softwaru Minitab 17, s cílem pochopit charakteristiky dat. Klíčové parametry pro vyhodnocení Ra a Rz, byly díky nástrojům tohoto softwaru důkladně prozkoumány. Iniciální kroky zahrnovaly ověření normality rozdělení, což je zásadní pro určení vhodnosti dat pro další statistické analýzy. V procesu bylo dále identifikováno, zda soubor neobsahuje odlehlé hodnoty (outliery), které byly buď ponechány, pokud šlo o reálné výsledky, nebo odstraněny v případě, že se jednalo o hrubé chyby.

7.1.1 Materiál ocel 12 024



Obrázek 66 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro ocel 12 024



Obrázek 67 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro ocel 12 024



Pro reprezentativní ukázkou, Grafický sumář dat Ra pro vzorek oceli 12 024 ukázal, že při konzistentním nastavení laseru 1-1 podle tabulky č. 2 data následovala normální rozdělení a nebylo zjištěno podezření na hrubé chyby. Tento postup byl aplikován na všechny sady dat, pro parametry Ra a Rz u všech testovaných materiálů.

Aplikací Anderson-Darlingova testu normality a získáním p-hodnoty vyšší než 0,05 předpokládáme, že všechny naměřené skupiny dat vykazovaly znaky normálního rozdělení. Na základě těchto výsledků bylo možné nepopřít hypotézu o normálním rozdělení dat s pravděpodobností chyby  $\alpha = 0,05$ , což odpovídá 5% riziku omylu. U žádného vzorku zkoumaným pomocí Anderson-Darlingova testu nedošlo k výskytu „p“ hodnoty menší než 5%. Z důvodu zjednodušení interpretace výsledků a vizuální podoby je uvedeno v tabulkách všech zkoumaných materiálů ve sloupci pro AD test normality pouze „OK“. Takovéto provedení značí, že „p“ hodnota byla vyšší než nastavená hranice  $\alpha = 0,05$  a parametr splnil předpoklad pro normalitu dat.

Tabulka 7 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro materiál ocel 12 024

Vzorek 1-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu$ m]	1,5293	1,537	0,2434	OK	1,131	2,108
Rz[ $\mu$ m]	7,1742	7,042	0,9841	OK	5,198	9,177
Vzorek 1-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	2,4287	2,454	0,1967	OK	2,032	2,942
Rz[ $\mu$ m]	12,621	12,537	1,066	OK	10,208	14,874
Vzorek 1-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	12,613	12,777	2,033	OK	8,606	17,755
Rz[ $\mu$ m]	60,784	60,608	8,153	OK	44,692	76,769
Vzorek 1-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	18,506	17,855	2,675	OK	14,059	24,739
Rz[ $\mu$ m]	89,409	87,894	10,064	OK	71,523	113,159
Vzorek 1-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	18,363	18,48	3,31	OK	13,213	28,913
Rz[ $\mu$ m]	87,021	87,233	10,832	OK	61,411	112,698
Vzorek 2-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	1,6015	1,5895	0,1819	OK	1,225	2,055
Rz[ $\mu$ m]	7,263	7,2875	0,7382	OK	5,769	9,14
Vzorek 2-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	1,5441	1,5105	0,1775	OK	1,93	2,138
Rz[ $\mu$ m]	7,8261	7,939	0,7875	OK	5,977	9,464
Vzorek 2-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	2,0978	2,058	0,169	OK	1,785	2,445
Rz[ $\mu$ m]	10,883	11,037	0,808	OK	9,244	12,198
Vzorek 2-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max

Ra[μm]	2,1278	2,158	0,169	OK	1,785	2,445
Rz[μm]	10,962	10,756	0,862	OK	9,744	12,298
Vzorek 2-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	2,5429	2,547	0,2329	OK	Min.	Max
Rz[μm]	12,914	12,681	1,125	OK	1,897	3,095
Vzorek 3-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,5948	1,6255	0,1922	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,2309	7,2995	0,6539	OK	10,817	15,956
Vzorek 3-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,6184	1,6685	0,164	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,4528	7,402	0,5905	OK	1,228	1,879
Vzorek 3-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,481	1,4975	0,179	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,1584	7,048	0,7742	OK	1,113	1,962
Vzorek 3-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,5774	1,5715	0,1607	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,7016	7,724	0,6822	OK	5,509	9,386
Vzorek 3-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,6472	1,6115	0,224	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,8875	7,723	0,7333	OK	1,262	2,123
Vzorek 4-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,7935	1,7555	0,2509	OK	Min.	Max
Rz[μm]	8,2223	8,2575	0,9753	OK	0,971	2,368
Vzorek 4-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,5403	1,54	0,2269	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,2564	7,2485	0,9683	OK	5,004	10,073
Vzorek 4-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,5728	1,5815	0,2092	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,498	7,4975	0,8181	OK	1,114	1,988
Vzorek 4-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,4946	1,4775	0,154	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,0202	6,881	0,6387	OK	1,15	1,796
Vzorek 4-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,3306	1,3315	1,422	OK	Min.	Max
Rz[μm]	6,5899	6,618	0,6275	OK	1,097	1,76
Vzorek 5-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,8296	1,8175	0,2156	OK	Min.	Max
Rz[μm]	8,5494	8,598	0,7607	OK	5,071	8,112
Vzorek 5-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,6396	1,6405	0,2319	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,6005	5,901	0,9866	OK	1,229	2,209
Vzorek 5-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,6159	1,6045	0,2162	OK	Min.	Max
Rz[μm]	7,367	7,2005	0,7981	OK	5,901	10,171
Vzorek 5-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,4847	1,4745	0,1973	OK	Min.	Max
Rz[μm]	6,9767	6,9155	0,7642	OK	1,162	2,145
Vzorek 5-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[μm]	1,3844	1,371	0,1759	OK	Min.	Max
Rz[μm]	6,8306	6,68	0,8449	OK	5,98	9,237
					5,31	8,517
					0,979	1,855
					5,472	9,156

Tabulka č. 7 ukazuje získané hodnoty parametrů Ra a Rz pro veškeré kombinace nastavení výkonu a rychlosti vláknového laseru. Pro každou kombinaci nastavení byl proveden grafický sumář pro potvrzení normality testovaných dat. Taktéž za pomoci Grubbsova testu odlehlých hodnot bylo posuzováno, zda se v jednotlivých souborech dat nacházejí odlehlé hodnoty či hrubé chyby. Byla aplikována teorie hypotéz formulovaná takto:

- **Parametr Ra**

H0: Ra<sub>i</sub> max,min = všechna data pocházejí ze stejného normálního rozdělení

Ha: Ra<sub>i</sub> max,min = nejmenší nebo největší hodnota je outlier

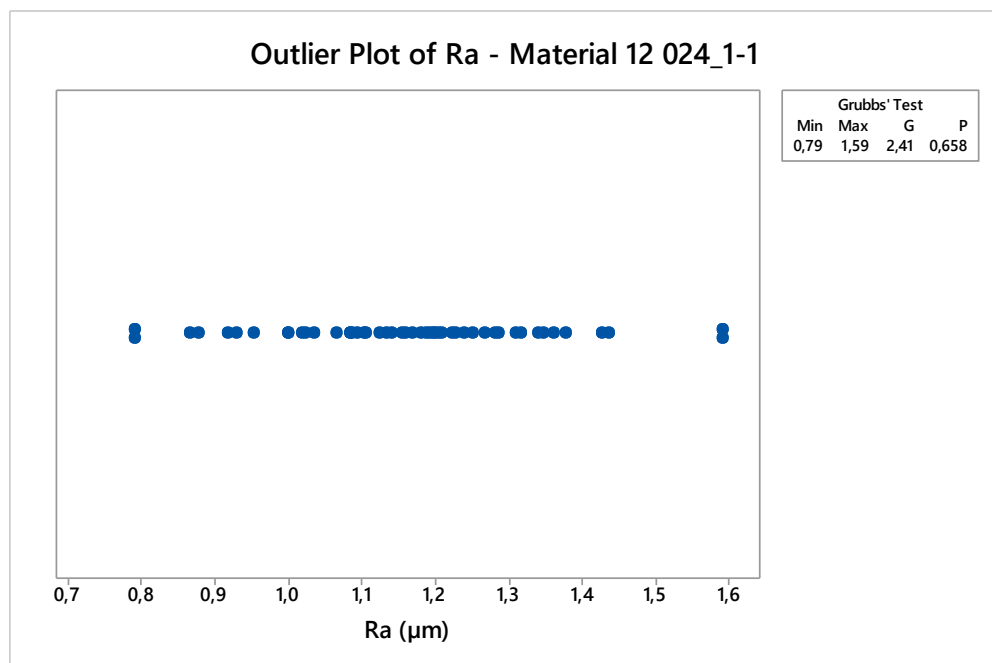
$\alpha = 0,05$  (5%)

- **Parametr Rz**

H0: Rz<sub>i</sub> max,min = všechna data pocházejí ze stejného normálního rozdělení

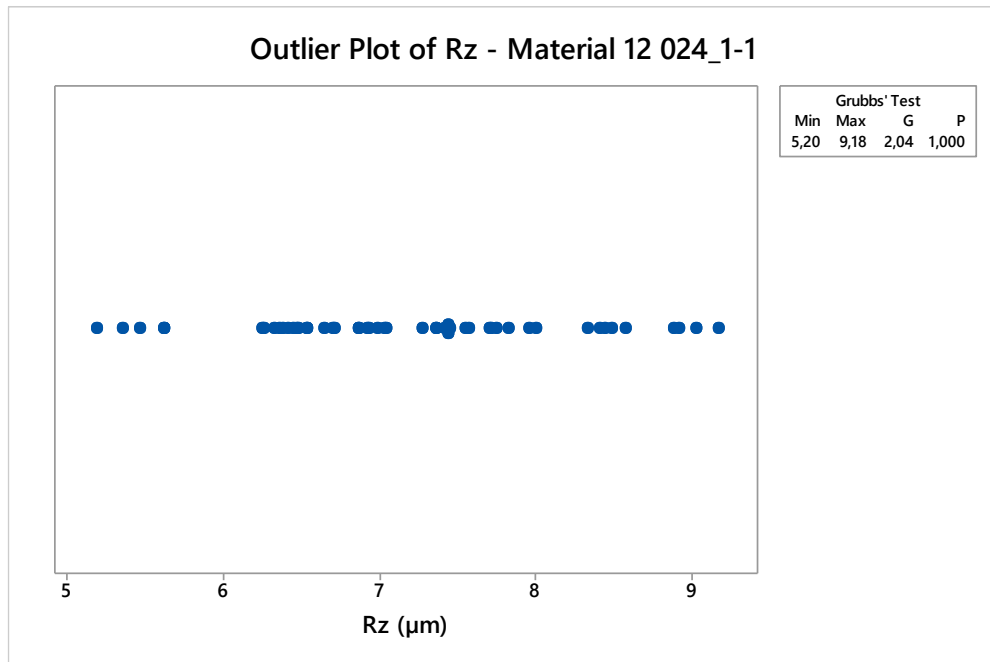
Ha: Rz<sub>i</sub> max,min = nejmenší nebo největší hodnota je outlier

$\alpha = 0,05$  (5%)



Obrázek 68 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra materiálu 12 024 a nastavení laseru 1-1

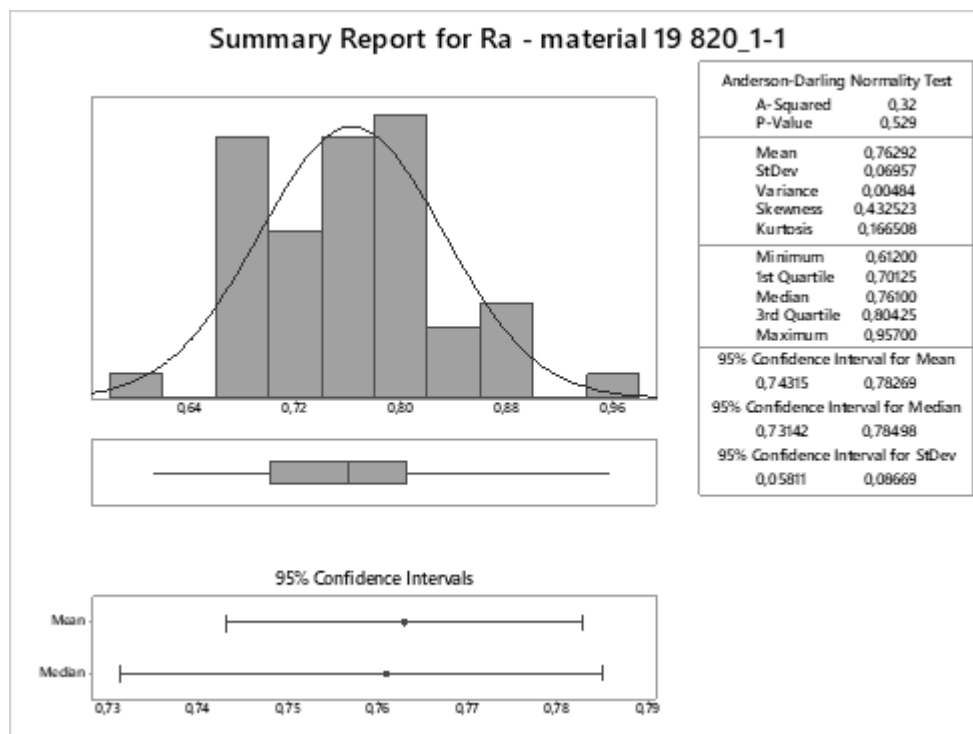




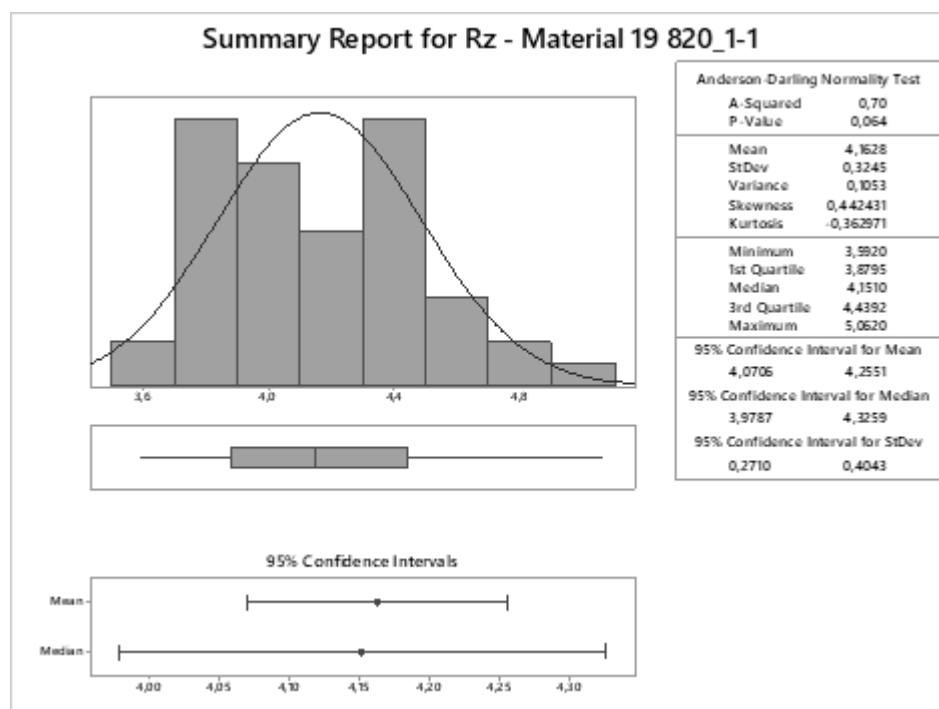
Obrázek 69 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Rz materiálu 12 024 a nastavení laseru 1-1

Podle výsledků Grubbsova testu pro odlehlé hodnoty zkoumané na materiálu 12 024 pro parametry Ra a Rz, a s hodnotami „p“ přesahujícími 0,05 pro reprezentativní nastavení laseru 1-1 dle tabulky č.2, viz. Obrázek 68 a 69 nezamítáme nulovou hypotézu  $H_0$  o absenci hrubých chyb v souborech dat. To činíme s 95% jistotou rozhodnutí a s pětiprocentním rizikem omylu  $\alpha = 0,05$ . Stejný postup vyhodnocení o přítomnosti odlehlých hodnot a hrubých chyb byl realizován pro všechna nastavení laseru dle tabulky č.2. Pro žádné z uvedených nastavení nebyla nalezena přítomnost hrubých chyb.

7.1.2 Materiál ocel 19 820



Obrázek 70 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820



Obrázek 71 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820

Na základě grafického shrnutí a statistické analýzy dat pro vzorek oceli 19 820, byla provedena kontrola charakteristik Ra a Rz. Při této kontrole bylo použito nastavení laseru 1-1, jak je uvedeno v tabulce č. 2.

Pro parametr Ra vykazala analýza průměrnou hodnotu 0,7629 s standardní odchylkou 0,06957, což naznačuje relativně malou variabilitu v datech. Testem Anderson-Darling byla potvrzena normalita rozdělení s p-hodnotou 0,529, což ukazuje, že data neprokázala žádné zjevné odchylky od normálního rozdělení a nebyly nalezeny žádné výrazné hrubé chyby.

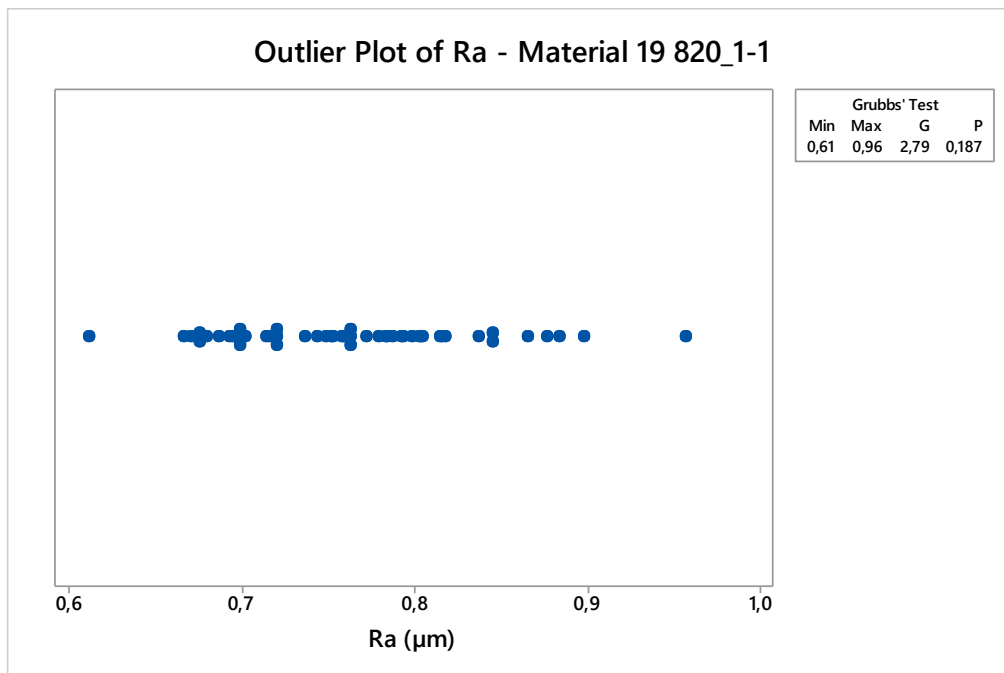
Parametr Rz měl průměrnou hodnotu 4,1628 s větší standardní odchylkou 0,3245, což naznačuje vyšší rozptyl mezi naměřenými hodnotami. I přesto bylo dle Anderson-Darling testu s p-hodnotou 0,064 rovněž potvrzeno normální rozdělení. Hodnota p-hodnoty je blíže kritické hranici  $\alpha = 0,05$ , ale stále je vyšší, což nepřesahuje hranici pro zamítnutí hypotézy o normálním rozdělení.

Shrnutí výsledků ukazuje, že pro oba parametry, Ra i Rz, se data vzorku oceli 19 820 řídí normálním rozdělením. Vyšší variabilita Rz oproti Ra může naznačovat rozdíly v homogenitě povrchu oceli nebo jiné faktory ovlivňující měření tohoto parametru. Avšak ani v jednom případě nebyly zjištěny důkazy, které by poukazovaly na systematické chyby nebo extrémní odchylky v datech.

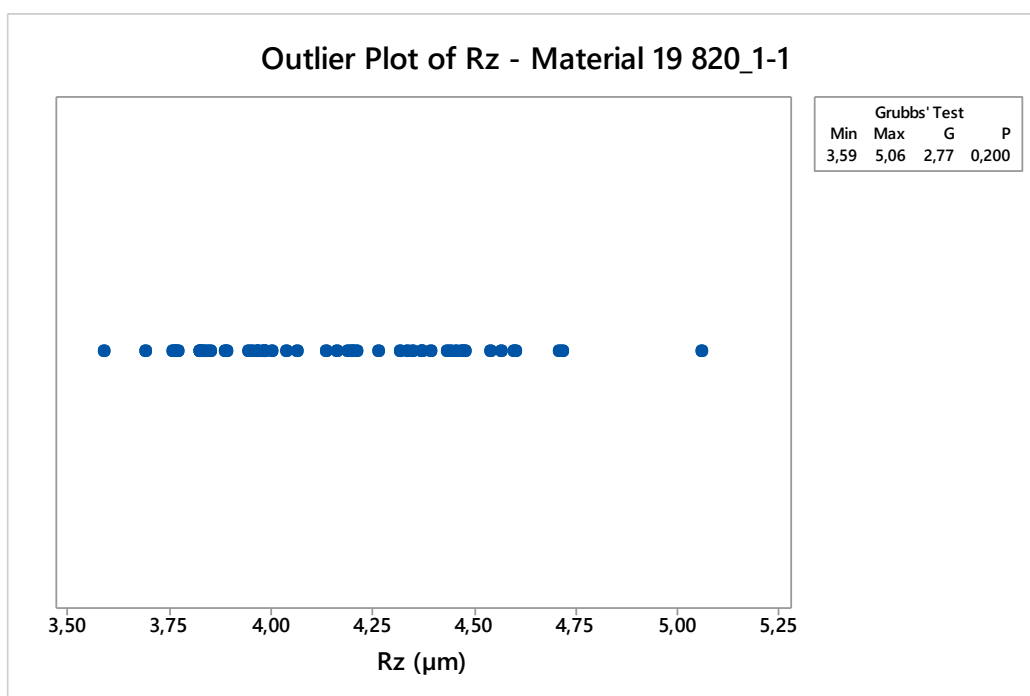
Tabulka 8 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro materiál ocel 19 820

Vzorek 1-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,763	0,761	0,0695	OK	0,612	0,957
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	4,163	4,151	0,3245	OK	3,592	5,062
Vzorek 1-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	3,023	3,0025	0,2584	OK	2,596	3,844
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	15,499	15,587	1,281	OK	15,587	18,057
Vzorek 1-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	13,705	13,612	1,245	OK	10,697	16,381
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	63,3	62,965	5,576	OK	52,781	76,457
Vzorek 1-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	29,448	30,01	3,502	OK	23,103	36,569
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	113,23	113,53	9,65	OK	94,01	131,04
Vzorek 1-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	36,403	36,038	5,006	OK	26,103	47,536
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	135,17	135,82	15,5	OK	100,9	175
Vzorek 2-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,5644	0,562	0,0501	OK	0,439	0,67
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	3,1515	3,149	0,2354	OK	2,562	3,583
Vzorek 2-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,0385	1,043	0,0819	OK	0,865	1,225
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,7158	5,7895	0,4121	OK	4,67	6,607
Vzorek 2-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max

Ra[μm]	1,8079	1,803	0,1276	OK	1,519	2,132
Rz[μm]	9,7269	9,817	0,6309	OK	8,18	11,221
Vzorek 2-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	3,0239	2,9985	0,2399	OK	2,39	3,593
Rz[μm]	15,384	15,389	0,932	OK	12,71	17,313
Vzorek 2-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	4,6378	4,6275	0,4467	OK	3,63	5,846
Rz[μm]	23,241	23,234	1,934	OK	18,327	27,69
Vzorek 3-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,54118	0,5385	0,03379	OK	0,46	0,647
Rz[μm]	3,042	3,0425	0,2023	OK	2,63	3,4
Vzorek 3-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,0034	0,991	0,1254	OK	0,788	1,356
Rz[μm]	5,1635	5,1495	0,5655	OK	4,207	6,691
Vzorek 3-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,93484	0,91	0,7937	OK	0,798	1,093
Rz[μm]	5,2966	5,245	0,4289	OK	4,591	6,324
Vzorek 3-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,0297	1,0205	0,0858	OK	0,85	1,263
Rz[μm]	5,6316	5,6555	0,3549	OK	4,682	6,388
Vzorek 3-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,256	1,253	0,1248	OK	1,021	1,597
Rz[μm]	6,726	6,765	0,4464	OK	5,814	7,796
Vzorek 4-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,80769	0,799	0,09136	OK	0,625	1,002
Rz[μm]	4,3936	4,42	0,4505	OK	3,594	5,347
Vzorek 4-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,6966	0,6935	0,0545	OK	0,588	0,811
Rz[μm]	3,964	3,926	0,2453	OK	3,484	4,536
Vzorek 4-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,038	1,034	0,0909	OK	0,86	1,235
Rz[μm]	5,5332	5,446	0,4525	OK	4,599	6,768
Vzorek 4-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,3625	1,3415	0,1542	OK	1,115	1,782
Rz[μm]	6,4943	6,3685	0,6411	OK	5,264	7,613
Vzorek 4-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,5545	1,576	0,1415	OK	1,289	1,864
Rz[μm]	7,356	7,3415	0,6511	OK	6,243	8,751
Vzorek 5-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,3111	1,293	0,2476	OK	0,888	1,898
Rz[μm]	6,3779	6,426	1,0222	OK	3,942	8,334
Vzorek 5-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,858	0,8535	0,1022	OK	0,629	1,24
Rz[μm]	4,6168	4,615	0,4094	OK	3,564	5,732
Vzorek 5-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,7299	0,7315	0,05456	OK	0,617	0,857
Rz[μm]	4,0548	4,0365	0,2821	OK	3,561	4,607
Vzorek 5-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	0,8565	0,8535	0,09676	OK	0,683	1,099
Rz[μm]	4,7186	4,6925	0,4342	OK	3,756	5,67
Vzorek 5-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1-α) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[μm]	1,1551	1,1575	0,1419	OK	0,859	1,519
Rz[μm]	5,873	5,798	0,4761	OK	4,854	6,954



Obrázek 72 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra materiálu 19 820 a nastavení laseru 1-1



Obrázek 73 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Rz materiálu 19 820 a nastavení laseru 1-1

Na základě potvrzení normálního rozdělení dat parametrů pomocí AD testu byly dále hodnoty parametrů Ra a Rz materiálu 19 820 posuzovány Grubbsovým testem odlehlých hodnot. Tabulka č. 8 ukazuje získané hodnoty parametrů Ra a Rz pro veškeré kombinace nastavení výkonu a rychlosti vláknového laseru. Dle výsledků Grubbsova testu nezamítáme nulovou hypotézu  $H_0$ . To činíme s 95% jistotou rozhodnutí a s pětiprocentním rizikem omylu  $\alpha = 0,05$ . Stejný postup vyhodnocení o přítomnosti odlehlých hodnot a hrubých chyb byl realizován pro všechna nastavení laseru dle tabulky č.2. Pro žádné z uvedených nastavení nebyla nalezena přítomnost hrubých chyb. S tímto výsledkem Grubbsova testu můžeme potvrdit platnost  $H_0$ , která říká, že se žádná odlehlá hodnota v datech nenachází a to na 5% hladině významnosti. Použitá teorie hypotéz byla sestavena následovně:

- **Parametr Ra**

$H_0$ :  $Ra_{i_{max,min}}$  = všechna data pocházejí ze stejného normálního rozdělení

$H_a$ :  $Ra_{i_{max,min}}$  = nejmenší nebo největší hodnota je outlier

$\alpha = 0,05$  (5%)

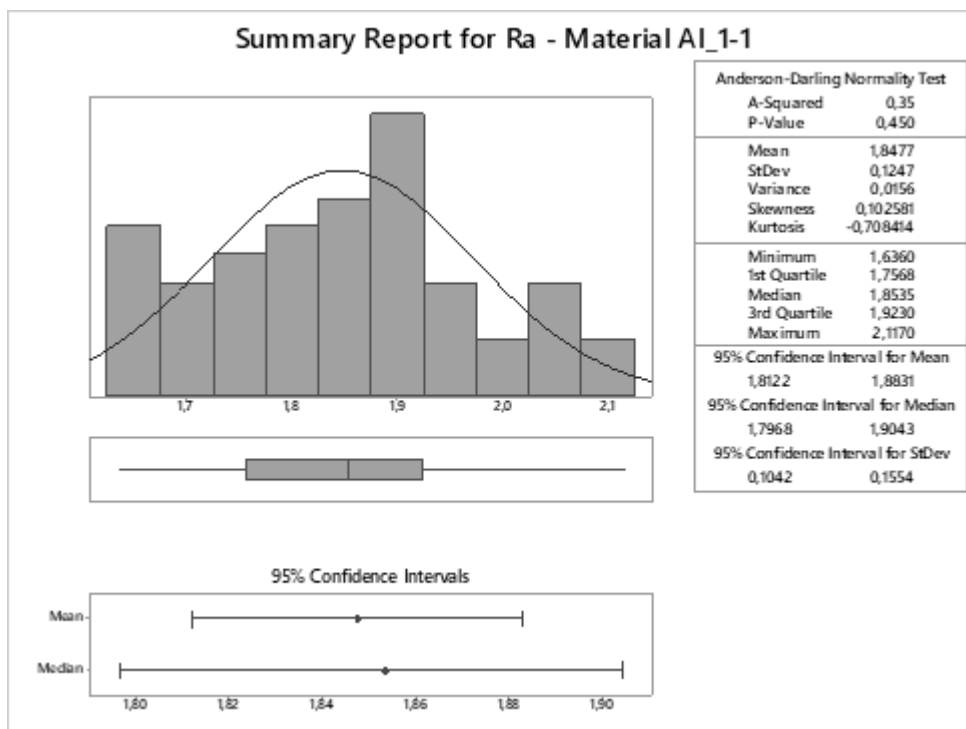
- **Parametr Rz**

$H_0$ :  $Rz_{i_{max,min}}$  = všechna data pocházejí ze stejného normálního rozdělení

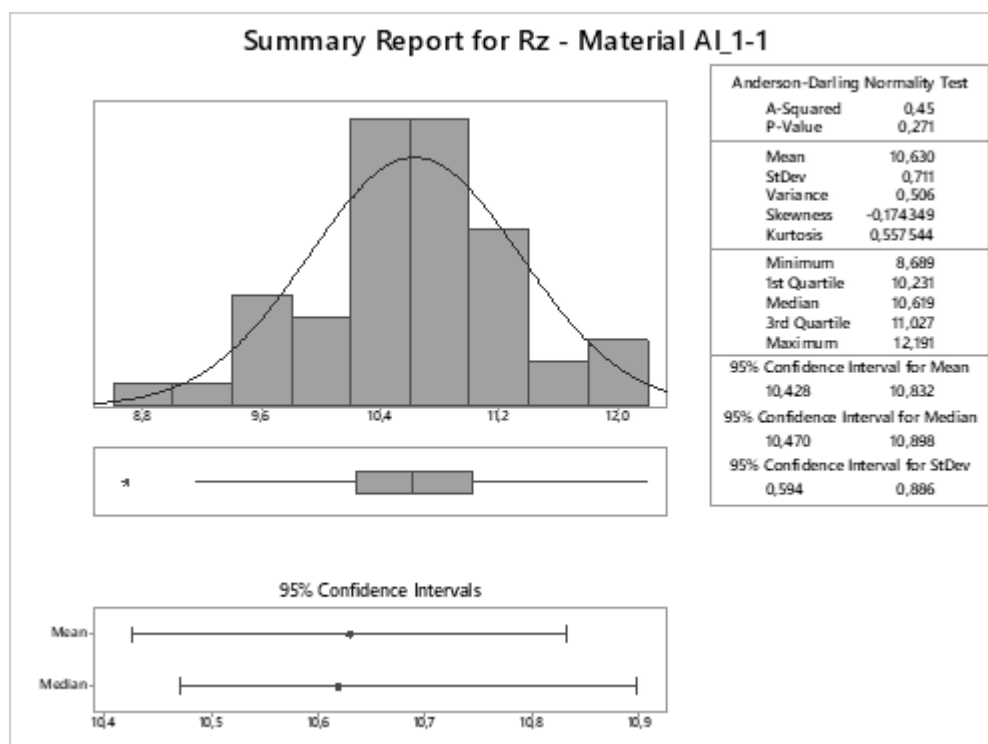
$H_a$ :  $Rz_{i_{max,min}}$  = nejmenší nebo největší hodnota je outlier

$\alpha = 0,05$  (5%)

7.1.3 Materiál Al (čistý hliník)



Obrázek 74 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Hliník



Obrázek 75 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Hliník

Z analyzovaných dat pro vzorky **čistého hliníku Al** byly získány následující výsledky. Pro parameter Ra byla průměrná hodnota zjištěna jako 1,8477 s standardní odchylkou 0,1247. Data neprojevují známky hrubých chyb, což podporuje i Anderson-Darlingův test normálnosti s P-hodnotou 0,450. Tento výsledek značí, že není důvod odmítat hypotézu o normálním rozdělení dat.

Pro parametr Rz byla průměrná hodnota 10,630 s standardní odchylkou 0,711. Data pro Rz rovněž vykazují normální rozdělení podle Anderson-Darlingova testu s P-hodnotou 0,271.

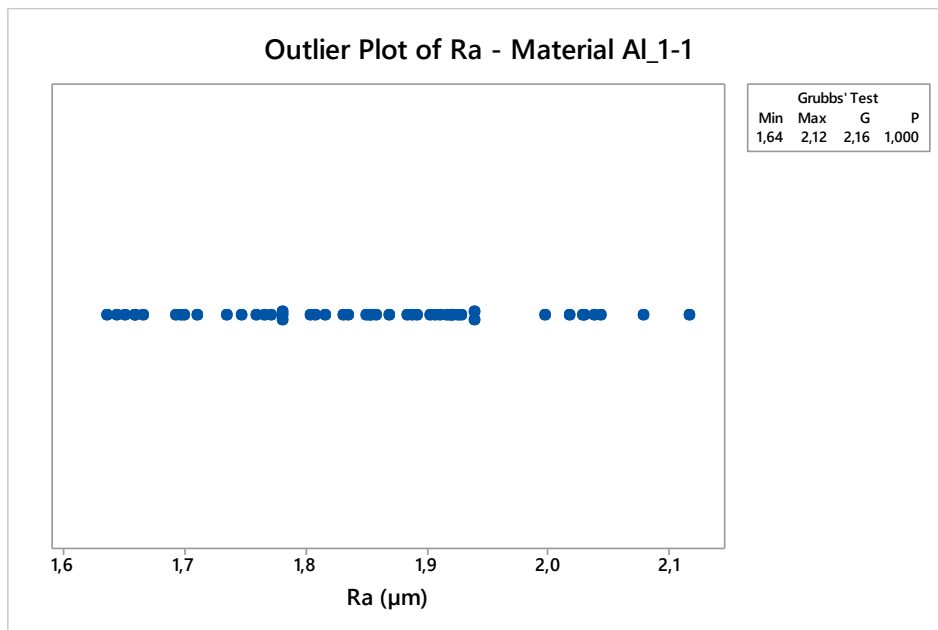
Z obou grafů a souvisejících statistik lze usoudit, že při použití nastavení laseru 1-1 dle tabulky č.2, jsou hodnoty parametrů Ra a Rz pro čistý hliník Al v souladu s očekáváním normálního rozdělení a nebyly zjištěny žádné hrubé chyby. Toto naznačuje, že data jsou vhodná pro zkoumání dalších analýz. Takto provedené vyhodnocení normálního rozdělení za pomoci AD testu bylo využito u všech kombinací nastavení vláknového laseru dle tabulky č.2. Veškerá testovaná nastavení obsahovala „p“ hodnotu vyšší, než 0,05 a tedy bylo možno konstatovat, že naměřené skupiny pocházejí ze souboru s normálním rozdělením, viz. tabulka č.9.

Tabulka 9 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro materiál Al

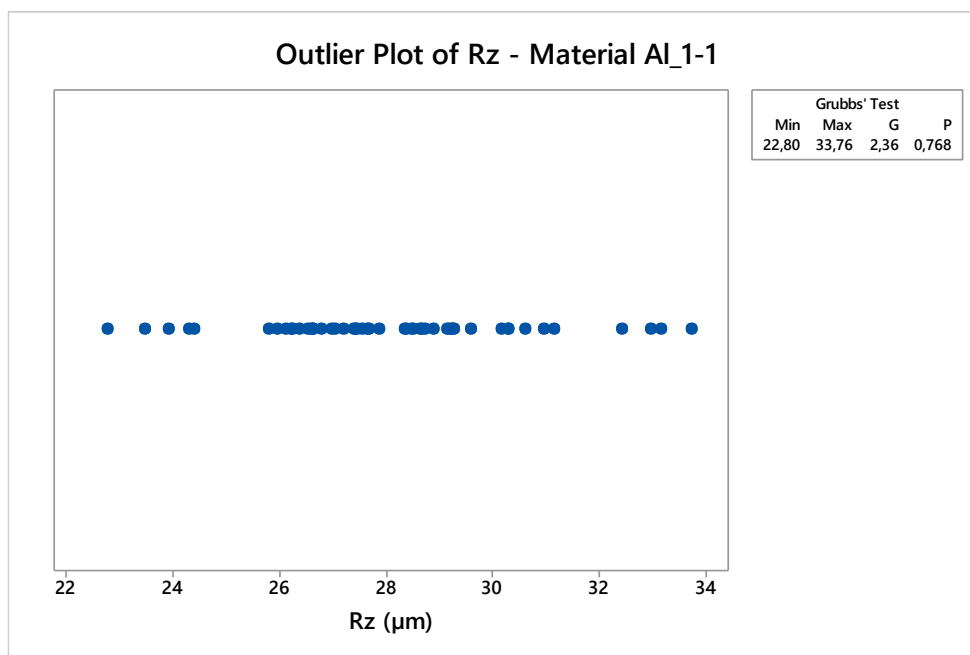
Vzorek 1-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu$ m]	1,8477	1,8535	0,1247	OK	1,636	2,117
Rz[ $\mu$ m]	10,63	10,619	0,711	OK	8,689	12,191
Vzorek 1-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	5,4107	5,392	0,6512	OK	3,929	7,145
Rz[ $\mu$ m]	2,8082	27,799	2,402	OK	22,803	33,758
Vzorek 1-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	11,057	11,144	1,136	OK	8,981	13,604
Rz[ $\mu$ m]	52,099	51,832	5,382	OK	43,957	66,588
Vzorek 1-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	12,625	12,817	1,212	OK	9,929	15,094
Rz[ $\mu$ m]	58,429	59,467	5,147	OK	44,032	67,397
Vzorek 1-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	10,11	10,029	1,191	OK	7,938	14,584
Rz[ $\mu$ m]	50,212	49,775	5,563	OK	39,726	62,648
Vzorek 2-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	1,0882	1,0875	0,0745	OK	0,962	1,307
Rz[ $\mu$ m]	6,171	6,1965	0,3484	OK	5,394	7,049
Vzorek 2-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	3,2549	3,222	0,2371	OK	2,669	3,832
Rz[ $\mu$ m]	17,326	17,343	1,355	OK	14,348	21,014
Vzorek 2-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	6,577	6,555	0,563	OK	5,449	8,124
Rz[ $\mu$ m]	35,146	35,56	2,815	OK	28,311	40,548
Vzorek 2-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu$ m]	9,8342	9,7275	1,0719	OK	7,489	12,051



Rz[ $\mu\text{m}$ ]	50,344	49,716	4,817	OK	39,283	61,814
Vzorek 2-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	10,074	9,886	0,957	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	49,943	49,886	4,934	OK	8,375	11,998
Vzorek 3-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,71122	0,716	0,05407	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	4,0096	4,034	0,3153	OK	0,577	0,847
Vzorek 3-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,4365	1,424	0,1238	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	8,0069	7,9935	0,5607	OK	1,146	1,724
Vzorek 3-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	2,5091	2,492	0,1966	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	13,829	13,777	1,137	OK	2,069	2,923
Vzorek 3-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	3,2097	3,215	0,2657	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	17,156	17,123	1,329	OK	2,631	3,773
Vzorek 3-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	3,5078	3,5095	0,349	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	17,965	17,873	1,649	OK	2,885	4,554
Vzorek 4-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,8163	1,8115	0,3	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	8,9533	9,0095	1,3402	OK	1,237	2,745
Vzorek 4-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,3893	1,379	0,177	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	7,1827	7,2095	0,6552	OK	1,047	1,792
Vzorek 4-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,4447	1,427	0,1114	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	7,9336	7,8985	0,5739	OK	1,238	1,707
Vzorek 4-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,8982	1,891	0,1653	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	10,122	10,072	0,751	OK	1,497	2,287
Vzorek 4-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	2,2884	2,28	0,2068	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	12,471	12,438	1,164	OK	1,792	2,723
Vzorek 5-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,9615	1,9215	0,4402	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	9,6934	9,8045	1,611	OK	1,279	3,288
Vzorek 5-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,7702	1,74	0,2274	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	9,353	9,355	0,9991	OK	1,446	2,471
Vzorek 5-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,7975	1,75	0,2999	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	9,1305	8,9495	1,2795	OK	1,224	2,559
Vzorek 5-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,8081	1,79	0,2574	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	9,8686	9,762	1,0571	OK	1,309	2,518
Vzorek 5-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,7986	1,7885	0,1432	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	9,666	9,551	0,7201	OK	1,562	2,147
					8,423	11,895



Obrázek 76 Grubbsův test odlehčých hodnot parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Hliník

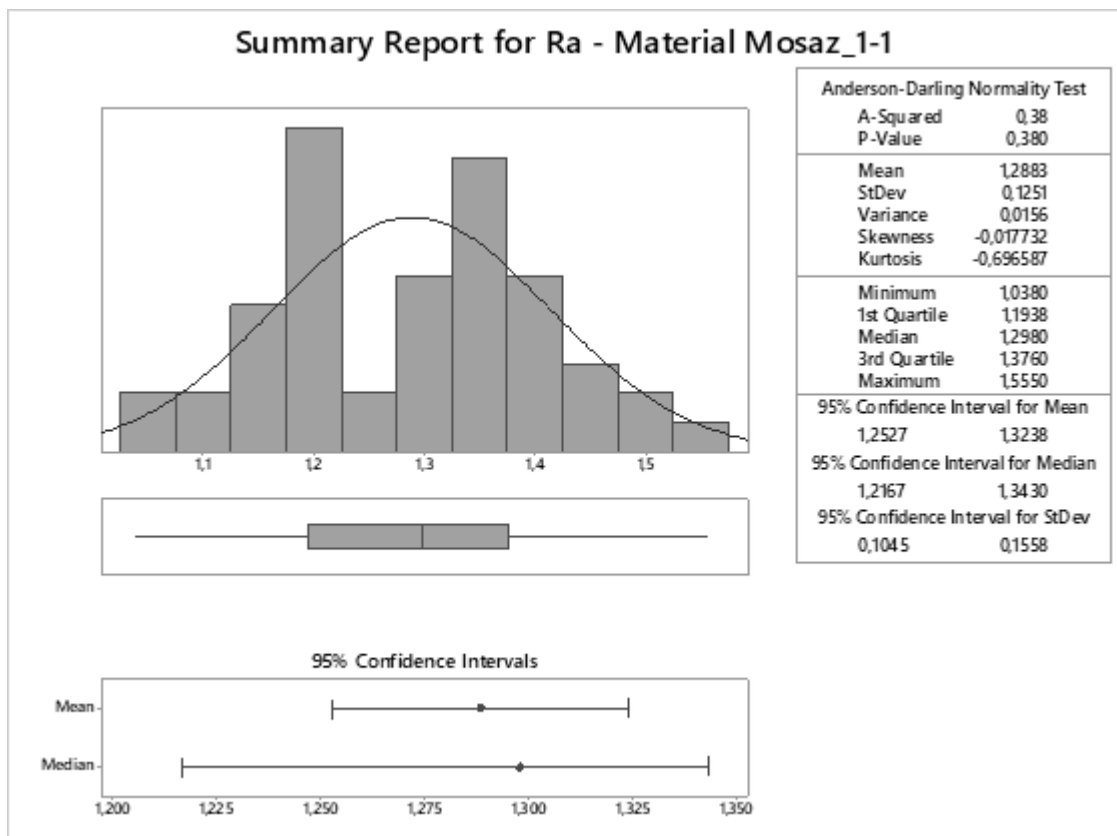


Obrázek 77 Grubbsův test odlehčých hodnot parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Hliník

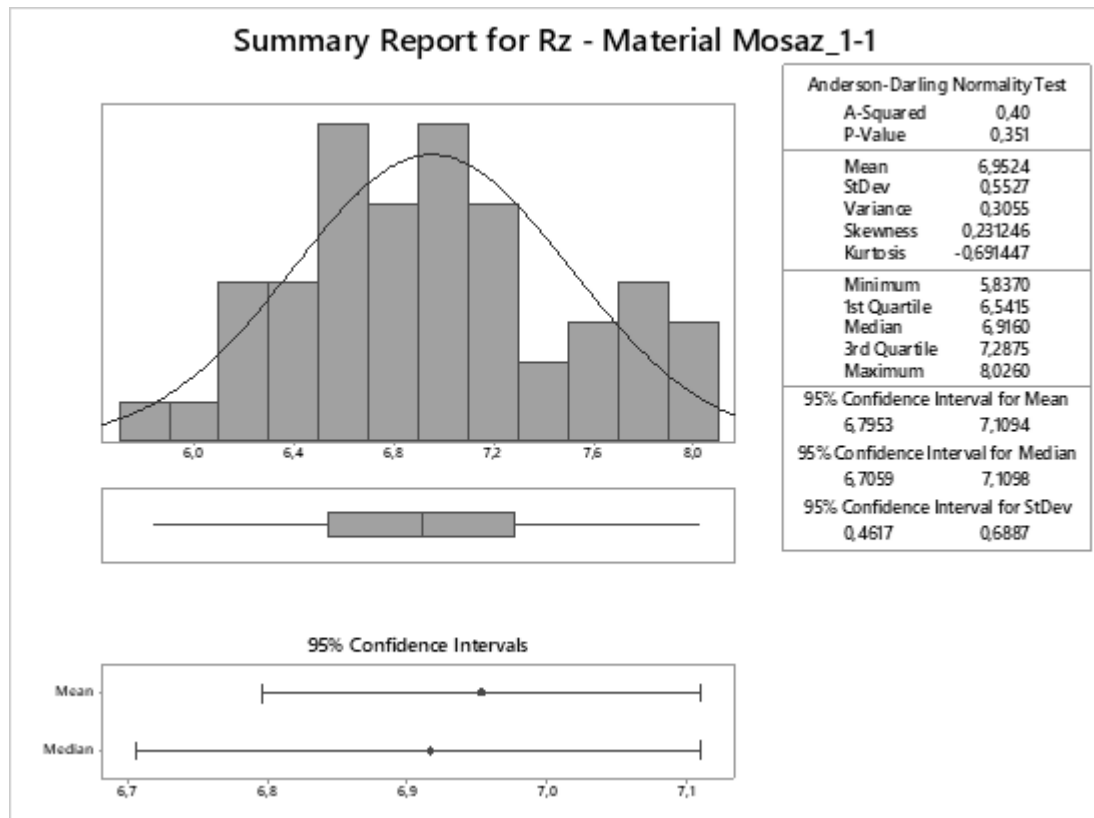
Na základě potvrzení normálního rozdělení dat parametrů pomocí AD testu byly hodnoty parametrů Ra a Rz materiálu Al a nastavení laseru 1-1 posuzovány Grubbsovým testem odlehlých hodnot. Grubbsův test odlehlých hodnot byl proveden k posouzení přítomnosti odlehlých hodnot a zda se jedná o hrubou chybu.

Výsledky Grubbsova testu ukazují, že u obou parametrů Ra a Rz můžeme s 95% jistotou a s pětiprocentním rizikem omylu  $\alpha = 0,05$  potvrdit platnost nulové hypotézy  $H_0$ , která říká, že všechna data pocházejí ze stejného normálního rozdělení a nebyla identifikována přítomnost hrubých chyb nebo odlehlých hodnot. To znamená, že nejmenší ani největší hodnoty u obou parametrů nebyly považovány za outliers. Toto tvrzení je podpořeno hodnotami „p“ vyššími než 0,05 u obou parametrů. Grubbsův test byl proveden na všech souborech dat parametrů Ra a Rz podle nastavení laseru viz. tabulka č.2. Dle výsledků tohoto testu bylo potvrzeno, že v žádném souboru dat se nenacházejí hrubé chyby. Hodnoty parametrů Ra a Rz vzorku čistého Al je možno vidět v tabulce č. 9.

#### 7.1.4 Materiál Mosaz



Obrázek 78 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz



Obrázek 79 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz

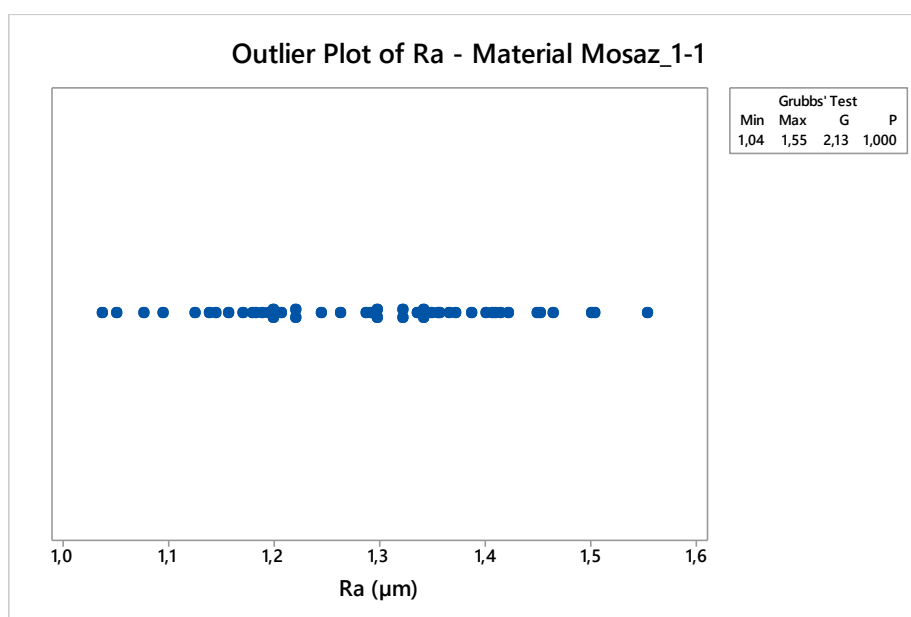
Na základě grafických sumářů a Anderson-Darlingova testu normality lze interpretovat výsledky měření pro parametry Ra a Rz vzorku mosazi a konkrétním nastavení parametrů laseru 1-1 dle tabulky č.2. V obou případech p-hodnota přesáhla hodnotu 0,05, což nám umožňuje přijmout nulovou hypotézu o normálním rozdělení dat pro oba parametry. S pravděpodobností chyby  $\alpha = 0,05$ , což odpovídá 5% riziku omylu, nezamítáme předpoklad, že naměřené skupiny dat pro vzorky mosazi vykazují charakteristiky normálního rozdělení.

Celkově lze konstatovat, že pro vzorek mosazi byla data Ra a Rz konzistentní a bez zjevných odchylek, což bylo potvrzeno aplikací Anderson-Darlingova testu. Pro důkaz, že se v sadách dat nenacházejí hrubé chyby byl proveden Grubbsův test. Stejný postup testování byl využit pro veškeré sady dat parametrů Ra a Rz u obrobeného vzorku mosazi. Výsledky AD testu jsou uvedeny v tabulce č. 10.

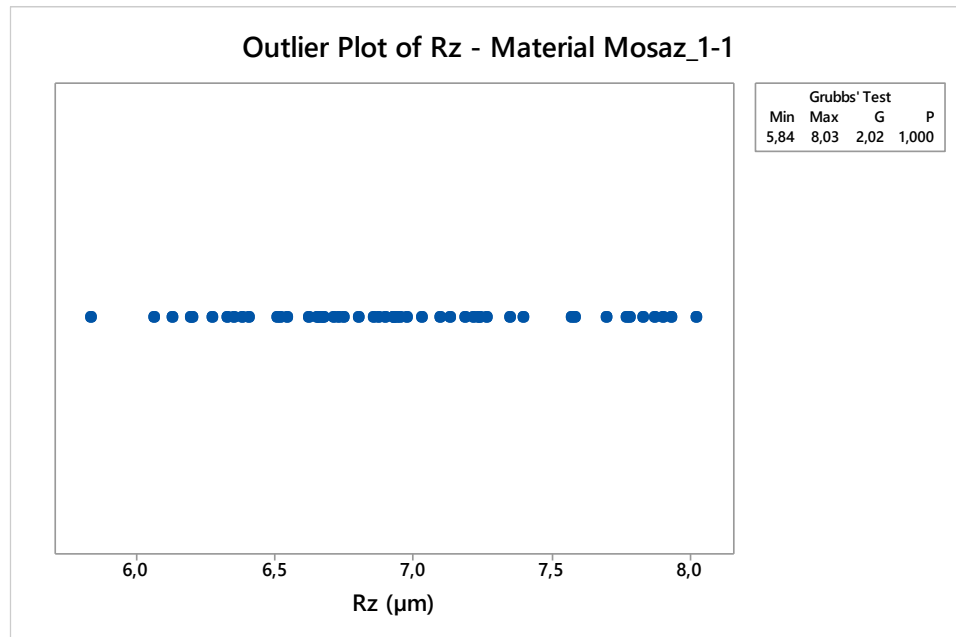
Tabulka 10 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro Mosaz

Vzorek 1-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
					Min.	Max
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,28883	1,298	0,1251	OK	1,038	1,555
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	6,9524	6,916	0,5527	OK	5,837	8,026
Vzorek 1-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	2,1315	2,1285	0,1576	OK	1,844	2,437
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	10,712	10,717	0,695	OK	9,416	11,927
Vzorek 1-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	4,843	4,8515	0,4376	OK	3,844	5,822
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	24,524	24,336	1,953	OK	19,253	28,408
Vzorek 1-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	6,4528	6,394	0,6652	OK	5,015	8,076
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	32,066	32,014	3,063	OK	26,658	40,348
Vzorek 1-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	6,159	6,148	0,6182	OK	4,669	8,189
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	30,032	30,086	2,5	OK	23,614	36,66
Vzorek 2-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,6397	0,6295	0,08891	OK	0,52	0,986
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	3,4882	3,4805	0,336	OK	2,888	4,571
Vzorek 2-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,0159	1,0105	0,07	OK	0,855	1,202
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,7848	5,735	0,5471	OK	4,391	7,097
Vzorek 2-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,4987	1,501	0,1391	OK	1,164	1,839
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	8,0772	8,101	0,7003	OK	5,885	9,845
Vzorek 2-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,9479	1,95	0,1631	OK	1,593	2,407
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	10,432	10,481	0,938	OK	8,412	12,37
Vzorek 2-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	2,7805	2,7535	0,3065	OK	2,152	3,621
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	14,619	14,625	1,209	OK	12,169	18,028
Vzorek 3-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,60008	0,5915	0,08291	OK	0,435	0,795
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	3,3683	3,3525	0,3454	OK	2,573	4,324
Vzorek 3-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,77768	0,789	0,06083	OK	0,595	0,896
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	4,3108	4,352	0,3852	OK	3,528	5,022
Vzorek 3-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,97906	0,967	0,06773	OK	0,855	1,226
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,601	5,583	0,4688	OK	4,581	6,609
Vzorek 3-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,109	1,1155	0,1032	OK	0,816	1,306
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	6,1905	6,163	0,5741	OK	4,804	7,399
Vzorek 3-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,1502	1,1465	0,1099	OK	0,863	1,381
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	6,3477	6,372	0,6274	OK	5,08	7,682
Vzorek 4-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,0848	1,1235	0,1975	OK	0,708	1,525
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,8238	5,9285	0,8387	OK	4,16	7,612
Vzorek 4-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,82126	0,7875	0,13993	OK	0,618	1,214
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	4,5206	4,4235	0,6727	OK	3,382	6,287
Vzorek 4-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,80192	0,7845	0,095	OK	0,614	1,034
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	4,4611	4,462	0,4512	OK	3,577	5,583
Vzorek 4-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,92156	0,9255	0,09977	OK	0,722	1,164

Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,0177	5,06	0,5654	OK	3,751	6,181
Vzorek 4-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,0107	1,0085	0,1091	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,5362	5,4865	0,5642	OK	4,427	6,616
Vzorek 5-1	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,5403	1,402	0,4228	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	7,5003	7,3925	1,3227	OK	5,142	10,506
Vzorek 5-2	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,1357	1,076	0,2175	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,9462	5,858	0,7914	OK	4,795	8,045
Vzorek 5-3	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	1,043	1,0015	0,1842	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,503	5,3585	0,7538	OK	4,315	7,374
Vzorek 5-4	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,96649	0,97	0,15356	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,4188	5,3305	0,8956	OK	3,878	7,498
Vzorek 5-5	Mean	Median	StDev	A-D test normality [p-value - (1- $\alpha$ ) = 0,95]	Interkvartilové rozpětí	
Ra[ $\mu\text{m}$ ]	0,9236	0,9	0,11769	OK	Min.	Max
Rz[ $\mu\text{m}$ ]	5,0134	5,013	0,6171	OK	3,921	6,64



Obrázek 80 Grubbsův test odlehlých hodnot parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz



Obrázek 81 Grubbsův test odlehlých hodnot parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz

Podle Grubbsova testu pro odlehlé hodnoty provedeného na parametrech Ra a Rz vzorku mosazi nebyly zjištěny žádné hrubé chyby. V obou případech hodnoty 'p' překračují hodnotu 0,05, což znamená, že s 95% jistotou a s rizikem omylu 5% ( $\alpha = 0,05$ ) nezamítáme nulovou hypotézu o absenci hrubých chyb v datech. Na základě výsledků Grubbsova testu pro odlehlé hodnoty, uvedených ve výsledkových diagramech pro oba parametry, můžeme konstatovat, že datové sady pro vzorky mosazi jsou bez významných odchylek.

Grafy znázorňující odlehlé hodnoty pro Ra a Rz nevykazují žádné body mimo očekávaný rozsah. Hodnota 'G' v Grubbsově testu byla pro oba parametry nižší než kritická hodnota pro zjištění odlehlých hodnot, což potvrzuje absenci významných odchylek.

Vyšetření všech nastavení laseru dle tabulky č.2 neprokázalo přítomnost hrubých chyb.

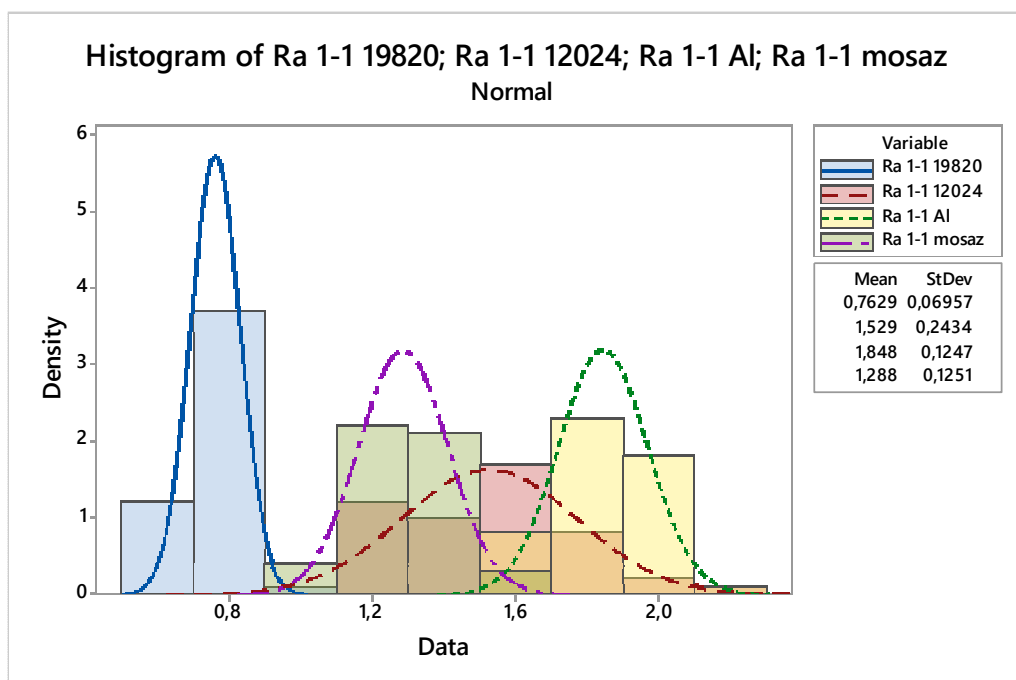
## 7.2 Srovnání a vyhodnocení parametru Ra pro zkoumané materiály

Pro analýzu parametrů Ra u zkoumaných vzorků bylo cílem zjistit, zda existuje shoda mezi materiály a nastavením laseru. Data byla nejprve ověřena pomocí histogramu, což umožnilo předběžnou kontrolu rozdělení hodnot. Dále byl použit test rozptylů, který poskytl informace o variabilitě hodnot Ra mezi jednotlivými skupinami. Pro porovnání středních hodnot byla aplikována metoda ANOVA, která statisticky ověřila rozdíly mezi skupinami.

Vzhledem k tomu, že data vykazovala normální rozdělení, bylo možné uvažovat o aplikaci parametrických statistických metod pro vyhodnocení shody. Výsledná analýza ukázala míru podobnosti parametrů Ra mezi materiály a nastavením laseru, což bylo vizualizováno pomocí dendrogramu. Tento dendrogram podal informace o procentuální shodě mezi zkoumanými parametry, což umožnilo lepší pochopení vztahů mezi nastavením laseru a chováním materiálů. Díky těmto metodám bylo možné identifikovat klíčové faktory ovlivňující kvalitu povrchové úpravy materiálů za použití laseru a vhodném nastavení pro daný materiál.

### 7.2.1 Srovnání pomocí Histogramu

Pro prvotní porovnání rozptylů hodnot parametrů Ra pro veškeré zkoumané materiály bylo využito Histogramu.



Obrázek 82 Porovnání histogramů parametru Ra mezi materiály při nastavení laseru 1-1



Histogram hodnot parametru Ra poskytuje vizuální srovnání rozptylů pro zkoumané materiály, což umožňuje porozumět rozdílům v jejich povrchové textuře. Na reprezentativním grafu viz. obrázek 82 jsou zobrazeny rozdělení pro veškeré zkoumané materiály, zpracované stejným nastavením laseru 1-1.

Parametr Ra 1-1 oceli 19 820, má průměrnou hodnotu 0,7629  $\mu\text{m}$  s relativně malou standardní odchylkou 0,06957  $\mu\text{m}$ . Tato kombinace malého průměru a standardní odchylky značí úzký a vysoký vrchol histogramu, což naznačuje, že povrch materiálu je koherentní s malým rozptylem v hodnotách Ra.

Ra 1-1 oceli 12 024 vykazuje výrazně větší průměr 1,529  $\mu\text{m}$  a standardní odchylku 0,2434  $\mu\text{m}$ . Toto širší rozdělení ukazuje na větší rozptyl hodnot drsnosti v textuře povrchu, což může být důsledkem materiálových vlastností.

Ra 1-1 Al, reprezentující hliník, má průměr 1,848  $\mu\text{m}$  a nižší standardní odchylku 0,1247  $\mu\text{m}$ . Histogram pro tento materiál je širší, tudíž vykazuje větší rozptyl v datech než Ra 1-1 oceli 19 820, ale méně široký než u Ra 1-1 12 024.

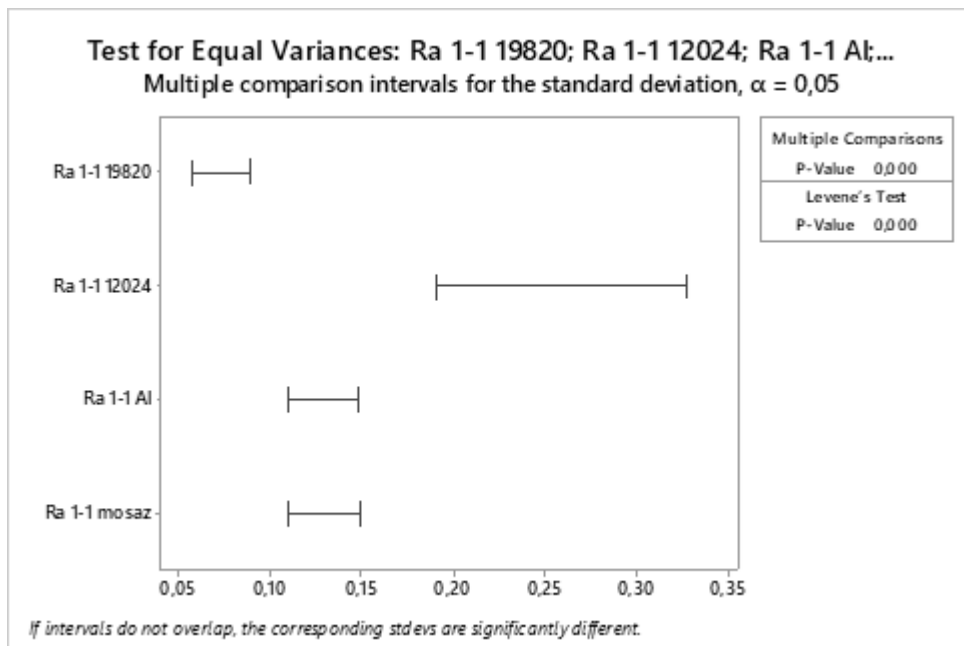
Ra 1-1 mosazi s průměrem 1,288  $\mu\text{m}$  a standardní odchylkou 0,1251  $\mu\text{m}$  ukazuje rozdělení, které je širší než u Ra 1-1 oceli 19 820, ale podobné hliníku. Toto vykazuje střední míru rozptylu a podobnosti povrchu mezi těmito dvěma materiály.

Tento histogram poskytuje přehled o tom, jak různé materiály reagují na stejné zpracování laserem. Zatímco některé materiály vykazují malý rozptyl a tím naznačují vysoce přesný proces obrábění a cílené chování při tomto druhu obrábění, jiné ukazují výraznější rozptyl, což může signalizovat potřebu změny nastavení laseru a využití jiné kombinace pro lepší optimalizaci procesu.

Data byla analyzována pomocí stejného metodického postupu pro všechna testovaná nastavení laseru. Detailní analýza histogramů, která byla provedena pro mezimateriálové porovnání při nastaveních laseru od 1-1 do 5-5 dle tabulky č. 2 pro parametr Ra, ukázala, že určité materiály vykazují po obrobení laserem obdobné kvality povrchu. To naznačuje, že jejich reakce na variabilitu nastavení laseru je srovnatelná. Tato pozorování byla následně ověřena prostřednictvím rozsáhlejších datových analýz, jak je interpretováno v kapitolách 7.2.2 a 7.2.3.

### 7.2.2 Porovnání rozptylů pomocí Levenesova testu

Pro test shodnosti rozptylů byl použit Levenesův test v programu Minitab.



Obrázek 83 Graf podobnosti rozptylů mezi materiály pro parametr Ra při nastavení laseru 1-1

Na základě výsledků Levenesova testu a velmi nízké „p“ hodnoty (menší než 0,05) můžeme konstatovat, že rozptyly hodnot Ra pro zkoumané skupiny materiálů se statisticky významně liší. Při pohledu na graf však lze pozorovat, že některé skupiny vykazují podobné rozptyly. To znamená, že pokud porovnáváme rozptyly dvou konkrétních parametrů Ra, konkrétně parametrů Ra materiálu Al a Mosazi, nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu o jejich podobnosti. V případě porovnání všech skupin materiálů však nulovou hypotézu o shodě rozptylů zamítáme.

Formulované hypotézy byly následovné:

$H_0: s_1^2 = s_2^2 = s_k^2 =$  všechny rozptyly jsou si rovny

$H_a: s_1^2 \neq s_2^2 \neq s_k^2 =$  alespoň jeden rozptyl je odlišný

$\alpha = 0,05$  (5%)

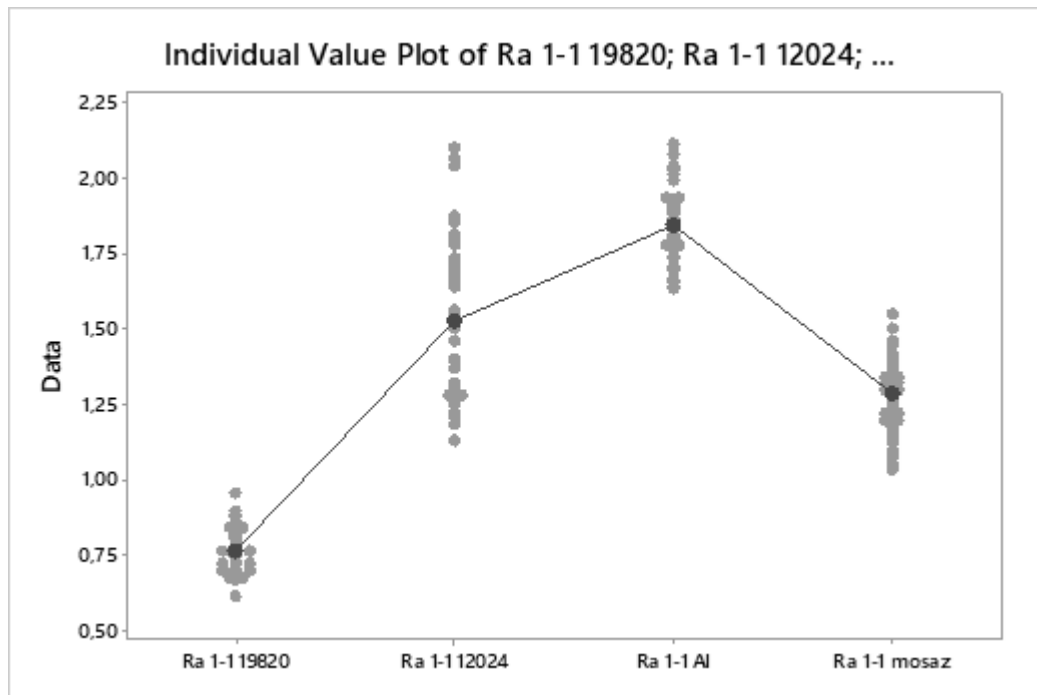
**Závěr:**

Při testování shody rozptylů Ra parametrů pro testované materiály bylo použito Levenesova testu, jehož výsledky indikují statisticky významné rozdíly, což se odrazilo ve velmi nízké p-hodnotě. Výsledky testů jednotlivých materiálů ukazují, že i když mohou některé páry materiálů vykazovat podobné rozptyly, příkladem může být uvedený graf na obrázku 83. Celková analýza všech materiálů vede k odmítnutí hypotézy o homogenitě rozptylů. Stejného výsledku bylo dosaženo i při zkoumání grafů Levenesova testu rozptylů pro rozdílné parametry nastavení laseru mezi materiály. Tato zjištění jsou klíčová pro další analýzu metodou ANOVA, pro kterou je vzhledem k nepředpokladu rozdílných rozptylů doporučen test Games-Howell, jež je přizpůsoben pro porovnávání středních hodnot v případech, kdy není předpoklad homogenity rozptylů.

**7.2.3 Test rozdílu středních hodnot, Metoda ANOVA**

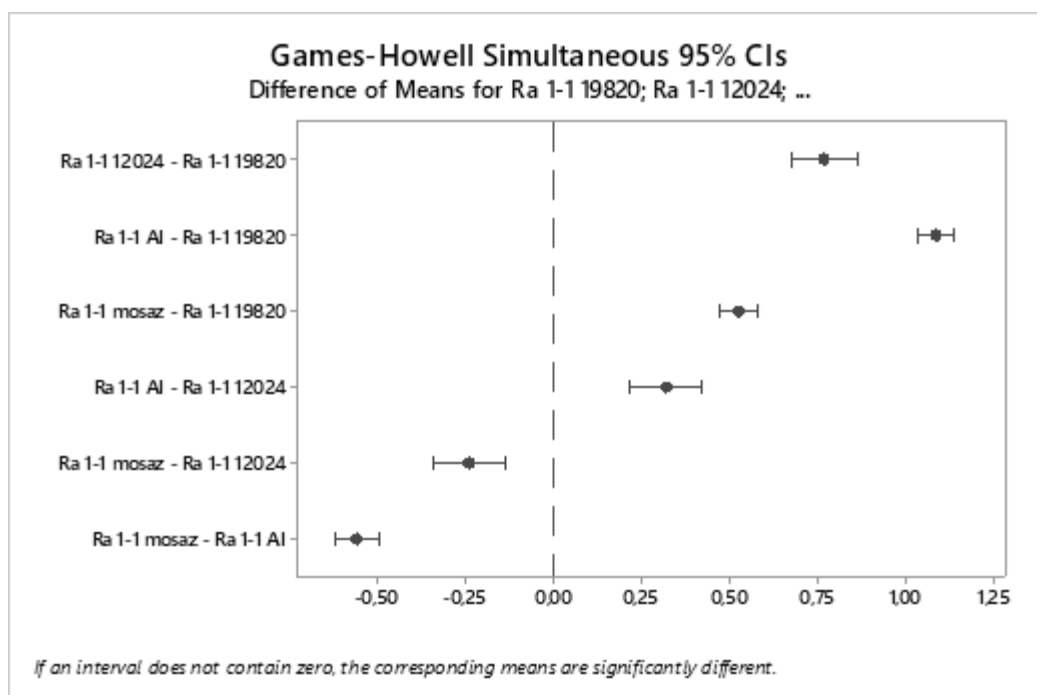
Gamesův-Howellův test je neparametrická metoda analýzy pro vícenásobná srovnání dvou nebo více výběrových souborů. Games-Howellův test je do jisté míry podobný Tukeyho testu. Na rozdíl od Tukeyho testu však nepředpokládá homogenitu rozptylů nebo stejnou velikost vzorků.

V rámci testování shodnosti průměrných hodnot Ra různých materiálů byla použita metoda jednocestná ANOVA v programu Minitab s předpokladem neshodnosti rozptylů parametrů Ra zkoumaných materiálů. Na základě Welchova testu (T-test nerovných rozptylů) s F-hodnotou 1065,72 a p-hodnotou 0,000 byla při významové úrovni  $\alpha = 0,05$  zamítnuta nulová hypotéza o shodnosti středních hodnot. Přehled skupin podle Games-Howellovy metody dále objasňuje, že střední hodnoty Ra pro jednotlivé materiály nejsou stejné a jsou rozděleny do odlišných skupin A, B, C a D.



Obrázek 84 Intervalové porovnání parametrů Ra mezi materiály

Analýza výsledků jednotlivých skupin na individuálním grafu hodnot ukazuje rozptýlení jednotlivých měření kolem průměru, přičemž nejvyšší průměrnou hodnotu má materiál Ra 1-1 Al, následovaný materiálem Ra 1-1 12 024, Ra 1-1 mosaz a s nejnižším průměrem Ra 1-1 oceli 19 820.



Obrázek 85 Podobnost středních hodnot parametrů Ra mezi materiály metodou ANOVA

Games-Howellovy 95% intervaly spolehlivosti pro rozdíly průměrů ukazují, že žádný interval neprotíná nulu, což znamená, že střední hodnoty se statisticky významně liší. Při pohledu na tyto intervaly spolehlivosti můžeme konstatovat, že rozdíly mezi materiály Ra 1-1 Al a Ra 1-1 19820; Ra 1-1 Al a Ra 1-1 12024; Ra 1-1 Al a Ra 1-1 mosaz jsou statisticky významné, stejně tak mezi ostatními porovnávanými páry.

### Výsledek metody ANOVA dle programu Minitab:

Null hypothesis All means are equal  
 Alternative hypothesis At least one mean is different  
 Significance level  $\alpha = 0,05$

Equal variances were not assumed for the analysis.

#### Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	4	Ra 1-1 304; Ra 1-1 12024; Ra 1-1 Al; Ra 1-1 mosaz

#### Welch's Test

Source	DF Num	DF Den	F-Value	P-Value
Factor	3	101,497	1065,72	0,000

#### Model Summary

R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
87,06%	86,86%	86,52%

#### Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Ra 1-1 304	50	0,76292	0,06957	(0,74315; 0,78269)
Ra 1-1 12024	50	1,5293	0,2434	( 1,4602; 1,5985)
Ra 1-1 Al	50	1,8477	0,1247	( 1,8122; 1,8831)
Ra 1-1 mosaz	50	1,2883	0,1251	( 1,2527; 1,3238)

### Games-Howell Pairwise Comparisons

Grouping Information Using the Games-Howell Method and 95% Confidence

Factor	N	Mean	Grouping
Ra 1-1 Al	50	1,8477	A
Ra 1-1 12024	50	1,5293	B
Ra 1-1 mosaz	50	1,2883	C
Ra 1-1 304	50	0,76292	D

Means that do not share a letter are significantly different.

**Závěr:**

Z těchto analýz vyplývá, že materiály mají rozdílné průměrné hodnoty Ra a nelze je považovat za vzájemně zaměnitelné v kontextu nastavení laseru. Toto zjištění má přímý vliv na výběr vhodných parametrů a očekávané reakce materiálů při laserovém zpracování. Výsledky ukazují význam přiřazení konkrétních nastavení laseru pro dosažení požadované kvality povrchu u různých materiálů.

Tabulka 11 Mezimateriálové srovnání středních hodnot parametru Ra a zkoumání vlivu nastavení laseru

Ra	
Parametry nastavení laseru	Výsledek
1-1	Významná odlišnost
1-2	Významná odlišnost
1-3	Významná odlišnost
1-4	Významná odlišnost
1-5	Významná odlišnost
2-1	Významná odlišnost
2-2	Shoda u vzorků materiálu oceli 19 820 a Mosazi
2-3	Významná odlišnost
2-4	Shoda u vzorků materiálu oceli 19 820 a Mosazi
2-5	Významná odlišnost
3-1	Významná odlišnost
3-2	Významná odlišnost
3-3	Shoda u vzorků materiálu oceli 19 820 a Mosazi
3-4	Významná odlišnost
3-5	Významná odlišnost
4-1	Shoda u vzorků materiálu Al a oceli 19820
4-2	Významná odlišnost
4-3	Významná odlišnost
4-4	Významná odlišnost
4-5	Významná odlišnost
5-1	Shoda u vzorků materiálu Al a oceli 19820
5-2	Významná odlišnost
5-3	Významná odlišnost
5-4	Významná odlišnost
5-5	Významná odlišnost

Popisovaná tabulka 11, představuje porovnání středních hodnot parametru Ra pro různá nastavení laserového obrábění, a to pomocí Games-Howell testu. Tento test je užitečný pro stanovení, zda se střední hodnoty mezi skupinami materiálů liší při specifických nastaveních laseru. Uváděná významová úroveň  $\alpha = 0,05$  slouží jako práh pro určení statistické významnosti rozdílů.

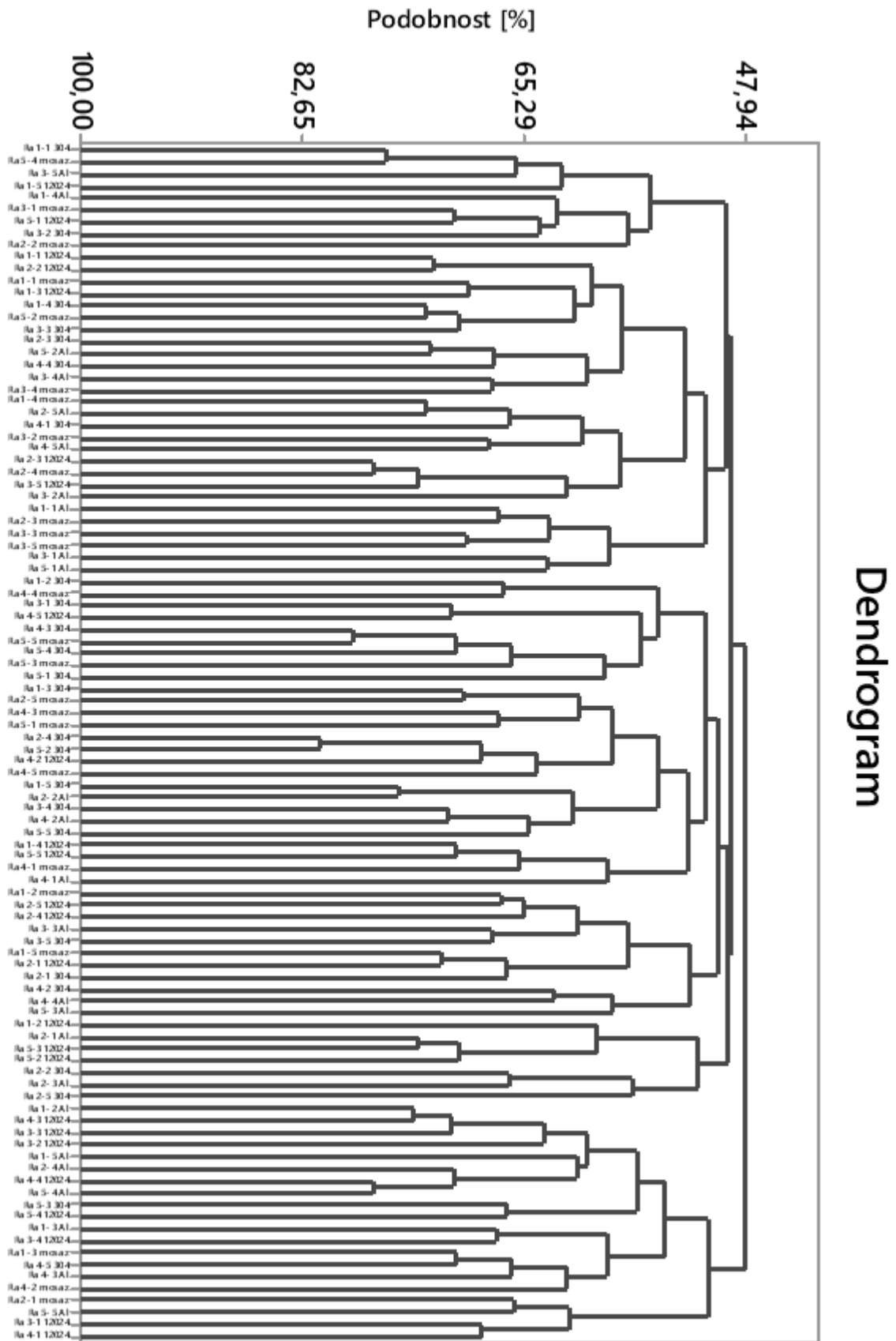
Z výsledků v tabulce vyplývá, že při nastavení laseru 2-2 a 2-4 nezamítáme nulovou hypotézu o podobě středních hodnot Ra mezi materiály 19 820 a Mosazi. Stejně tak při nastavení 3-3 nebyly nalezeny důkazy pro zamítnutí nulové hypotézy, což ukazuje na podobu středních hodnot těchto materiálů. Dále shoda mezi materiály Al (čistý hliník) a ocelí 19 820 byla objevena u nastavení 4-1 a 5-1.

Je zajímavé, že ačkoli chemické složení oceli 19 820 a Mosazi se liší, reakce těchto materiálů na stejné nastavení laseru může být podobná, což může být důsledkem náhodné shody v reakcích na specifické parametry obrábění. Tento jev by mohl být ovlivněn například specifickými fyzikálními vlastnostmi těchto materiálů, které nejsou přímo závislé na jejich chemickém složení, ale spíše na mikrostruktuře nebo tepelné vodivosti, která může ovlivnit způsob, jakým materiál reaguje na vysokou energii laseru při stejných obráběcích podmínkách.

**Závěr:**

Analýzy ukazují, že materiály mají rozdílné průměrné hodnoty Ra, což indikuje, že nejsou vzájemně zaměnitelné ve vztahu k nastavení laseru. Tyto zjištění mají přímý dopad na výběr vhodných parametrů laseru pro dosažení požadované kvality povrchové úpravy u zkoumaných materiálů. Z těchto výsledků plyne důležitost přizpůsobení konkrétních nastavení laseru pro optimální výsledky při laserovém zpracování pro daný materiál.

7.2.4 Mezimateriálové porovnání parametru Ra pomocí analýzy shluků



Obrázek 86 Dendrogram pro vyhodnocení analýzu shluků parametru Ra



Uvedený Dendrogram mezi parametry Ra testovaných materiálů vizualizuje výsledky shlukové analýzy, která hodnotí míru podobnosti mezi testovanými materiály při různých nastaveních obrábění laserem. Tento graf je obzvláště užitečný pro identifikaci podobných chování materiálů pod různými podmínkami laserového obrábění, což umožňuje optimalizaci výrobních procesů.

### Interpretace Dendrogramu

- **Podobnost (%):** Na horizontální ose grafu je uvedeno procento podobnosti mezi materiály nebo skupinami materiálů. Čím blíže k sobě jsou dva materiály/sloučeniny na horizontální ose, tím vyšší je jejich podobnost.
- **Materiály a Nastavení:** Na vertikální ose jsou uvedeny popisy, které reprezentují kombinace materiálů a specifická nastavení laseru při obrábění. Například, "Ra 1-1 12024" značí materiál ocel 12024 při nastavení 1-1 (rychlost 500 mm/s, výkon 10 W).

### Analýza Shluků a Materiálů:

- **Ocel 12 024 a 19 820(304L):** Tyto dva typy oceli jsou si často velmi podobné ve svém chování při různých nastaveních obrábění. Zejména při vyšších nastaveních výkonu a rychlosti paprsku (např. 3-4, 3-5, 4-4, 4-5) mají tyto oceli velmi podobné reakce.
- **Hliník (Al) a Mosaz:** Tyto materiály tvoří jiné shluky, což ukazuje na odlišné chování při obrábění. V některých případech se shlukují blíže k ocelím, což naznačuje, že za určitých podmínek mohou vykazovat podobné vlastnosti. Ovšem vzhledem k jejich materiálovému složení a příbuzným materiálovým vlastnostem jako například hodnoty tepelné vodivosti, vyznačují větší míru korelace při reakci na stejné nastavení parametrů laseru než-li v porovnání se vzorky oceli. O tomto zjištění lze však mluvit pouze jako o teoretické podobnosti a na základě porovnání parametrů Ra pomocí metody ANOVA, jej nelze potvrdit.
- **Vliv Nastavení Obrábění:** Nastavení obrábění významně ovlivňuje, jak si materiály jsou podobné. Specifické kombinace rychlosti a výkonu mohou vést k podobným nebo odlišným chováním materiálů.

**Závěr:**

Nejvíce jsou si podobné oceli 12 024 a 19 820 (304L) při vyšších rychlostech a výkonech, což může být dáno podobným materiálovým složením. Pro tyto materiály se nabízí možnost využití aplikace podobných nastavení laseru na základě požadovaných hodnot parametru Ra. Pro oceli je optimální nastavení, kde vykazují podobné chování, typicky vyšší výkon a rychlost laseru. Pro Al a Mosaz jsou potřeba specifitější analýzy, aby bylo možné určit jejich optimální nastavení pro podobné chování.

**7.3 Srovnání a vyhodnocení parametru Rz pro zkoumané materiály**

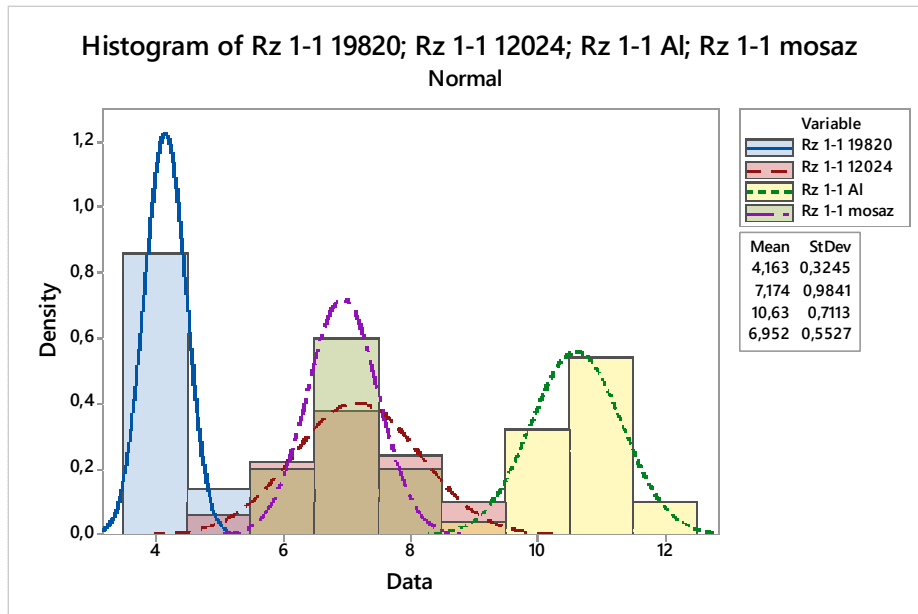
Pro analýzu parametrů Rz u zkoumaných vzorků byl stanoven cíl zjistit, zda existuje shoda mezi materiály a parametry nastavení laseru. Proto byly aplikovány na stejné postupy a testy pro vyhodnocení tohoto parametru mezi zkoumanými vzorky. Data byla nejprve prozkoumána pomocí histogramu, což umožnilo předběžnou kontrolu rozdělení hodnot Rz. Následně byl použit test rozptylů, který poskytl důležité informace o variabilitě hodnot Rz mezi jednotlivými skupinami. Pro hlubší porovnání středních hodnot byla aplikována metoda ANOVA, která statisticky ověřila rozdíly středních hodnot mezi skupinami dat parametru Rz a zkoumanými materiály.

Vzhledem k tomu, že data vykazovala normální rozdělení, bylo možné aplikovat parametrické statistické metody pro vyhodnocení shody. Výsledná analýza ukázala míru podobnosti parametrů Rz mezi materiály a nastavením laseru, což bylo vizualizováno pomocí dendrogramu. Tento dendrogram efektivně prezentoval procentuální shodu mezi zkoumanými parametry, čímž poskytl lepší pochopení vztahů mezi nastavením laseru a chováním materiálů. Postup pro vyhodnocení parametru Rz byl zachován stejný jako pro parametr Ra, což zajistilo možnost srovnatelnosti chování mezi materiály a prozkoumáním vlivu reakce v závislosti na nastavením laseru.

Díky těmto metodám bylo možné identifikovat faktory ovlivňující kvalitu povrchu materiálů za použití laseru, a to včetně vhodného nastavení pro daný materiál. Výsledky této analýzy poskytly cenné informace pro optimalizaci laserového zpracování v závislosti na specifických materiálech a požadavcích na povrchové vlastnosti.

### 7.3.1 Srovnání pomocí Histogramu

Pro prvotní porovnání rozptylů hodnot parametrů Rz pro veškeré zkoumané materiály bylo využito Histogramu.



Obrázek 87 Porovnání histogramů parametru Rz mezi materiály při nastavení laseru 1-1

Vizualizace histogramu hodnot parametru Rz na reprezentativním grafu ukazuje rozdíly v povrchové textuře materiálů ocelí 19 820, 12 024, dále mosazi a čistého hliníku zpracovaných stejným nastavením obráběcích parametrů laseru 1-1 dle tabulky č.2. Zobrazovaná distribuce parametrů Rz mezi materiály je následovná:

Rz 1-1 19820, má průměrnou hodnotu 4,163  $\mu\text{m}$  s poměrně malou standardní odchylkou 0,3245  $\mu\text{m}$ . Tento úzký vrchol histogramu naznačuje, že hodnoty Rz jsou konzistentní a mají malý rozptyl.

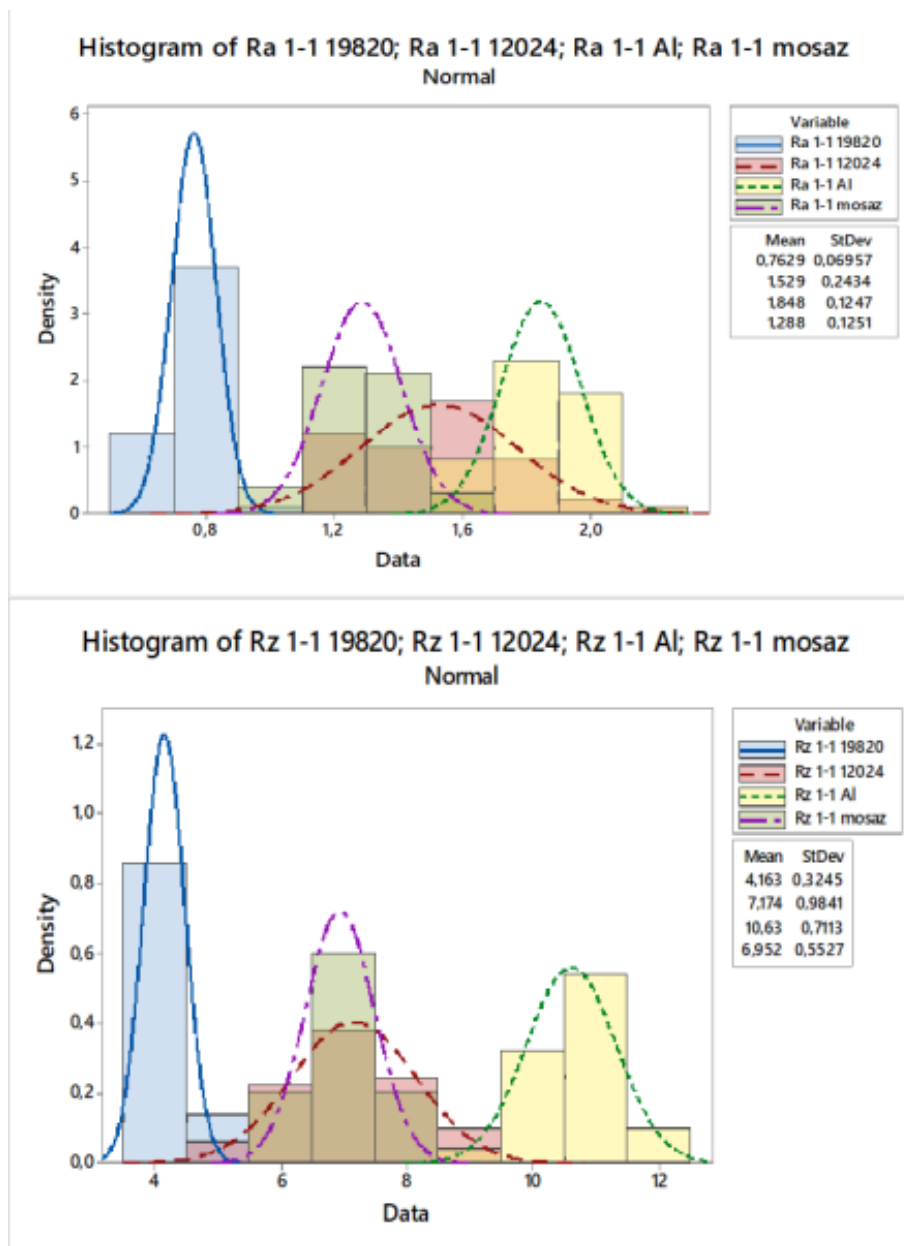
Rz 1-1 12024, vykazuje průměr 7,174  $\mu\text{m}$  a výrazně vyšší standardní odchylku 0,9841  $\mu\text{m}$ . Širší rozdělení hodnot zde odráží větší variabilitu v drsnosti povrchu, což může být důsledkem rozdílů ve vlastnostech materiálu.

Rz 1-1 Al, který představuje hliník, má průměrnou hodnotu 10,63  $\mu\text{m}$  a standardní odchylku 0,7113  $\mu\text{m}$ . Histogram tohoto materiálu je širší než u oceli 19820, což naznačuje větší variabilitu v drsnosti povrchu hliníku.

Rz 1-1 mosaz vykazuje průměrnou hodnotu 6,952  $\mu\text{m}$  a standardní odchylku 0,5527  $\mu\text{m}$ , což značí střední rozptyl hodnot, umístěný mezi ocelí 19820 a hliníkem.

Histogram poskytuje užitečné srovnání, jak různé materiály reagují na stejné laserové zpracování. Zatímco některé materiály, jako je ocel 19 820, vykazují úzký rozptyl hodnot, což naznačuje přesný a konzistentní proces obrábění, jiné, jako hliník či mosaz, ukazují větší variabilitu, což může vyžadovat úpravu nastavení laseru pro optimalizaci procesu. Tento přístup umožňuje detailní mezimateriálové srovnání a optimalizaci procesních parametrů.

### Porovnání parametru Ra a Rz:



Obrázek 88 Porovnání Gaussovských rozdělení parametrů Ra a Rz mezi materiály

Při pohledu na histogramy povrchových parametrů Ra a Rz pro testované materiály obrobené stejným nastavením vláknového laseru (rychlost obrábění a výkon laseru 1-1) lze pozorovat výsledky, které naznačují, že rozptyly obou parametrů jsou si podobné. Tato shoda v rozptylu a tvaru distribucí u obou parametrů Ra a Rz naznačuje, že obrobení materiálů závisí primárně na nastavení laseru, což je důležité pro zhodnocení procesní konzistence.

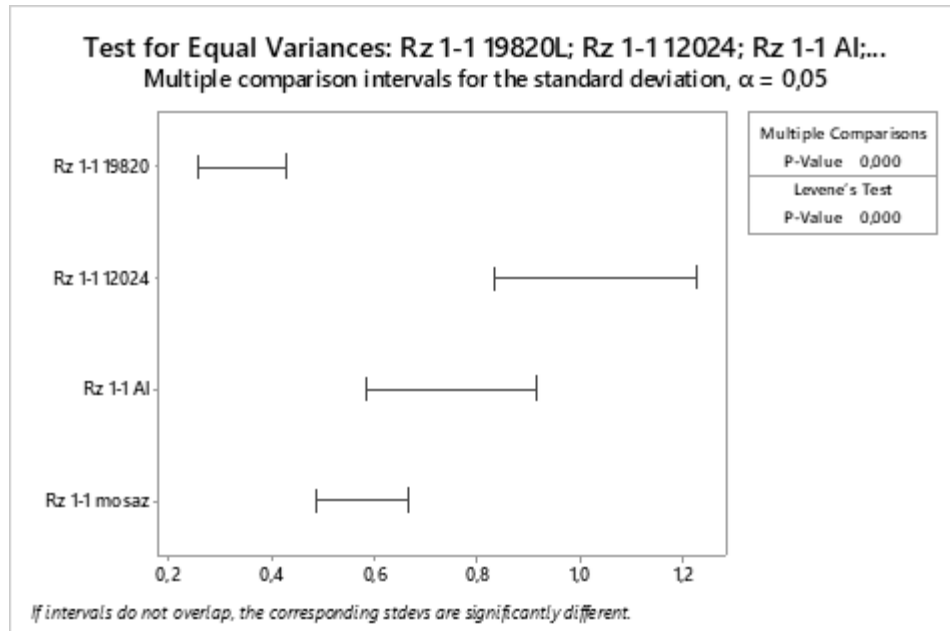
V grafu je zřetelné, že Gaussovské rozdělení pro rychlořeznou ocel 19 820, konstrukční ocel 12 024, čistý hliník (Al) a mosaz má u obou parametrů Ra i Rz podobnou formu, což podtrhuje jednotnost laserového procesu. Například i když u oceli 12 024 pozorujeme u parametru Ra širší interval hodnot než u Rz, obecně vzato jsou oba parametry distribuovány kolem svých středních hodnot velmi podobně. Dále si můžeme všimnout, že střední hodnota Gaussovského rozdělení pro konstrukční ocel je u parametru Rz blíže k hodnotám pro mosaz než u parametru Ra, což může signalizovat jemné odlišnosti v charakteristikách povrchu, které jsou stále však ovlivněny stejným nastavením laseru.

**Závěr:**

Data ukazují, že výsledky obrobení materiálů, rozptyly a tvar Gaussovských rozdělení jsou si podobné napříč materiály a oběma parametry Ra a Rz, což svědčí o přesnosti a opakovatelnosti laserového obrábění. To naznačuje, že jejich reakce na variabilitu nastavení laseru je srovnatelná. Tato pozorování byla následně ověřena prostřednictvím rozsáhlejších datových analýz, jak je interpretováno v kapitolách 7.3.2 a 7.3.3.

### 7.3.2 Porovnání rozptylů pomocí Levenesova testu

Pro test shodnosti rozptylů byl mezi materiály u parametru Rz použit Levenesův test v programu Minitab, tímto byl zachován stejný postup při vyhodnocování jako u parametru Ra.



Obrázek 89 Graf porovnání rozptylů mezi materiály pro parametr Rz při nastavení laseru 1-1

Výsledky pro rovnost rozptylů parametrů Rz pro testované materiály při reprezentativním nastavení laseru 1-1 dle tabulky č.2, jsou reprezentovány obrázkem č. 89, kde každý horizontální úsek představuje interval spolehlivosti pro směrodatnou odchylku jednotlivých skupin. Graf využívá Levenesův test pro hodnocení rovnosti těchto rozptylů.

Každá čára na grafu představuje interval spolehlivosti pro směrodatnou odchylku skupiny Rz parametrů. Pokud se intervaly mezi dvěma nebo více skupinami překrývají, naznačuje to, že jejich směrodatné odchylky nejsou statisticky významně odlišné s pravděpodobností  $1 - \alpha = 95$ . Naopak, pokud se intervaly nepřekrývají, naznačuje to významný rozdíl ve směrodatných odchylkách.

Výsledná „p“ hodnota z Levenesova testu naznačuje, že existují významné rozdíly v rozptylu napříč skupinami při kolektivním posouzení.

**Závěr:**

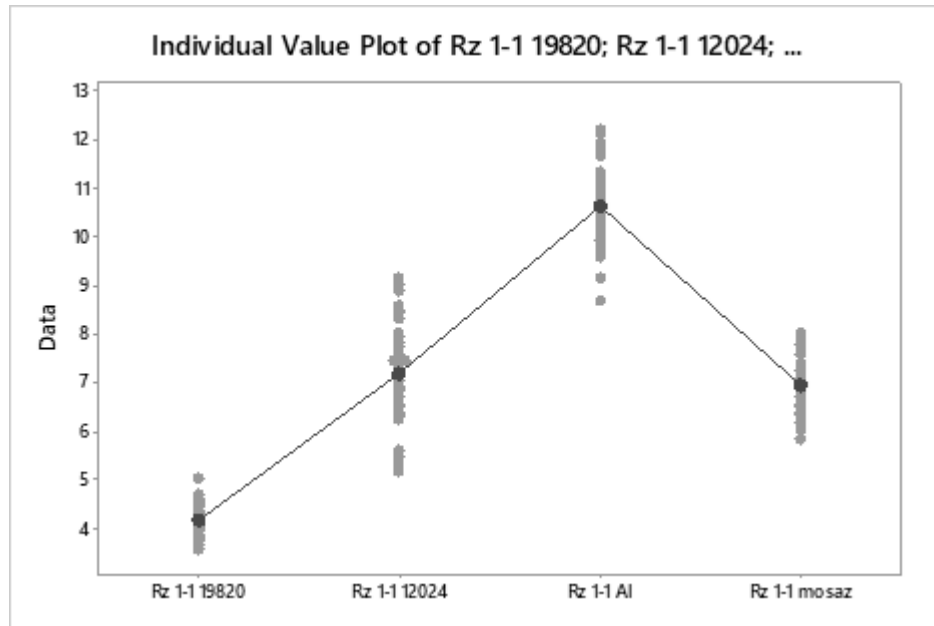
Zatímco některé skupiny Rz 1-1 12024 vs Rz 1-1 Al a Rz 1-1 Al vs Rz 1-1 mosaz vykazují podobné rozptyly naznačující homogenitu mezi nimi, celkový výsledek testu ukazuje na významnou heterogenitu rozptylů napříč všemi skupinami. Proto je nulová hypotéza o rovnosti rozptylů napříč všemi skupinami zamítnuta. Tento postup vyhodnocení byl zvolen stejně jako u parametrů Ra, kde bylo dosaženo stejných výsledků. Takovému vyhodnocení Levenesovým testem rozptylů bylo aplikováno při všech zkoumaných nastaveních parametrů laserového obrábění dle tabulky č.2. Výsledky těchto nastavení dosáhly stejné heterogenity rozptylů mezi skupinami parametrů Rz, stejně jako u reprezentativního nastavení laseru Rz 1-1.

Tato zjištění jsou klíčová pro následující statistické postupy vyhodnocení metodou ANOVA, kde je předpoklad rovnosti rozptylů mezi skupinami. V tomto případě, když rozptyly nejsou rovny, bylo přistoupeno na vhodnou alternativní metodu post hoc testu Games-Howell, pro aplikace metody ANOVA.

**7.3.3 Test rozdílu středních hodnot mezi parametry Rz, Metoda ANOVA**

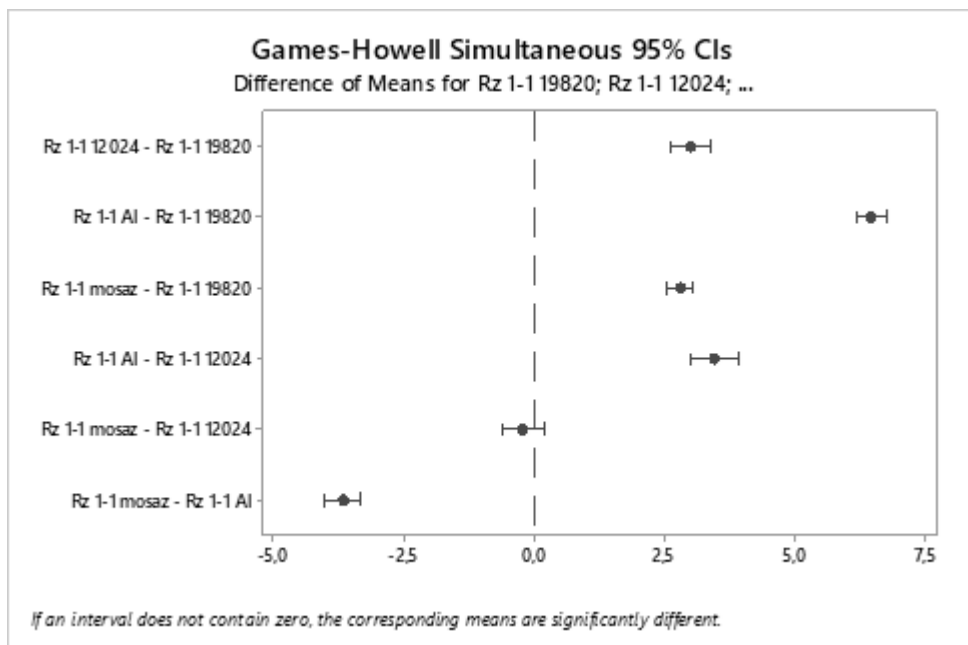
Vyhodnocení rozdílů mezi středními hodnotami parametrů Rz zkoumaných materiálů pro parametrické nastavení laseru 1-1 byl obdobně jako u parametru Ra zvolen Gamesův-Howellův test. Tento test nepředpokládá homogenitu rozptylů nebo stejnou velikost vzorků, čímž se jeví jako adekvátní pro zvolené postupy vyhodnocení.

Z analýzy dat pro parametry Rz 1-1 použitím jednocestné ANOVA v programu Minitab vyplývá, že střední hodnoty těchto parametrů se statisticky významně liší. S F-hodnotou 1280,16 a p-hodnotou 0 při hladině významnosti  $\alpha = 0,05$  byla nulová hypotéza o shodě středních hodnot zamítnuta.



Obrázek 90 Intervalové porovnání parametrů Rz mezi materiály

Graf individuálních hodnot ukazuje distribuci měření Rz pro každý materiál. Z grafu je patrné, že materiál Rz 1-1 Al má nejvyšší průměrnou hodnotu, následovaný materiálem Rz 1-1 12024, Rz 1-1 mosaz a nakonec Rz 1-1 19820 s nejnižší průměrnou hodnotou.



Obrázek 91 Podobnost středních hodnot parametrů Rz mezi materiály metodou ANOVA

Games-Howellovy simultánní 95% konfidenční intervaly pro rozdíly průměrů dále objasňují vztahy mezi materiály. Z intervalů je zřejmé, že všechny porovnávané dvojice materiálů mají



statisticky významně odlišné střední hodnoty Rz, kromě Rz 1-1 mosaz a Rz 1-1 oceli 12 024, jelikož ten jediný z intervalů obsahuje nulu. Největší rozdíly jsou mezi materiálem Rz 1-1 Al a ostatními, což koresponduje s pozorováním z grafu individuálních hodnot.

### Výsledek metody ANOVA dle programu Minitab:

Null hypothesis All means are equal  
 Alternative hypothesis At least one mean is different  
 Significance level  $\alpha = 0,05$

Equal variances were not assumed for the analysis.

#### Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	4	Rz 1-1 19820; Rz 1-1 12024; Rz 1-1 Al; Rz 1-1 mosaz

#### Welch's Test

Source	DF		F-Value	P-Value
	Num	Den		
Factor	3	101,020	1280,16	0,000

#### Model Summary

R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)
91,93%	91,81%	91,60%

#### Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Rz 1-1 19820	50	4,1628	0,3245	(4,0706; 4,2551)
Rz 1-1 12024	50	7,174	0,984	(6,894; 7,454)
Rz 1-1 Al	50	10,630	0,711	(10,428; 10,832)
Rz 1-1 mosaz	50	6,9524	0,5527	(6,7953; 7,1094)

Means that do not share a letter are significantly different.

### Závěr:

Lze konstatovat, že rozdíly v průměrných hodnotách Rz jsou signifikantní a značně se liší v závislosti na materiálu. Tato zjištění jsou klíčová pro rozhodování o vhodnosti materiálů pro specifické aplikace zpracování laserem, zejména pokud jsou požadavky na povrchovou kvalitu kritické. Tyto výsledky také nabízejí cenný pohled pro nastavení parametrů laseru pro zpracování různých materiálů tak, aby bylo dosaženo optimálních a chtěných vlastností povrchu. Stejně tak bylo zjištěno, že podobné statisticky významné rozdíly existují i mezi parametrem Ra u zkoumaných materiálů a všech dostupných nastaveních laseru, což dále podtrhuje důležitost vhodného nastavení laserových parametrů pro dosažení požadované kvality povrchových úprav mezi materiály.

Tabulka 12 Mezimateriálové srovnání středních hodnot parametru Rz a zkoumání vlivu nastavení laseru

Rz	
Parametry nastavení laseru	Výsledek
1-1	Shoda u vzorků materiálu oceli 12 024 a Mosazi
1-2	Významná odlišnost
1-3	Shoda u vzorků materiálu oceli 19 820 a 12 024
1-4	Významná odlišnost
1-5	Významná odlišnost
2-1	Významná odlišnost
2-2	Shoda u vzorků materiálu oceli 19 820 a Mosazi
2-3	Významná odlišnost
2-4	Shoda u vzorků materiálu oceli 12 024 a Mosazi
2-5	Významná odlišnost
3-1	Významná odlišnost
3-2	Významná odlišnost
3-3	Významná odlišnost
3-4	Významná odlišnost
3-5	Významná odlišnost
4-1	Významná odlišnost
4-2	Shoda u vzorků materiálu Al a oceli 12 024
4-3	Významná odlišnost
4-4	Významná odlišnost
4-5	Významná odlišnost
5-1	Významná odlišnost
5-2	Významná odlišnost
5-3	Významná odlišnost
5-4	Významná odlišnost
5-5	Významná odlišnost

Tabulka 12, představuje porovnání středních hodnot parametru Rz pro různá nastavení laserového obrábění, a to pomocí Games-Howell testu viz. reprezentativní příklad na obrázku 91. Tento test je užitečný pro stanovení, zda se střední hodnoty mezi skupinami materiálů liší při specifických nastaveních laseru. Uváděná významová hladina  $\alpha = 0,05$  slouží jako práh pro určení statistické významnosti rozdílů.

Z výsledků v grafu a tabulce vyplývá, že při nastavení laseru 1-1 nedochází ke statisticky významnému rozdílu v hodnotách Rz mezi mosazí a ocelí 12 024, což naznačuje podobnou reakci těchto materiálů na dané nastavení laseru. Shody byly dále nalezeny při nastavení 1-3 mezi materiály 12 024 a 19 820, při nastavení laseru 2-2 mezi ocelí 19 820 a mosazí. Další podobnost byla nalezena u nastavení 2-4 mezi ocelí 12 024 a mosazí a v poslední řadě mezi čistým hliníkem a ocelí 12 024 u nastavení 4-2. Ve všech dalších testovaných nastaveních

byly zaznamenány významné rozdíly mezi materiály, což ukazuje, že materiály reagují velmi rozdílně na parametry laserového obrábění.

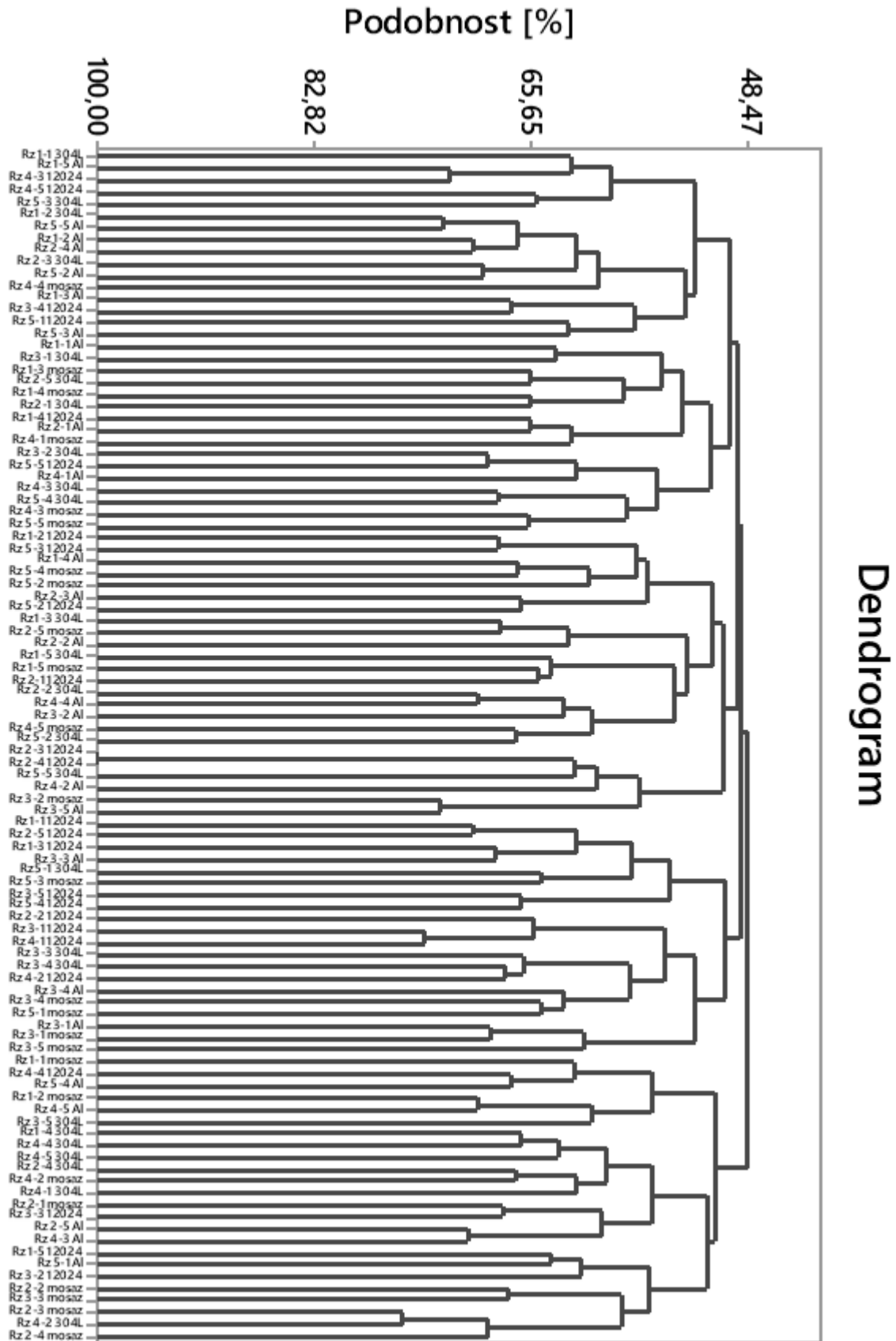
**Závěr:**

Výzkum poukázal na rozdíly v průměrných hodnotách parametru Rz mezi zkoumanými materiály, což nám poskytuje důležitý pohled na jejich interakci s laserovým zpracováním. Bylo zjištěno, že využití materiály mosaz, oceli 12 024 a 19820, a hliník reagují na charakteristická nastavení laseru rozdílně, což ukazuje, že tyto materiály nejsou vzájemně zaměnitelné ve vztahu k specifickým nastavením laseru.

Výsledky Games-Howell testu, použitého pro srovnání středních hodnot parametru Rz, zdůrazňují význam pečlivého výběru laserových parametrů pro každý materiál zvlášť, aby se dosáhlo optimální kvality povrchové úpravy. Některé nastavení laseru vedly k významným odlišnostem v hodnotách Rz, zatímco jiná nastavení ukázala shodu mezi některými materiály, což naznačuje možnost jejich podobného chování v určitých podmínkách.

Z těchto výsledků vyplývá, že pro dosažení nejlepších možných výsledků je nezbytné přizpůsobit nastavení laseru specifickým vlastnostem každého materiálu. Důležitost této individualizace je dána konstatováním, že chemické složení, tepelné vlastnosti a mikrostruktura materiálů mají výrazný dopad na to, jak materiály reagují na vysokou energii laseru.

7.3.4 Mezimateriálové porovnání parametru Rz pomocí analýzy shluků



Obrázek 92 Dendrogram pro vyhodnocení analýzu shluků parametru Rz

Při analýze dendrogramu parametru Rz mezi materiály bylo zjištěno, že například, kombinace jako Rz-1-1\_304L a Rz-1-2\_304L, které se spojují na vysoké úrovni podobnosti, ukazují, že malá změna výkonu laseru (z 10 W na 20 W) u stejného materiálu nevede k velkým rozdílům ve výsledcích. Materiály, které se shlukují na vysokých úrovních podobnosti pod různými nastaveními, tedy mezi různými rychlostmi a výkony, ukazují na schopnost laseru dosahovat konzistentních výsledků přes různé typy a parametry materiálů.

#### **Závěr:**

Na základě dendrogramu lze konstatovat, že materiály jako vysoce legovaná ocel 19 820 a konstrukční ocel 12 024 jsou si při různých nastaveních laseru podobnější, což znamená, že parametry nastavení mohou být při určitých podmínkách flexibilně upraveny s minimálním vlivem na kvalitu obrábění.

Hliník a mosaz mohou vykazovat rozdílné výsledky obrábění pod různými nastaveními, což vykazuje rozdílné reakce na konzistentní nastavení laseru, a proto nelze využít jednotné nastavení laseru pro tyto dva materiály pro dosažení obdobných výsledků.

#### **7.3.5 Porovnání Dendrogramů mezi parametry Ra a Rz**

Oba dendrogramy mají podobnou strukturu, což znamená, že hierarchické shlukování na základě parametrů Ra a Rz vedlo k podobným skupinám nebo shlukům materiálů a nastavení. Toto naznačuje, že oba parametry povrchové kvality Ra a Rz jsou do určité míry ovlivněny stejnými faktory, které ovlivňují obrábění materiálů.

#### **Shlukování:**

V obou dendrogramech se vyskytují shluky, které kombinují různé typy materiálů a nastavení, naznačující, že určitá nastavení laseru mohou poskytovat konzistentní výsledky napříč různými materiály.

Shluky vysoké podobnosti (blízko 100%) jsou v obou případech podobné, což ukazuje, že změny v rychlosti a výkonu laseru mají podobný vliv na oba parametry Ra a Rz.

**Materiálová a nastavení specifika:**

Obě analýzy ukazují, že konkrétní kombinace materiálů a nastavení, které jsou si velmi podobné, zahrnují nastavení, kde se mění výkon laseru, ale zachovává se stejný materiál (např. přechody mezi 1-1 až 1-5 pro daný materiál).

V obou dendrogramech jsou některé materiály, jako je mosaz a hliník, klasifikovány do různých shluků podle nastavení, což naznačuje, že tyto materiály reagují odlišně na změny v nastaveních laseru.

**Závěr:**

Vzhledem k tomu, že oba dendrogramy vykazují podobné shlukování, bylo usouzeno, že oba parametry Ra a Rz jsou podobně citlivé na změny v parametrech laseru. Toto je důležité pro úpravu procesů obrábění, kde může být přizpůsobení parametrů laseru uskutečněno s očekáváním podobných změn v obou parametrech povrchové kvality.

Procesy nastavení laseru by měly být optimalizovány tak, aby zohledňovaly oba posuzované parametry kvality. Zjištění z těchto analýz mohou být využita k vytvoření dokumentů pro přehled dosahovaných kvalit obrobění povrchu dle požadovaného využití.

## ZÁVĚR

Na základě provedené statistické analýzy bylo zjištěno, že kvalita povrchu materiálů po obrábění vláknovým laserem je silně ovlivněna nastaveními laseru a materiálem samotným. Ocel 12 024 a 19 820 ukázaly při vyšších výkonech nastavení laseru podobné chování, což naznačuje možnost flexibilního nastavení rychlostních parametrů mezi těmito dvěma materiály. Naopak hliník a mosaz reagovaly na stejné nastavení laseru odlišně, což zdůrazňuje nutnost individuálního přizpůsobení laserových parametrů pro každý materiál.

Analýza dat z tabulek 7-10 laserového obrábění vyhodnocovaných materiálů odhalila specifická nastavení laseru, která poskytují nejlepší povrchovou úpravu měřenou pomocí parametrů Ra a Rz, kdy menší hodnoty těchto parametrů znamenají hladší povrch, což je často žádoucí ve výrobních procesech.

Pro ocel 19 820 bylo nejlepší nastavení pro oba parametry Ra i Rz u vzorku 3-1. Toto nastavení dosáhlo Ra 0,54118  $\mu\text{m}$  a Rz 3,0420  $\mu\text{m}$ . U čistého hliníku bylo nejlepší nastavení pro Ra také pro vzorek 3-1 s hodnotou 0,71122  $\mu\text{m}$ , zatímco pro Rz bylo nejlepší u vzorku 1-2 s hodnotou 2,8082  $\mu\text{m}$ . Pro mosaz bylo nejlepší nastavení u vzorku 3-1 pro oba parametry s hodnotami Ra 0,60008  $\mu\text{m}$  a Rz 3,3683  $\mu\text{m}$ . Nakonec u oceli 12 024 bylo nejlepší nastavení u vzorku 4-5 pro oba parametry s Ra 1,33060  $\mu\text{m}$  a Rz 6,5899  $\mu\text{m}$ .

Z těchto výsledků je patrné, že některá nastavení laseru jsou univerzálně účinnější přes různé materiály, jako je vzorek 3-1, který se jeví jako optimální pro ocel 19 820, čistý hliník a mosaz. Toto může být dáno specifickou kombinací rychlosti a výkonu laseru, která je vhodně adaptována na vlastnosti těchto materiálů, což umožňuje dosáhnout hladšího a kvalitnějšího povrchu.

Je důležité poznamenat, že výsledky mohou být ovlivněny také vyhodnocovanou plochou. Celková obrobená plocha jednoho pole byla 5000x5000  $\mu\text{m}$ . Při analýze bylo použito bezkontaktního profilometru Zygo, který byl zaměřen pouze na vybranou část obrobené plochy o velikosti přibližně 3000x3000  $\mu\text{m}$ . Pokud bychom se zaměřili na jinou část plochy, mohl by se výsledek ideálního nastavení měnit. Toto je však pouze odhad, který by bylo možné potvrdit dalším důkladnějším vyhodnocením.

Výsledky statistických testů, jako Games-Howellův a Lavenesův, odhalily signifikantní rozdíly v průměrných hodnotách a rozptylech parametrů Ra a Rz mezi materiály. Tato zjištění zdůrazňují, že každý materiál reaguje na laserové obrábění odlišně, a proto je nezbytné provádět pečlivý výběr a nastavení laserových parametrů. Při zvyšujícím se výkonu laseru, avšak konstantní rychlosti, došlo k výrazným změnám v rozptylu hodnot u ocelí 19 820 a 12 024, což vedlo ke zvýšení směrodatné odchylky výběrového souboru a indikovalo menší přesnost obrábění za těchto podmínek. Avšak působení paprsku při těchto podmínkách vykazovalo dle zkoumaných histogramů značnou podobnost. Na druhou stranu u mosazi zůstával interval hodnot a směrodatná odchylka stabilní, což ukazuje na přesnost procesu i při měnících se podmínkách. Nejvíce citlivým materiálem na nastavení laseru byl čistý hliník, který vykazoval nejvyšší střední hodnoty a velmi široký rozptyl hodnot parametrů Ra a Rz. Důležité je také zjištění, že oba parametry, Ra i Rz, vykazují podobnou citlivost na změny v laserovém nastavení, to je důležité pro úpravu procesů obrábění, kde může být přizpůsobení parametrů laseru uskutečněno s očekáváním podobných změn v obou parametrech povrchové kvality.

Tato souhrnná analýza zdůrazňuje, jak zkoumané materiály reagují na obrábění vláknovým laserem a jaké parametry je potřeba nastavit pro dosažení optimálních výsledků. Ukazuje na důležitost pečlivého výběru a nastavení laserových parametrů v závislosti na specifických vlastnostech a požadavcích materiálů. Výběr správných parametrů je klíčový pro maximalizaci kvality povrchu a efektivity obrábění.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] M. IKUMAPAYI, Omolayo; OMIETIMI, B.H.; ONU, Peter a AKINLABI, Esther, October 2023. Non-Traditional Machining Techniques in Manufacturing Industries -An Overview. Online. S. 1-18. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001213>. [cit. 2024-05-06].
- [2] MANKOVÁ, Ildiko, 2000. Nekonvenční technologie. In: Progresívne technológie. ISBN 80-7099-430-4.
- [3] CHEN, Ji-Peng; GU, Lin a HE, Guo-Jian, 24 July 2020n. 1. A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. Online. S. 1-37. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s40436-020-00313-2>. [cit. 2024-05-06].
- [4] ČEP, PH.D., doc. Ing. Robert a PETRŮ, PH.D., Ing. et Ing. Mgr. Jana, 2013. *ÚVOD DO TEORIE OBRÁBĚNÍ*. Online. Ostrava. ISBN 978-80-248-3013-1. Dostupné z: <https://1url.cz/11tir>. [cit. 2024-05-06].
- [5] KOŘÁN, Pavel, 2013. Princip Laserové řezání. Online. In: . Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>. [cit. 2024-03-24].
- [6] KIBRIA, Golam; BHATTACHARYYA, B. a DAVIM, J. Paulo, 2017. *Non-traditional Micromachining Processes*. Online. ISBN 978-3-319-52009-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52009-4>. [cit. 2024-05-06].
- [7] MEHTA, Kush; GUPTA, Munish a SHARMA, Priyaranjan, 17 October 2017n. 1. Nano-Machining, Nano-Joining, and Nano-Welding. Online. S. 71–86. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-68801-5\\_4](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-68801-5_4). [cit. 2024-05-06].
- [8] DAVIM, J. Paulo a JACKSON, Mark J., 2009. *Nano and Micromachining*. Online. ISTE. ISBN 978-1-84821-103-2. [cit. 2024-05-06].
- [9] IKUMAPAYI, O.M.; AKINLABI, E.T.; ADEOYE, A.O.M. a , S.O. Fatoba. Microfabrication and nanotechnology in manufacturing system – An overview. Online. S. 1154-1152. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.233>. [cit. 2024-05-06].
- [10] EL-HOFY, Hassan, 2018. *Fundamentals of machining processes - Conventional and Nonconventional Processes*. Online. CEC Press. ISBN 9780429443329. [cit. 2024-05-07].

- [11] *Průběh řezání vodním paprskem*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzba/rezani-vodnim-paprskem-46>. [cit. 2024-05-07].
- [12] B K, Shreyas; ARTIKGEYAN, S a B A, Sachin, November-2019. Selection of Non-Traditional Machining Process. Online. ISSN 2278-0181. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/337972869\\_Selection\\_of\\_Non-Traditional\\_Machining\\_Process](https://www.researchgate.net/publication/337972869_Selection_of_Non-Traditional_Machining_Process). [cit. 2024-05-07].
- [13] DZULAIKHA DAUD, Noor; NAZIBUL HASAN, Mohammed; SALEH CENG MIMECHE, Tanveer a SULTAN SULTAN MOHAMED ALI, Mohamed. Non-traditional machining techniques for silicon wafers. Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09365-z>. [cit. 2024-05-07].
- [14] SUGIOKA, Koji; MEUNIER, Michel a PIQUÉ, Alberto. Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification. Online. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10523-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10523-4_4). [cit. 2024-05-07].
- [15] PUROHIT, Gunjan. Overview of Lasers. Online. S. 1-11. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/348574808\\_Overview\\_of\\_Lasers](https://www.researchgate.net/publication/348574808_Overview_of_Lasers). [cit. 2024-05-07].
- [16] NOVÁK, Miroslav. *Základní princip laseru*. Online. In: . Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-ajejich-deleni-127>. [cit. 2024-05-07].
- [17] KANNATEY-ASIBU, Elijah, 6 January 2023n. 1. *Principles of Laser Materials Processing: Developments and Applications*. Online. John Wiley. ISBN 9781119881636. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119881636>. [cit. 2024-05-07].
- [18] LEONARDO TECHNOLOGY S.R.O. *Princip CO2 laseru*. Online. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>. [cit. 2024-05-07].
- [19] *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu: Diodové lasery*. Online. In: . Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>. [cit. 2024-05-07].
- [20] HECHT, Jeff. *FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art*. Online. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/test-measurement/spectroscopy/article/16549567/fiber-lasers-fiber-lasers-the-state-of-the-art>. [cit. 2024-05-07].

- [21] WU, Jia-Wen; GAO, Yu-Xin; LIN, Xu-Bin; LONG, Jin-Gan; CUI, Hu et al., 2021. Q-switched mode-locked multimode fiber laser based on a graphene-deposited multimode microfiber. Online. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/COL.19.121402>. [cit. 2024-05-07].
- [22] SRIN, K.S.; BATHE, Ramkumar a BATHE, Ravi N, 2023. *Nanomachining*. Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.111369>. [cit. 2024-05-07].
- [23] Whitehouse, D. J., & Whitehouse, D. J. (2011). *Handbook of surface and nanometrology* (2nd ed). Boca Raton: CRC Press.ta
- [24] KUBÁTOVÁ, Dana a MELICHAR, Martin. IMPACT ANALYSIS OF ROUGHNESS EVALUATION METHODS. Online. S. 1-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.062>. [cit. 2024-05-07].
- [25] *Měření drsnosti povrchu*. Online. In: . Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>. [cit. 2024-05-07]. (Obrázek 44 a 46)
- [26] O'NEILL, Benedict, 2024. *Measuring Surface Roughness*. Online. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/measuring-surface-roughness-a-comprehensive-guide>. [cit. 2024-05-07].
- [27] ČSN EN ISO 21920-1. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 1: Indikace struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2023.
- [28] ČSN EN ISO 21920-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 2023.
- [29] ČSN EN ISO 21920-3. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Profil - Část 3: Operátory specifikací. Praha: Český normalizační institut, 2023.
- [30] Meloun, M., & Militký, J. (2004). *Statistická analýza experimentálních dat* (Vyd. 2., upr. a rozš). Praha: Academia.
- [31] Pata, V., & Kubišová, M. (2018). *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

2D	Dvourozměrný prostor
3D	Trojrozměrný prostor
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	Největší výška profilu
Rp	Největší výška výstupku profilu
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu
$\bar{x}$	Aritmetický průměr (výběrového souboru)
s	Směrodatná odchylka (výběrového souboru)
$s^2$	Rozptyl (výběrového souboru)
$\lambda_s$	Vlnová délka vymežující povrch a drsnost
$\lambda_c$	Vlnová délka vymežující drsnost a vlnitost
$\lambda_f$	Vlnová délka vymežující povrch a vlnitost
Lr, lr	Základní délka
Ln, le	Vyhodnocovací délka
Lt, lt	Celková délka
EDM	Elektroerozivní obrábění
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění [2] .....	14
Obrázek 2 Tvorba nárůstku u kořene třísky [4] .....	15
Obrázek 3 Princip laserového řezání [5] .....	16
Obrázek 4 Rozdělení mikroobráběcích procesů [6] .....	19
Obrázek 5 Schéma mikro EDM [6] .....	20
Obrázek 6 Inkoustová tryska vyrobená metodou micro-EDM die sinking [6] .....	20
Obrázek 7 Různé typy bezmaskových (a, b) a průchozích masek (c, d) [6] .....	21
Obrázek 8 Princip elektrolytického obtékání [6] .....	22
Obrázek 9 Molekulární dynamika procesu nanometrického obrábění [8] .....	24
Obrázek 10 Princip elektrostatického indukčního generátoru pulzů [9] .....	25
Obrázek 11 Princip metody USM [4] .....	28
Obrázek 12 Schéma zařízení USM [4] .....	29
Obrázek 13 Schéma technologie AWJM [4] .....	30
Obrázek 14 Průběh řezání vodním paprskem [11] .....	31
Obrázek 15 Schéma technologie MAF [6] .....	32
Obrázek 16 Schéma technologie ECM [4] .....	34
Obrázek 17 Schéma pro proces chemického obrábění [4] .....	35
Obrázek 18 Princip chemického obrábění [2] .....	35
Obrázek 19 Schéma Fotochemického obrábění [2] .....	36
Obrázek 20 Elektrojiskrové hloubení [4] .....	38
Obrázek 21 Schéma principu hloubení [4] .....	39
Obrázek 22 Proces řezání plazmou a schéma plazmového hořáku [4] .....	40
Obrázek 23 Schéma procesu EBM [2] .....	41
Obrázek 24 Mechanismus dopadu elektronů na povrch [2] .....	42
Obrázek 25 Schéma systému frézování iontovým svazkem [13] .....	43
Obrázek 26 Základní schéma laseru [16] .....	45
Obrázek 27 Stimulovaná emise – zesílení světla [16] .....	46
Obrázek 28 Princip laseru [16] .....	46
Obrázek 29 Profil paprsku [15] .....	48
Obrázek 30 Pracovní schéma rubínového laseru [17] .....	50
Obrázek 31 Schematický popis rubínového laseru [16] .....	50
Obrázek 32 Schéma Nd:YAG laseru [17] .....	51
Obrázek 33 Schéma CO <sub>2</sub> laseru [18] .....	53
Obrázek 34 Tvorba paprsku [18] .....	54

Obrázek 35 Organické barvivo u kapalinových laserů [17] .....	55
Obrázek 36 Princip diodového laseru [19] .....	56
Obrázek 37 Princip vláknového laseru [19].....	57
Obrázek 38 Princip aktivního vlákna [19] .....	58
Obrázek 39 Působení dopadajících částic na povrch (a) a odražených od povrchu (b) [17] .....	62
Obrázek 40 Schéma působení laserového paprsku na materiál [17] .....	64
Obrázek 41 Mikroskopický pohled na šířku mikrodrážky při různém počtu průchodů [22] .....	65
Obrázek 42 Snímek nanostruktur zaměřených laserem pomocí mikroskopu atomárních sil [22].....	66
Obrázek 43 Měření drsnosti [24] .....	68
Obrázek 44 Schéma kontaktního snímání povrchu [25] .....	69
Obrázek 45 Základní schéma interferometrie v bílém světle [26].....	70
Obrázek 46 Schéma CLA snímače [25].....	70
Obrázek 47 Schéma principu digitální holografické mikroskopie [26] .....	71
Obrázek 48 Tvar povrchu [28].....	72
Obrázek 49 Vlnitost povrchu [28] .....	72
Obrázek 50 Drsnost povrchu [28] .....	73
Obrázek 51 Čára profilu napříč skin modelem [28] .....	73
Obrázek 52 Mechanický povrch [28].....	74
Obrázek 53 Mechanický profil .....	75
Obrázek 54 Vztah mezi S,L a F operací [28].....	76
Obrázek 55 Definice primárního povrchu a profilu primárního povrchu [28] .....	77
Obrázek 56 Výška výstupku a hloubka prohlubně (referenční čára) [28] .....	79
Obrázek 57 Parametry výšek profilu [28].....	80
Obrázek 58 Materiálová délka [28] .....	81
Obrázek 59 Křivka materiálového poměru pro R-profil [28].....	81
Obrázek 60 Zkoumané materiály a popis nastavení laseru pro jednotlivá pole .....	85
Obrázek 61 Vláknový laser Sauer -Lasertec 80 Shape .....	88
Obrázek 62 Detail při obrábění vzorku Hliníku .....	89
Obrázek 63 Ukázka softwaru pro povrch o padesáti řezech.....	90
Obrázek 64 Detail vizuální kontroly mikroskopem .....	91
Obrázek 65 Foto vzorků po obrobení při nastavení laseru 5-5, viz. Tabulka 2 .....	91
Obrázek 66 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro ocel 12 024.....	93
Obrázek 67 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro ocel 12 024.....	93

Obrázek 68 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra materiálu 12 024 a nastavení laseru 1-1 .....	96
Obrázek 69 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Rz materiálu 12 024 a nastavení laseru 1-1 .....	97
Obrázek 70 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820.....	98
Obrázek 71 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro ocel 19 820.....	98
Obrázek 72 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Ra materiálu 19 820 a nastavení laseru 1-1 .....	101
Obrázek 73 Grubbsův test odlehlých hodnot pro parametr Rz materiálu 19 820 a nastavení laseru 1-1 .....	101
Obrázek 74 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Hliník .....	103
Obrázek 75 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Hliník .....	103
Obrázek 76 Grubbsův test odlehlých hodnot parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Hliník .....	106
Obrázek 77 Grubbsův test odlehlých hodnot parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Hliník .....	106
Obrázek 78 Grafický souhrn dat parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz.....	107
Obrázek 79 Grafický souhrn dat parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz.....	108
Obrázek 80 Grubbsův test odlehlých hodnot parametru Ra a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz .....	110
Obrázek 81 Grubbsův test odlehlých hodnot parametru Rz a nastavení laseru 1-1 pro Mosaz .....	111
Obrázek 82 Porovnání histogramů parametru Ra mezi materiály při nastavení laseru 1-1 .....	112
Obrázek 83 Graf podobnosti rozptylů mezi materiály pro parametr Ra při nastavení laseru 1-1 .....	114
Obrázek 84 Intervalové porovnání parametrů Ra mezi materiály .....	116
Obrázek 85 Podobnost středních hodnot parametrů Ra mezi materiály metodou ANOVA .....	116
Obrázek 86 Dendrogram pro vyhodnocení analýzu shluků parametru Ra .....	120
Obrázek 87 Porovnání histogramů parametru Rz mezi materiály při nastavení laseru 1-1 .....	123
Obrázek 88 Porovnání Gaussovských rozdělení parametrů Ra a Rz mezi materiály .....	124
Obrázek 89 Graf porovnání rozptylů mezi materiály pro parametr Rz při nastavení laseru 1-1.....	126
Obrázek 90 Intervalové porovnání parametrů Rz mezi materiály .....	128
Obrázek 91 Podobnost středních hodnot parametrů Rz mezi materiály metodou ANOVA .....	128
Obrázek 92 Dendrogram pro vyhodnocení analýzu shluků parametru Rz .....	132

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Hlavní rozdíly mezi metodami konvenčního a nekonvenčního obrábění [3,4] ..	17
Tabulka 2 Charakteristické parametry nastavení laseru .....	85
Tabulka 3 Chemické složení konstrukční oceli 12 024 .....	86
Tabulka 4 Chemické složení rychlořezné oceli 19 820 .....	87
Tabulka 5 Chemické složení mosazi.....	87
Tabulka 6 Chemické složení čistého hliníku .....	87
Tabulka 7 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro materiál ocel 12 024 .....	94
Tabulka 8 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro materiál ocel 19 820 .....	99
Tabulka 9 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro materiál Al .....	104
Tabulka 10 Hodnoty Ra a Rz a kontrola splnění AD testu normality pro Mosaz .....	109
Tabulka 11 Mezimateriálové srovnání středních hodnot parametru Ra a zkoumání vlivu nastavení laseru .....	118
Tabulka 12 Mezimateriálové srovnání středních hodnot parametru Rz a zkoumání vlivu nastavení laseru .....	130