



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MĚŘENÍ DRSNOSTI ŘEZNÝCH HRAN**  
**PŘI LASEROVÉM DĚLENÍ KOVŮ**  
MEASUREMENT OF ROUGHNESS OF THE LASER CUTTING EDGE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MILAN POKORÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.**

BRNO 2012

## **ABSTRAKT**

POKORÁK Milan: Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů.

---

Práce se primárně zabývá laserovým dělením materiálu a následným vyhodnocením drsností řezných hran. Je rozdělena na dvě části, teoretickou a praktickou, které na sebe částečně navazují.

Teoretická část je orientována na seznámení se s laserem a základy měření drsnosti. Obsahuje historii laseru, jeho konstrukci a fyzikální princip. Dále se zabývá popisem jednotlivých typů laserů a laserových technologií. Důležitou kapitolou je pak struktura povrchu, ve které jsou uvedeny základní pojmy a techniky měření drsnosti.

Praktická část je zaměřena na porovnání drsnosti řezných hran, které byly změřeny na vzorcích oceli S235JR, s hodnotami udávanými v normě ČSN EN ISO 9013. V této části jsou uvedeny výsledky měření a je zde také popsán měřený materiál, použité stroje a přístroje.

Celkové vyhodnocení praktického měření je uvedeno v kapitole zhodnocení výsledků experimentu.

**Klíčová slova:** Laser, laserové technologie, laserové řezání, struktura povrchu, měření drsnosti, ocel S235JR.

## **ABSTRACT**

POKORÁK Milan: Measurement of roughness of the laser cutting edge.

---

This thesis primarily deals with the laser material cutting and with the subsequent evaluation of roughness of the cutting edges. The thesis is divided in two parts, the theoretical part followed by the practical one.

The theoretical section is concerned with the introduction to laser technology and with the basics of roughness measurement. It contains the history of laser, its construction and its physical principle. It also deals with the description of laser types and laser technologies. An important part is about the surface texture, which includes basic terms and methods of roughness measurement.

The practical section is concerned with the comparison of roughness of the cutting edges. They were measured on S235JR steel samples with the value declared in ČSN EN ISO 9013 standard. This part contains the measurement results, the measured material and also machines and devices used.

The overall evaluation of the practical measurement is mentioned in the final experiment outcome evaluation.

**Keywords:** Laser, laser technology, laser cutting, surface texture, measuring of surface roughness, S235JR steel.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POKORÁK, Milan. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Brno, 2012. 49s. Bakalářská práce. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 1. 5. 2012

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za poskytnuté materiály a přípravu potřebných vzorků k měření. Dále také děkuji za vedení, vstřícný přístup a cenné připomínky, které mi poskytoval v průběhu psaní této práce.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD.....	9
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
1. <b>LASER.....</b>	<b>11</b>
1.1 Historie laseru.....	11
1.2 Konstrukce laseru .....	12
1.3 Fyzikální princip laseru .....	14
1.4 Vlastnosti laserového paprsku .....	15
1.5 Rozdělení laserů .....	17
1.6 Podíl laserů na trhu .....	23
2. <b>LASEROVÉ TECHNOLOGIE.....</b>	<b>24</b>
2.1 Svařování laserem.....	25
2.2 Vrtání laserem.....	26
2.3 Značení a popisování laserem.....	26
2.4 Gravírování laserem .....	27
2.5 Leštění povrchu laserem .....	28
2.6 Nanášení ochranných povlaků laserem .....	28
2.7 Řezání laserem.....	29
3. <b>STRUKTURA POVRCHU.....</b>	<b>34</b>
<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>39</b>
4. <b>CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE.....</b>	<b>40</b>
5. <b>POUŽITÝ MATERIÁL.....</b>	<b>40</b>
6. <b>POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE .....</b>	<b>40</b>
6.1 Laserové řezné centrum .....	40
6.2 Zařízení na měření drsnosti .....	42
6.3 Posuvné měřítko .....	42
7. <b>POPIS MĚŘENÍ.....</b>	<b>43</b>
8. <b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>44</b>
8.1 Průměrná výška prvků profilu dle normy .....	44
8.2 Vlastní výsledky .....	45
9. <b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU .....</b>	<b>48</b>
10. <b>ZÁVĚR.....</b>	<b>49</b>

Seznam použité literatury a použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

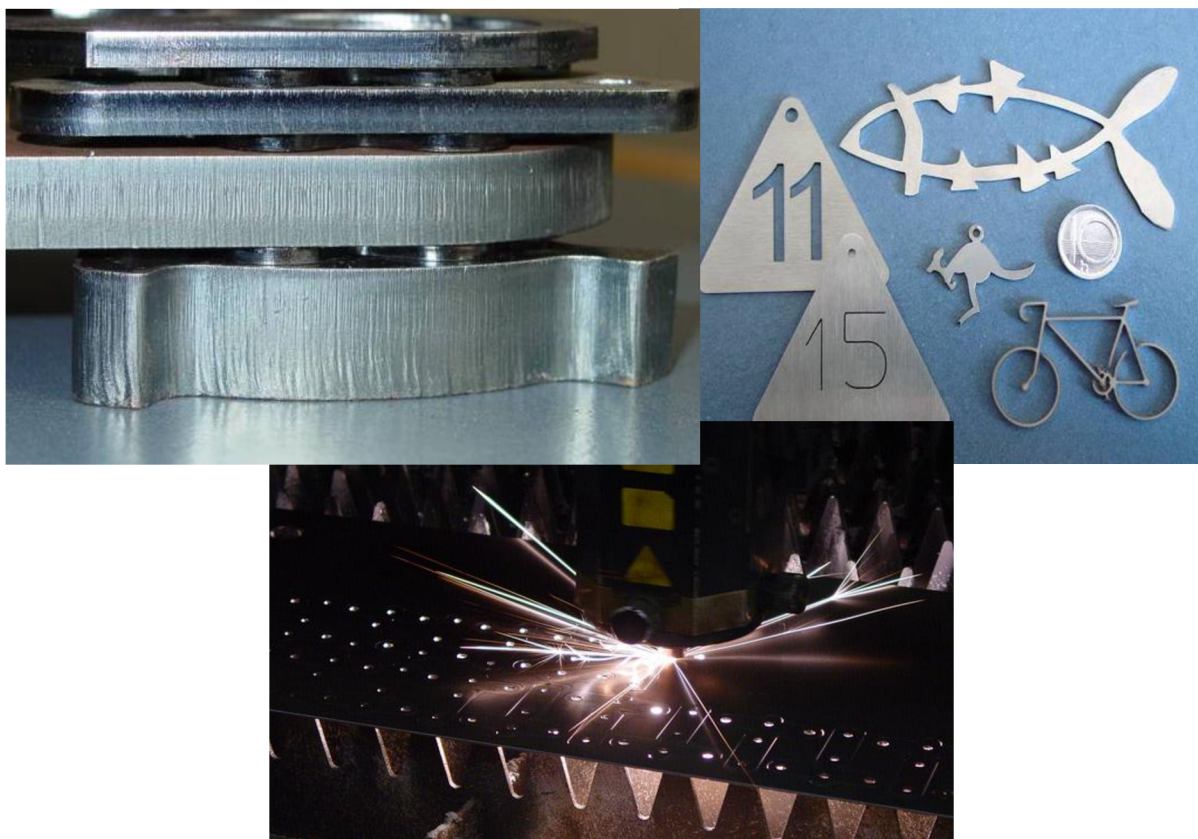
## ÚVOD [10], [13], [17], [39]

Laser se za padesát let své existence stal nedílnou součástí našeho života. Předměty při jejichž výrobě byl použit laser, nás doprovází téměř na každém kroku. Můžeme se s ním setkat v mnoha oborech lidské činnosti. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, chemii, biologii, energetice, astronomii, automatizaci, výpočetní technice a mnoha dalších. V neposlední řadě se laser využívá ve strojírenské výrobě a to především ke svařování, vrtání, gravírování, značení, metody rapid prototyping, tepelnému zpracování a řezání.

Laser má velkou budoucnost především díky neustále vzrůstajícím nárokům na výrobu. Konstrukteři i zákazníci mají stále větší požadavky na přesnost výroby, tvarovou složitost a v neposlední řadě i na materiály obráběného kusu. Technologie a ekonomika výroby si naopak žádá snižování strojních časů a úsporu nákladů na výrobu. Z těchto důvodů již pomalu přestávají stačit klasické konvenční technologie a jsou čím dál častěji nahrazovány technologiemi nekonvenčními.

Nekonvenční technologie, mezi které se řadí i právě zmiňovaný laser, jsou vyvíjeny s nejlepší možnou provázaností se systémy CAD/CAM. Obrábění těmito technologiemi se od klasického obrábění liší především v principu úběru materiálu. Většinou se jedná o bezsilové působení na obrobek, bez vzniku třísek.

V dnešní době se pro dělení materiálu využívá řada různých jak konvenčních, tak i nekonvenčních technologií. Laserové řezání si ovšem nezadržitelně buduje svou pozici na trhu. Tuto technologii můžeme dále rozdělit na laserové řezání tavné, oxidační, sublimační a laserové řezání s podporou vzduchu. Příklady laserových výpalků, dosažitelnou kvalitu řezu a řezací hlavice [10].



Obr. 1 Příklady výpalků, kvality řezu a řezací hlavice [10].

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**



# 1. LASER

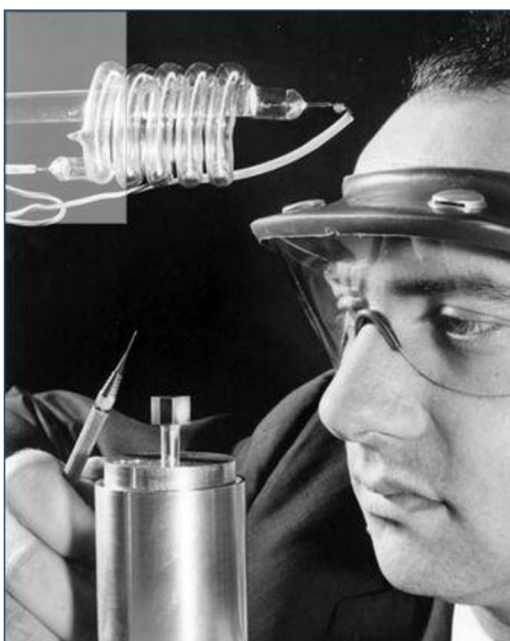
## 1.1 Historie laseru [13], [17], [19], [20], [21], [37]

Sestrojení prvního laserového zařízení předcházela dlouhá cesta. Jako první se o světelný paprsek začali zajímat již staří Řekové. Znalosti opodstatnění světla však zůstávaly dlouhá staletí neměnné. Větší pohyb kupředu nastal až v 17. století, kdy Isaac Newton rozložil pomocí skleněného hranolu bílé světlo na spektrum barev. Newton se dále domníval, že světlo má částicový charakter. V té samé době však Christian Huyghes tvrdil, že podstatou světla je vlnění. Tento spor se rozhodl téměř o tři století později. Na začátku 20. století přišel se svojí hypotézou Max Planck a potvrdil, že Newton i Huyghes měli pravdu. Planck byl přesvědčen, že světlo je tvořeno malými částicemi energie tzv. kvanty. Svými pokusy následně zjistil, že energetické kvantum je úměrné frekvenci záření, nebo jeho vlnové délce. Stal se zakladatelem kvantové teorie a jeho vyzařovací zákon byl začátkem objevu laseru.

Historie laseru se začíná psát v roce 1917, kdy Albert Einstein předpovídá, že kromě spontánní emise a absorpce musí existovat ještě další jev, kterým je stimulovaná emise. Roku 1939 využívá tyto poznatky ruský fyzik Valentin Aleksandrovich Fabrikant a zesiluje elektromagnetické záření procházející prostředím pomocí stimulované emise.

V roce 1951 byl vynalezen a dva roky na to i zkonstruován první předchůdce laseru. Byl jím maser, který na Columbijské Univerzitě sestavili Charles H. Townes, James P. Gordon a Herbert J. Zeiger. Maser funguje na stejném principu jako laser, ale generuje mikrovlnné záření. Zkonstruování maseru vedlo ke vzniku nového vědního oboru – kvantové elektroniky.

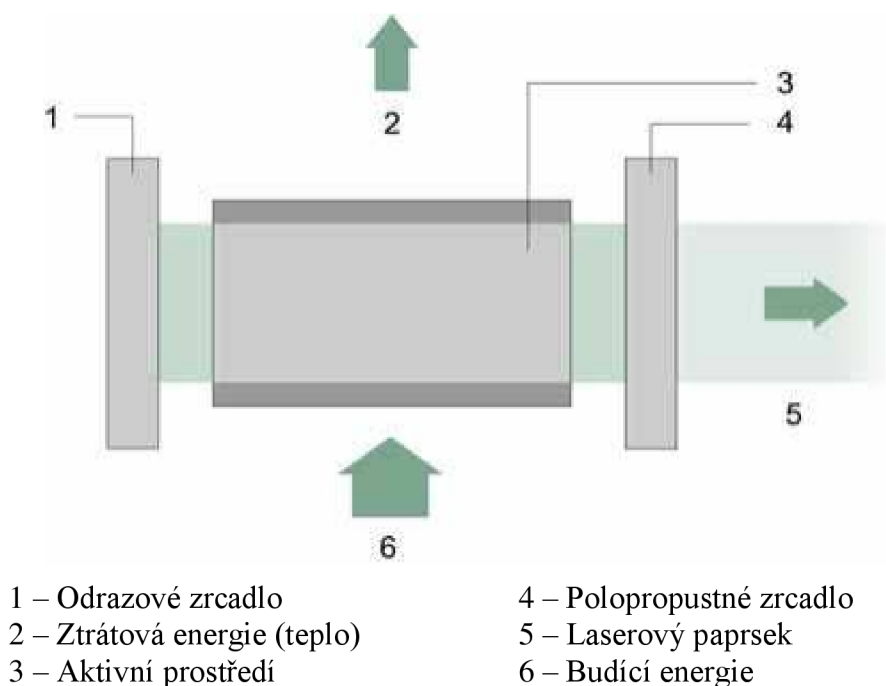
V průběhu šesti let od realizace maseru proběhlo velké množství pokusů a vědci přišli s novými poznatky, které byly následně použity pro konstrukci prvního laseru. 16. května 1960 Theodore Maiman (obr. 2), C. K. Asawa a I. J. D'Haenens vyrobili a zprovoznili první laser, jehož aktivním prostředím byl krystal rubínu. O dva roky později byl sestrojen první polovodičový laser a v roce 1963 pak Kumar N. Patel vynalezl plynový CO<sub>2</sub> laser. Od roku 1960 se však nevyvíjely jen nové typy laserů, ale nastal i velký vývoj laserových technologií. V České republice se v roce 1963 objevil jako první neodymový skleněný laser a byl umístěn ve fyzikálním ústavu ČSAV.



Obr. 2 Theodore Maiman s prvním rubínovým laserem [20].

## 1.2 Konstrukce laseru [13], [17], [35], [33], [36]

Existuje mnoho typů laserů, které se liší, jak komponenty ze kterých jsou složeny, tak i principem, kterým je vyvolána stimulovaná emise. Ve většině případů se ovšem setkáváme s lasery, jejichž konstrukce je shodná s konstrukcí na obr. 3 a princip je stejný jako na obr. 4.



Obr. 3 Základní komponenty laseru [35].

**Aktivní prostředí:** Nejdůležitější část laseru, tvoří jej pevná, kapalná, nebo plynná látka, ve které vzniká stimulovaná emise. Tato látka bývá nejčastěji umístěna ve skleněné, nebo plastové trubici. Musí obsahovat více atomů na vyšších energetických hladinách, které následně mohou emitovat až dvojnásobnou světelnou energii.

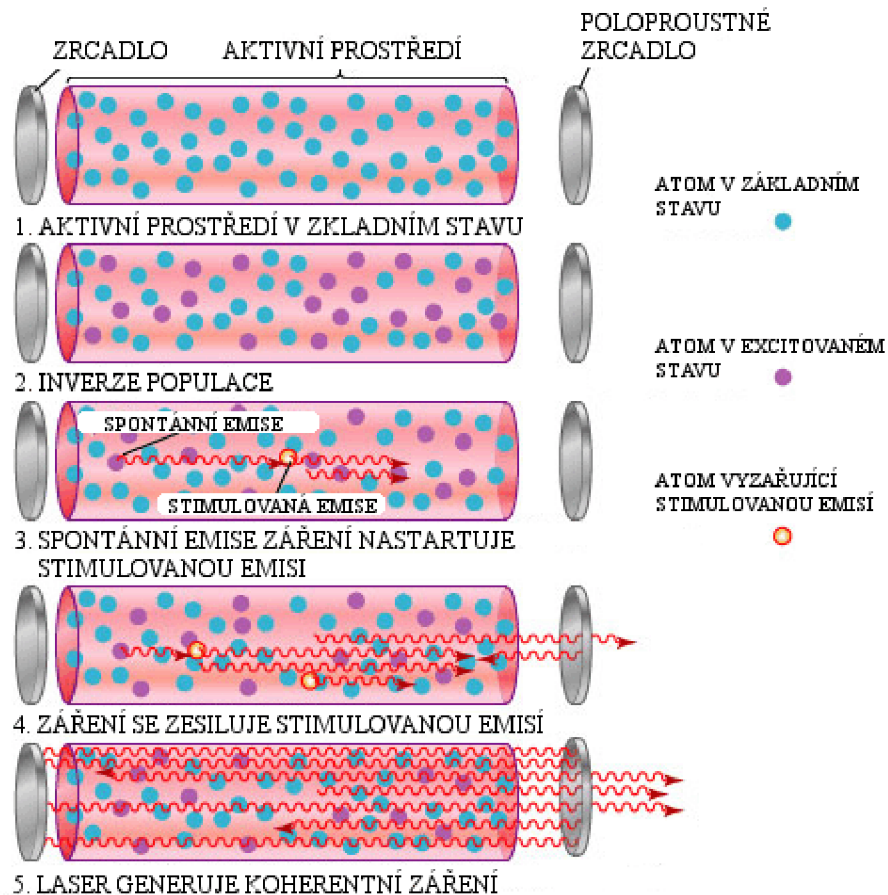
Jako aktivní prostředí se používá:

- monokrystal
- polovodič s PN přechodem
- plyn
- organická barviva
- volné elektrony
- polovodičové multivrstvy.

**Optický rezonátor:** Je to prostor, ve kterém se vyskytuje aktivní látka. Je ohraničen dvěma zrcadly, z nichž jedno je odrazové a jedno polopropustné. Zrcadla mohou být rovinná, ale ve většině případů se používají zrcadla konvexní, nebo konkávní. Odrazové zrcadlo bývá většinou zrcadlo dielektrické, nebo se používá leštěný kov, především zlato. Polopropustné zrcadlo je sklo pokryté tenkou vrstvou kovu. Zajišťuje, aby foton zůstal v aktivním prostředí delší dobu a ven z rezonátoru vyšel až ve chvíli, kdy má dostatečnou energii. Ne všechny fotony letí s osou rovnoběžnou s osou laseru. Tyto fotony po několika odrazech opustí prostor rezonátoru. Fotony, které ovšem letí po dráze, která je rovnoběžná s osou rezonátoru

se začnou odrážet mezi zrcadly a nabalovat na sebe další. Počet takto letících fotonů v laseru roste exponenciálně a po chvíli špatně letící fotony buď vymizí úplně, nebo bude jejich počet minimální.

Měděné, nebo dusíkové lasery, pracují superradiačně. To znamená, že paprsek získá dostatečnou intenzitu již při prvním průchodu aktivním prostředím. Tyto lasery tedy nepotřebují rezonátor.



Obr. 4 Základní princip laseru [16].

**Budící zařízení:** K tomu, aby se mohly elektrony v aktivním prostředí přesouvat z energeticky nižší hladiny do hladiny energeticky vyšší, je nutno dodat těmto elektronům energii. Jako budící zařízení se dnes používá světlo, ultrazvuk, svazek elektronů, elektrický proud nebo chemická reakce.

**Chladicí systém:** Chlazení musí být především aktivní prostředí, protože velká část energie dodaná do systému se přemění na teplo. Chlazení je důležité zejména kvůli zvýšení životnosti celého systému a zabezpečuje také správnou funkci laseru. Jako chladicí médium se nejčastěji používá voda. U některých laserů vzduch a u laserů s malým výkonem se aktivní prostředí chladí pouze pasivně.

**Další komponenty:**

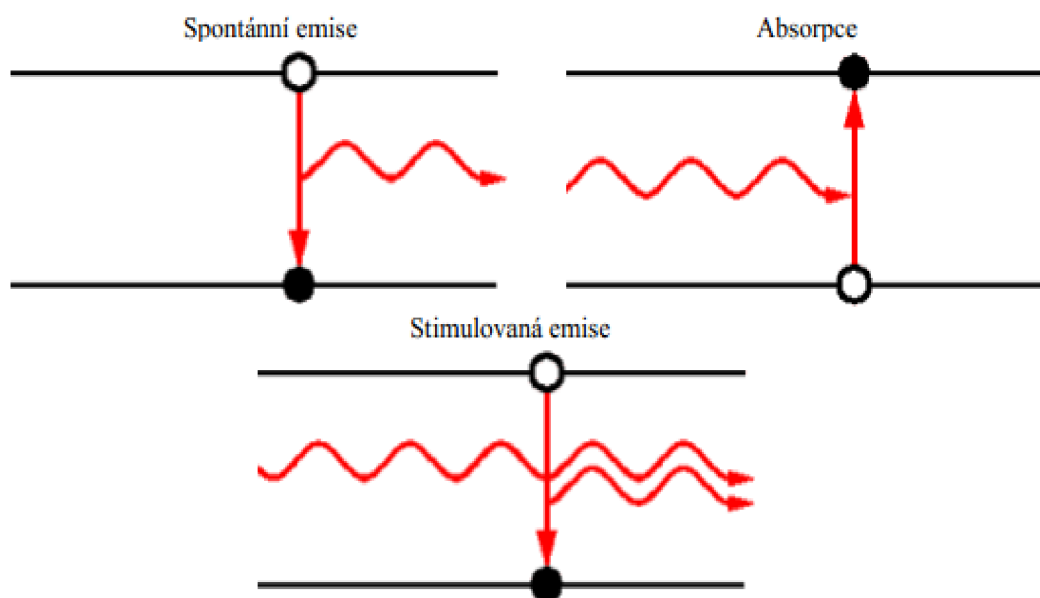
- měřič výkonu
- kalibrační zařízení
- nelineární krystal měnící vlnovou délku

### 1.3 Fyzikální princip laseru [14], [16], [17], [19], [32], [33], [35], [36]

Název laser vychází z počátečních písmen anglických slov, která popisují jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Přeloženo do češtiny: Světlo zesílené stimulovanou emisí záření. Především ve vědeckých kruzích se pak používá název kvantový generátor světla. Z názvu je patrné, že laser vydává světlo, které má oproti běžnému světlu jisté specifické znaky, kterými jsou jednobarevnost, uspořádanost, malá rozbíhavost, apod.

Pro funkčnost laserového zařízení je nezbytně nutné, aby aktivní prostředí obsahovalo element, který se může nacházet jak v základním stavu s nižší energií, tak i ve stavu excitovaném, tedy ve stavu s energií vyšší. Pokud aktivní prostředí takový element obsahuje, pak při vzájemné interakci se světlem mohou nastat tři druhy dějů (obr. 5):

- **Absorpce světla:** Dochází k pohlcování dopadajících fotonů a k přechodu atomů na vyšší energetickou hladinu.
- **Spontánní emise světla:** Dochází k samovolnému přechodu elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší. Při tomto přechodu dochází k vyzáření fotonu. Tento děj probíhá jako přirozený přechod atomu do stavu s nižší energií a není tudíž vyvolán žádným vnějším působením.
- **Stimulovaná emise světla:** Na tomto ději je založen princip laseru. Jedná se vlastně o vyvolání přechodu atomu z vyšší energetické hladiny na nižší, působením elektromagnetického pole. Přechod je vyvolán fotonem dopadajícím na atom. Tento foton ovšem nezaniká, ale pokračuje ve stejném směru společně s fotonem vzniklým při emisi. Také dochází k synchronizaci, fotony mají stejnou fázi, frekvenci i rychlost a díky tomu vzniká koherentní záření.



Obr. 5 Fyzikální procesy v pracovní látce [17].

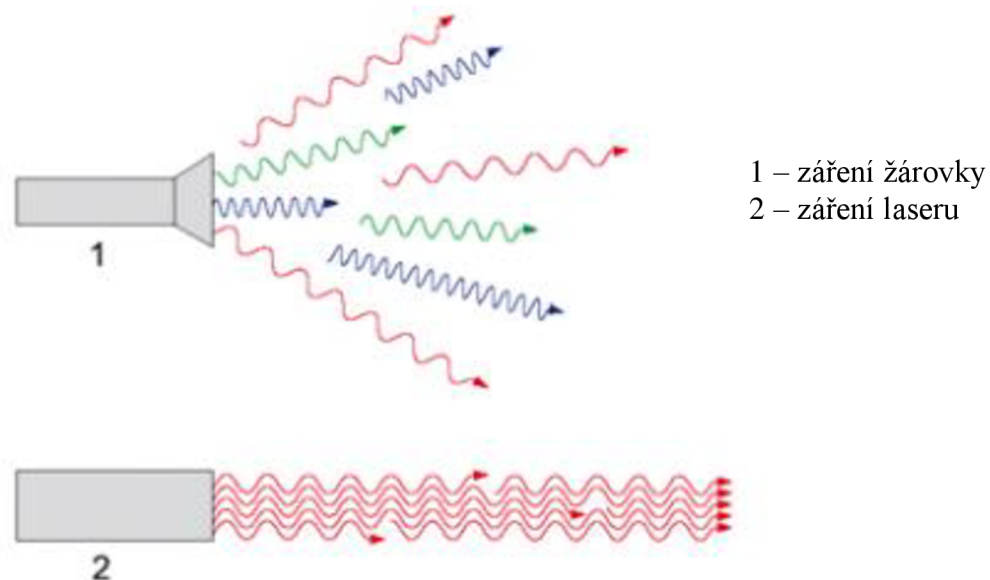
Z popisu stimulované emise plyne, že pro funkčnost laseru je nutné do systému přivést energii. Může jí představovat například výbojka. Pomocí této energie jsou vybudeny atomy aktivního média ze základní energetické hladiny do vyšší. Tento jev se nazývá excitace.

Následujícím jevem je tzv. inverze populace, což je okamžik, kdy se většina atomů v aktivním prostředí nachází na energeticky vyšší hladině a soustava tudíž neodpovídá rovnovážnému rozdělení. Tento stav je již příznivý pro vznik stimulované emise.

Stimulovaná emise je nadále podporována umístěním aktivního média do rezonátoru. Dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů až do chvíle, kdy paprsek dosáhne takové intenzity, že je schopen rezonátor opustit.

## 1.4 Vlastnosti laserového paprsku [13], [17], [19], [35], [36], [39]

Světlo, které vyzařují běžné zdroje, jako je například slunce, oheň, nebo žárovka je tvořeno všemi vlnovými délkami a je rozptylováno do prostoru všemi směry. Oproti tomu světlo laserové má přesně definovanou jednu vlnovou délku, je velmi málo rozbíhavé. Tento jev je zobrazen na obr. 6.



Obr. 6 Typy záření [35].

**Mezi nejdůležitější vlastnosti laserového paprsku patří:**

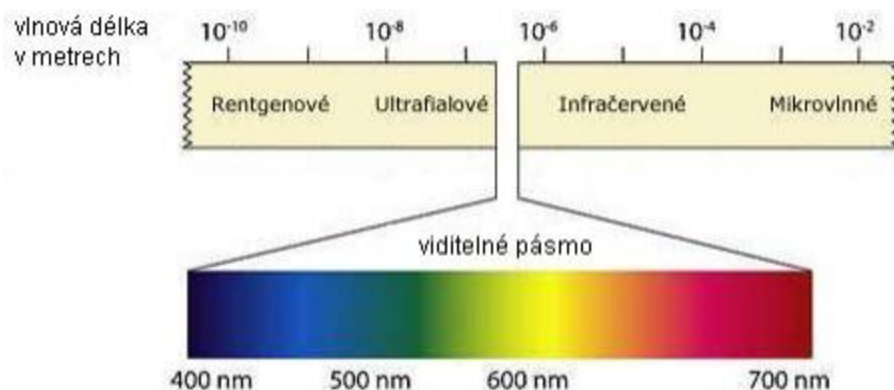
**Koherentnost:** Vlnění o stejné frekvenci, směru kmitání a s identickou fází, popřípadě fázovým rozdílem.

**Monochromaticnost:** Světlo, které je tvořeno pouze jednou barvou, tzn. záření s pouze jednou vlnovou délkou.

**Směrovost:** Fotony mají stejný směr a jejich dráhy jsou téměř rovnoběžné. Proto lze laserový paprsek nasměrovat přesně do daného místa, kde je třeba koncentrovat energii.

**Vlnová délka:** Je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které při vlnění kmitají ve fázi. Udává se v nanometrech a určuje, v jaké oblasti spektra (obr. 7) se bude paprsek pohybovat a jak velká bude velikost jeho stopy. Dle vlnové délky dělíme lasery na:

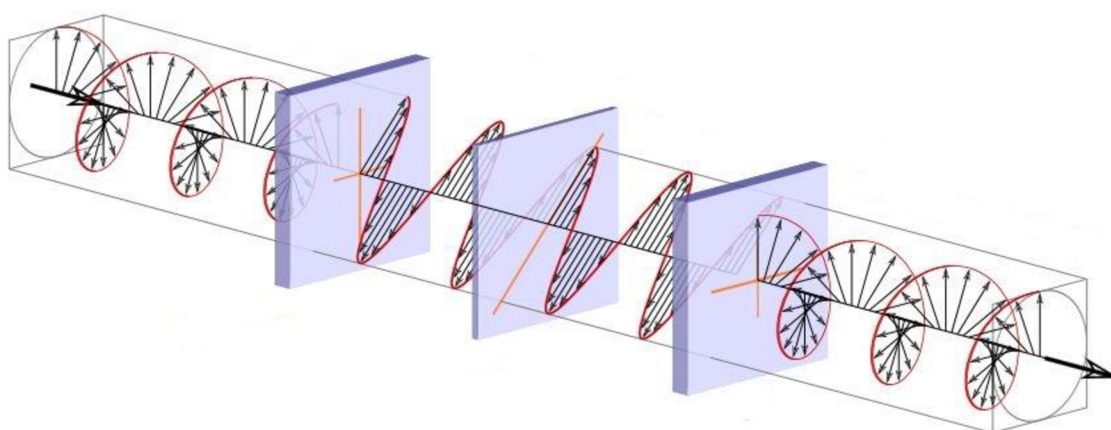
- ultrafialové lasery – vlnová délka nepřesahuje 380 nm
- viditelné lasery – vlnová délka se pohybuje od 380 do 630 nm
- infračervené lasery – vlnová délka je vyšší než 630 nm



Obr. 7 Světelné spektrum [39].

**Polarizace:** Důvod polarizování paprsku je nejvíce patrný na příkladu řezání laserovým paprskem. V případě kruhové polarizace paprsku nezáleží na směru řezání, což je ve strojírenské praxi velmi žádoucí. Oproti tomu, pokud je materiál řezán paprskem polarizovaným lineárně, je možné dosáhnout vyšších řezných rychlostí. Pokud ovšem směr řezání nebude totožný s polarizací vlnění, budou se tvořit ořepy a řez nebude kvalitní. Schéma polarizace je zobrazeno na obr. 8.

Laserový paprsek je polarizován při výstupu z laseru. Směr polarizace je určen směrem zbroušení Brewsterova skla, které se nachází na výstupu svazku z rezonátoru.



Obr. 8 Polarizace světla [19].

## 1.5 Rozdělení laserů [9], [11], [13], [15], [16], [17], [19], [27], [35], [37], [39]

Lasery můžeme dělit podle mnoha kritérií, mezi základní patří dělení podle:

- skupenství aktivního prostředí (tab. 1)
- vlnové délky optického záření
- počtu energetických hladin
- buzení aktivního prostředí
- režimu provozu
- použití
- výkonu

Tab. 1 Rozdělení laserů podle skupenství aktivního prostředí

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
<b>Pevnolátkové</b>				
Rubínový laser	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Cr <sup>3+</sup>	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd: YAG laser	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Nd <sup>3+</sup>	1 064,1 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho: YAG laser	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ho <sup>3+</sup>	2 100 nm	IR	chirurgie, stomatologie
Er: YAG laser	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Er <sup>3+</sup>	1 560 nm a 2 940 nm	IR	dálkoměry, chirurgie, stomatologie
Yb: YAG laser	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Yb <sup>3+</sup>	1029 nm	IR	strojírenství, svařování, řezání
Titan - safírový laser	Ti, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	690 nm - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový laser	Al <sub>2</sub> BeO <sub>4</sub> :Cr <sup>3+</sup>	700 nm - 818 nm	červená, IR	žihání, řezání
Neodymový laser	SiO <sub>2</sub> :Nd <sub>2</sub> O <sub>5</sub> nebo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :Nd <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1 062,3 nm	červená, IR	vysoce-energetické pulzní systémy
Nd: YLF laser	LiYF <sub>4</sub>	1053 nm	červená, IR	průmyslové aplikace, lékařství
<b>Plynové - atomární</b>				
He - Ne laser	He, Ne	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	Cu	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	I	342 nm, 612 nm, 1 315 nm	UV, viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
Xenonový laser	Xe, Ne, He	140 vlnových délek	viditelné, IR	

<b>Plynové - iontové</b>				
Argonový laser	Ar	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Hélium - kadmiový laser	He, Cd	325 nm, 442 nm	UV, modrá	
<b>Plynové - molekulární</b>				
Vodíkový laser	H <sub>2</sub>	100 - 120 nm, 140 - 165 nm	UV	
CO <sub>2</sub> laser	CO <sub>2</sub>	10 600 nm	IR	sváření, řezání, stomatologie, gravírování
CO laser	CO	5 000 - 6 500 nm	IR	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie
Dusíkový laser	N <sub>2</sub>	337 nm	UV	
HF laser	HF	2700 nm	IR	
H <sub>2</sub> O laser	H <sub>2</sub> O	118 600 nm, 220 200 nm	UV	
HCN laser	HCN	331 000 nm, 337 000 nm	UV	
<b>Kapalinové</b>				
Rhodamin 6G laser	C <sub>28</sub> H <sub>31</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Cl	570 - 650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	C <sub>9</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie
Polovodičové				
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, laserové tiskárny
GaAlAs laser	GaAlAs	670 - 830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	blu - ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630 - 685 nm	červená	lékařství

### 1.5.1. Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím pevnolátkového laseru je krystalická, nebo amorfni látka, která je opticky propustná. Tato látka má obvykle tvar tyčky, která musí být dokonale vyleštěna a je vkládána do rezonátoru.



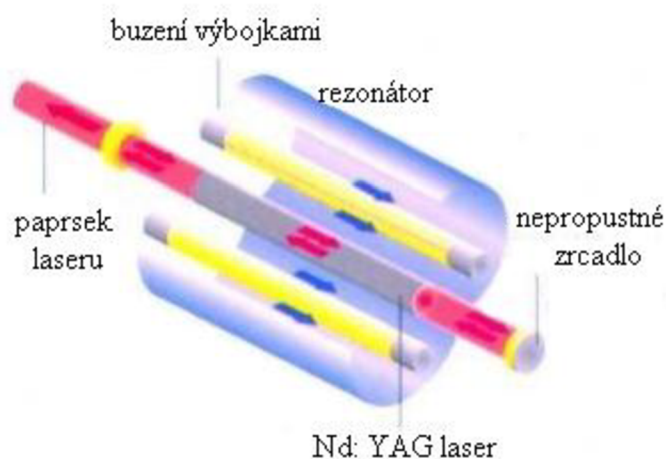
Lasery s pevnolátkovým aktivním prostředím jsou schopny práce v různých režimech a za různých provozních podmínek. Pracují obvykle v oblasti infračerveného až viditelného světla. Snadno se udržují a jejich výkony běžně dosahují 10 kW.

Nejběžnější pevnolátkové lasery jsou:

**Nd: YAG laser:** Nejpoužívanější pevnolátkový laser, jehož aktivním prostředím je krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný ionty neodymu. Schéma je zobrazeno na obr. 9. Buzení je realizováno pomocí výbojky, která je v poslední době nahrazována diodou. Ta má v porovnání s výbojkou větší účinnost, menší spotřebu elektrické energie, menší provozní náklady a v neposlední řadě delší trvanlivost. I po zvýšení účinnosti použitím diody se však Nd: YAG laser pohybuje mezi 5 až 10%, z čehož plyne, že účinnost je velmi malá. Tento typ laseru je také velmi náročný na chlazení.

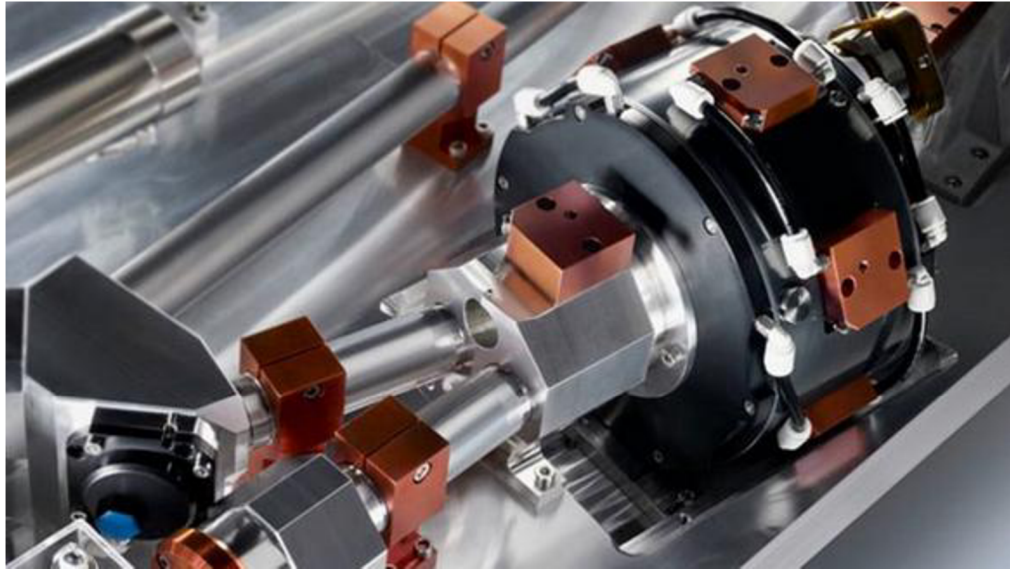
Vlnová délka je 1064,1 nm, je také možné emitovat vlnové délky 940, 1120, 1320 a 1440 nm. Maximální výkon dosahuje několika stovek W. Paprsek Nd: YAG laseru je možné vést optickým vláknem, což je předpokladem pro použití v automatizované výrobě.

Nd: YAG laser se používá především ve strojírenství a to při vrtání, svařování, řezání, žihání, značkování. Dále je hojně zastoupen i v medicíně.



Obr. 9 Konstrukce Nd: YAG laseru [27].

**Diskový laser:** Princip je stejný jako u Nd: YAG laseru s tím rozdílem, že aktivní krystal nemá tvar válce, ale tenkého disku, což je vidět na obr. 10. Disk má tloušťku řádově několik desetin milimetru a průměr až 100 milimetrů. Vlnová délka je 1070 nm a buzení je prováděno pomocí laserové diody. Diskový laser dosahuje dobré kvality výstupního svazku, která se zvyšujícím se výkonem neklesá. Výkon se pohybuje od 1 kW do 16 kW. Díky vysokému výkonu se používá především pro svařování a řezání kovů.



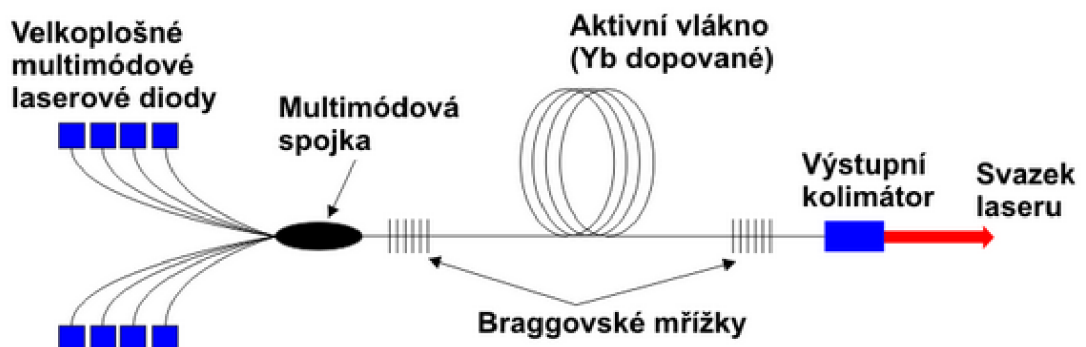
Obr. 10 Diskový laser [16].

**Rubínový laser:** Nejstarší druh laseru, jehož aktivním prostředím je krystal  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Vlnová délka je 694,3 nm. Využívá se k vrtání děr do tvrdých materiálů, v medicíně a k laserové lokaci družic. Nevýhodou je velký čerpací výkon. V dnešní době je nahrazován novějšími typy pevnolátkových laserů.

**Vláknový laser:** Nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Využívá optického vlákna nejen pro přenos paprsku, ale přímo pro jeho generování. Aktivní prostředí je tedy optické vlákno dopované nejčastěji ytterbiem. Buzení je realizováno pomocí laserových diod, je vedeno přes optickou spojku do aktivního vlákna. Zrcadla rezonátoru jsou nahrazena braggovskými mřížkami, což jsou struktury vytvořené přímo na vlákně. Záření je poté z vlákna uvolněno díky optickému kolimátoru. Princip je zobrazen na obr. 11.

Vláknový laser vyniká především svou účinností, která dosahuje až 35%. Vlnová délka je 1070 nm a výkon tohoto typu laseru se může pomocí spojování tzv. laserových modulů vyšplhat až k 80 kW. Další velkou výhodou jsou malé prostorové nároky, vysoká kvalita výstupního svazku, téměř nulové náklady na údržbu, nízké provozní náklady a v neposlední řadě také životnost, která dosahuje 100 000 hodin.

Rozsah využití vláknového laseru je od mikro-obrábění až po výkonově náročné operace jako je například řezání, nebo svařování.

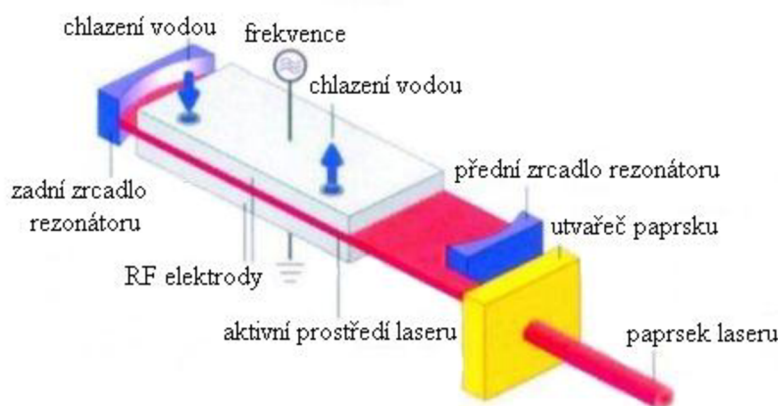


Obr. 11 Princip vláknového laseru [16].

### 1.5.2. Plynové lasery

Aktivní prostředí plynového laseru může být tvořeno atomy, molekulami, nebo ionty. Nejběžněji se používají směsi plynů  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  a He. Tyto plyny za nízkého tlaku neustále proudí ve speciálních skleněných trubiciích. Trubice mají průměry do desítek milimetrů a délku až několik metrů. Konce trubice jsou opatřeny zrcadly, která tvoří rezonátor. Princip plynového laseru je zobrazen na obr. 12.

Buzení plynových laserů je obvykle prováděno pomocí elektrického výboje v plynu, nebo chemickou reakcí. Trubice s plynem se zahřívá až na  $100\text{ }^\circ\text{C}$  a tudíž musí být chlazena. Plynové lasery se vyznačují vysokým výkonem a účinností.



Obr. 12 Schéma plynového laseru [27].

Mezi plynové lasery patří například:

**CO<sub>2</sub> laser:** Jeden z nejpoužívanějších, ale také nejstarších plynových laserů. Aktivní prostředí tvoří molekuly oxidu uhličitého, díky kterým probíhá stimulovaná emise. Další plyny, které se vyskytují v aktivním prostředí, zlepšují podmínky inverzní populace. Je to dusík, vodík, nebo xenon a helium. Buzení je prováděno většinou elektrickým proudem a účinnost laseru se pohybuje okolo 20 %. Vlnová délka se nachází v infračervené oblasti. V důsledku zahřívání aktivního média musí být CO<sub>2</sub> laser chlazen. Nejčastěji se chladí rezonátor vodou, v druhém případě je chlazena směs plynu a to přes tepelný výměník. CO<sub>2</sub> lasery se dále dělí podle proudění plynu v trubici na:

- **CO<sub>2</sub> laser s rychlým příčným prouděním plynu** – laserový paprsek, elektrický výboj a proudění plynu jsou ve třech různých směrech. Obvykle se s takto zkonstruovaným laserem dá dosáhnout výkonu jednoho kW na jeden metr délky trubice s aktivním médiem. Maximální výkony laserů s rychlým příčným prouděním se pohybují okolo 20 kW a jsou využívány pro tepelné zpracování a svařování kovů.
- **CO<sub>2</sub> laser s rychlým podélným prouděním plynu** – v tomto typu CO<sub>2</sub> laseru proudí aktivní plyn rezonátorem poměrně vysokou rychlostí rovnoběžně s osou rezonátoru. Výkon se udává v rozmezí 0,5 až 5 kW. Velkou předností jsou nízké provozní náklady, dlouhá životnost a vysoká spolehlivost laseru.
- **CO<sub>2</sub> laser s pomalým podélným prouděním plynu** – laser, který je buzený elektrickým výbojem a směr proudění plynu je stejný jako v předchozím případě.

Je to nejstarší typ CO<sub>2</sub> laseru, jehož výstupní výkon se pohybuje okolo 1 kW. Při řezání se dosahuje velmi kvalitní řezné plochy.

**Helium – Neonový laser:** Aktivní plyn tvoří směs helia a neonu, vlnová délka 633 nm. Výkon těchto zařízení není nijak velký, ale paprsek se vyznačuje dobrou směrovostí a koherencí. Používá se například k zaměřování polohy. V dnešní době jsou nahrazovány polovodičovými lasery.

**Excimerový laser:** Buzení tohoto typu laseru je realizováno svazkem elektronů. Aktivní prostředí je tvořeno zvláštními typy molekul, které existují pouze ve vybuzeném stavu, tzv. excimery. Při návratu do základního stavu se rozpadnou na atomy. Plyn tvořící aktivní prostředí se většinou skládá z halogenů a vzácných plynů. Vlnová délka je 193 nm a výkon se pohybuje ve stovkách W. Ve strojírenství se nejčastěji používají k popisování součástí a vrtání. Jejich velkou předností je minimální tepelné ovlivnění okolí dopadu paprsku.

### 1.5.3. Kapalinové lasery

Aktivní prostředí kapalinového laseru tvoří nějaká metalo-organická sloučenina, nebo organické barvivo. Aktivní částicí je iont vzácné zeminy, jako je např. Sm, Tb, Eu.

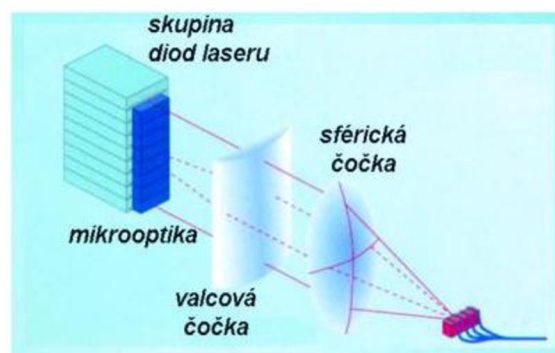
Buzení kapalinových laserů je optické, pomocí světla z jiných laserů, nebo výbojkou. Těmito typy laserů, jsme schopni vytvořit světlo o vlnových délkách 300 nm až 1500 nm, pomocí různých kombinací organických barviv. Využití nacházejí především ve spektrometrii, ale i zde jsou často nahrazovány lasery pevnolátkovými, neboť životnost aktivního prostředí kapalinového laseru je velmi krátká. To je způsobeno rozkladem organické části působením tepla a světla.

Mezi kapalinové lasery patří například Rhodamin laser nebo Kumarin laser. Tyto lasery se však ve strojírenské praxi nevyužívají. Jejich využití nalezneme například v medicíně.

### 1.5.4. Polovodičové lasery

Polovodičové lasery využívají jako aktivní prostředí polovodičový materiál, který obsahuje volné nosiče náboje. Schéma polovodičového laseru je zobrazeno na obr. 13.

Tento typ laseru je dnes nejrozšířenější a to především díky účinnosti, která dosahuje až 50%. Velkou výhodou je také možnost nastavení výkonu a vlnové délky pouhou změnou elektrického proudu. Nevýhodou polovodičových laserů je pak rozbíhavost paprsku a závislost parametrů záření na teplotě aktivního prostředí.



Obr. 13 Konstrukce polovodičového laseru [27].

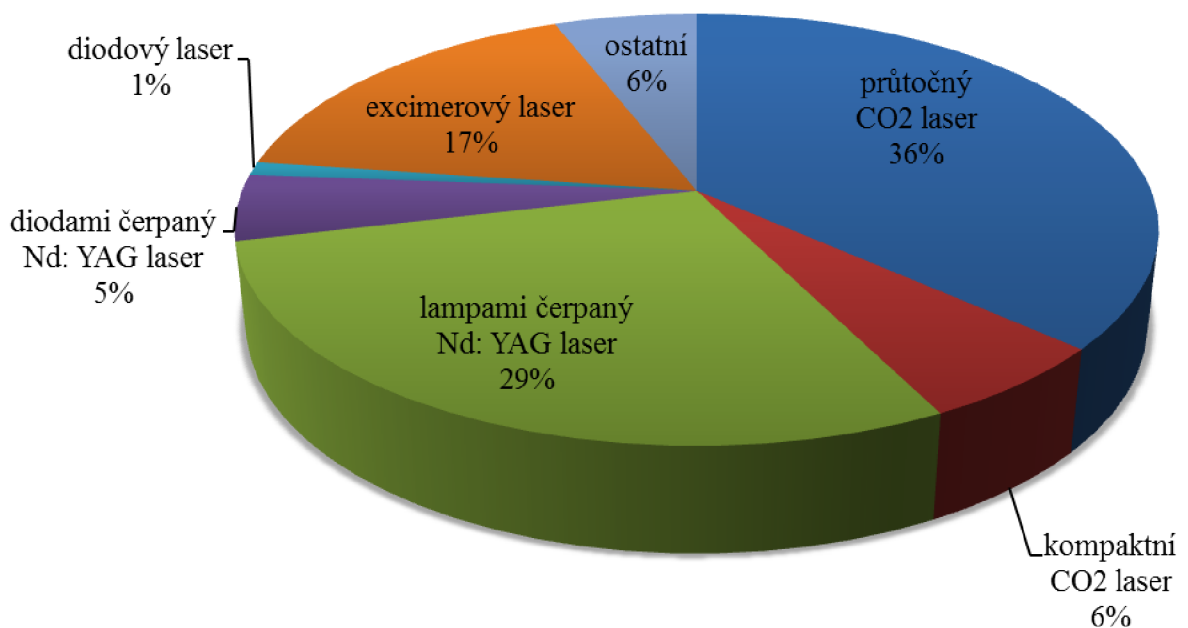
Mezi polovodičové lasery patří například:

**Diodový laser:** Aktivní prostředí tvoří blok polovodičů. Buzení diodového laseru je nejčastěji realizováno svazkem elektronů. Vlnová délka se pohybuje od 808 nm do 940 nm. Výkon na výstupu je obvykle 30 W až 250 W, v sestavě je však dosažitelný výkon až 8 kW. Tento typ laserů se využívá v průmyslu při řezání, svařování, pájení. Dále se využívá v medicíně a to především ve stomatologii.

**Injekční polovodičový laser:** Aktivní materiál je PN přechod a k buzení se využívá elektrické pole. Při průchodu elektrického proudu přes PN přechod vzniká světlo, které je zesíleno pomocí rezonátoru.

### 1.6 Podíl laserů na trhu [27]

Laser se uplatňuje ve všech možných oborech od biologie, přes strojírenství a výpočetní techniku až po astronomii. Zastoupení jednotlivých typů laserů na trhu znázorňuje obr. 14.



Obr. 14 Podíl jednotlivých typů laserů na trhu

## 2. LASEROVÉ TECHNOLOGIE [11], [13], [27]

Lasery za dobu své existence pronikly již do mnoha oborů. Výjimkou není ani strojírenství, ve kterém laserové technologie prochází prudkým rozvojem.

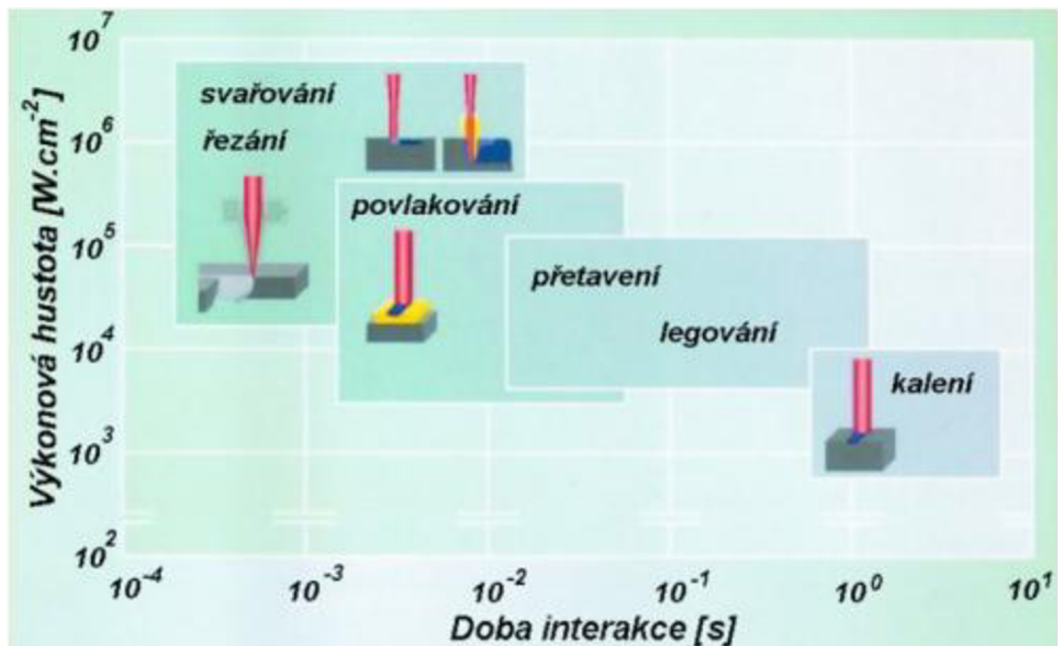
Největší předností laserových technologií je schopnost opracování materiálu bez mechanického kontaktu. Dále je laser nepostradatelným pomocníkem při opracovávání obtížně přístupných částí obrobku a při obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

Nejdůležitější parametry laserů při nasazení ve strojírenské výrobě jsou:

**Výkon laseru:** Energie emitovaná laserovým zářením za jednotku času.

**Výkonová hustota:** Někdy také označovaná jako intenzita záření. Můžeme ji definovat jako výkon dopadající na plochu, na kterou je paprsek zaostřen.

Na těchto parametrech závisí například řezná rychlost, svařovací rychlost nebo hloubka průniku paprsku. Určují také, pro jaké technologické operace může být konkrétní typ laseru využit. Na obr. 15 je zobrazena závislost výkonové hustoty na době interakce s materiálem. Z tohoto grafu je vidět pro jaké operace je daný laser využitelný.

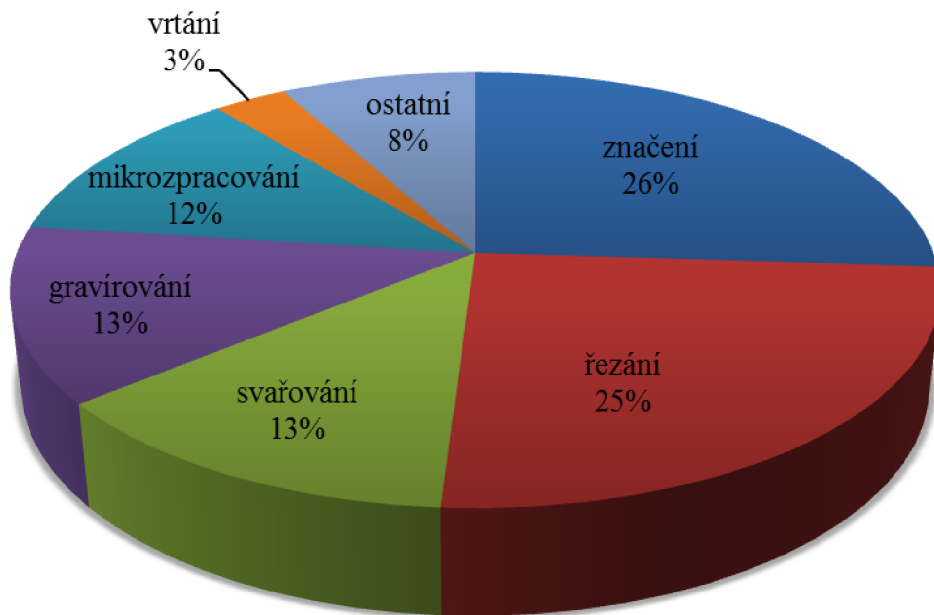


Obr. 15 Oblasti pracovních parametrů laserů [27].

Ve strojírenské praxi se využívají zejména technologie:

- značení
- řezání
- svařování
- gravírování
- mikrozpracování
- vrtání

Procentuální zastoupení těchto technologií na trhu je vidět na obr. 16.



Obr. 16 Procento zastoupení jednotlivých technologií v průmyslu

## 2.1 Svařování laserem [11], [28], [37], [39]

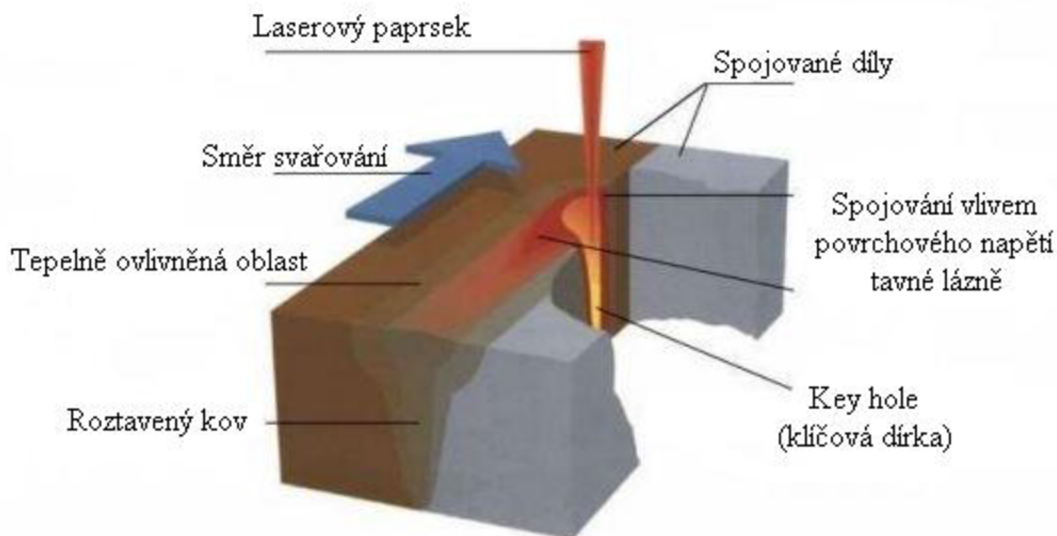
Svařování laserovým paprskem má oproti běžným metodám svařování mnoho výhod. Mezi hlavní přednosti se řadí například vysoká rychlost svařování, možnost provedení svaru při přístupu pouze z jedné strany, vysoká pevnost svaru, nepotřebnost přídavného materiálu, nebo malé tepelné ovlivnění místa svaru. Velmi podstatný je také fakt, že laserem můžeme bez větších obtíží svařovat materiály jako je titan nebo hliník.

Laserový paprsek je při svařování zaostřován do ohniska, ve kterém v důsledku koncentrace energie dochází k tavení svařovaných materiálů. Nejčastěji používanými lasery pro svařování jsou Nd: YAG a CO<sub>2</sub> laser. Tyto lasery nemusí dosahovat takových výkonů jako je tomu třeba při řezání.

Laserové svařování můžeme rozdělit na:

**Kondukční svařování:** Technologie používaná především v lékařství a elektrotechnice. Svařovaný materiál se taví pouze na povrchu a svar je díky tomu hluboký pouze několik desetin milimetru.

**Hluboké svařování (metoda Keyhole):** Tato technologie je využívána při svařování tlustších materiálů. Při prvotním styku laserového paprsku s materiálem vznikne odpařením tzv. klíčová dírka. Stěny tohoto otvoru jsou tvořeny roztaveným materiálem, který postupně zaplňuje dutinu vzniklou za pohybujícím se paprskem. Princip je zobrazen na obr. 17. K realizaci této technologie se využívají především CO<sub>2</sub> lasery, jejichž výkony musí být větší než při kondukčním svařování.



Obr. 17 Princip svařování metodou Keyhole [11].

## 2.2 Vrtání laserem [14], [28]

Princip laserového vrtání je založen na odpařování materiálu v důsledku vysoké intenzity paprsku, která je větší než u svařování. Vrtat můžeme materiály, jako jsou kovy, plasty, sklo, dřevo, ale nenahraditelný je laser především při vrtání do tvrdokovů nebo keramiky. Nejčastěji se tato technologie používá pro zhotovování kamenů do hodinek, filtrů, apod. Hloubka díry může dosahovat až 50 mm. Průměr vrtaného otvoru závisí na typu použitého laseru:

CO<sub>2</sub> laser – nejmenší průměr vrtané díry je 0,2 mm

Nd: YAG laser – nejmenší průměr vrtané díry může dosahovat až 0,025 mm

excimerové lasery – používají se pro vrtání do keramiky

## 2.3 Značení a popisování laserem [28], [37]

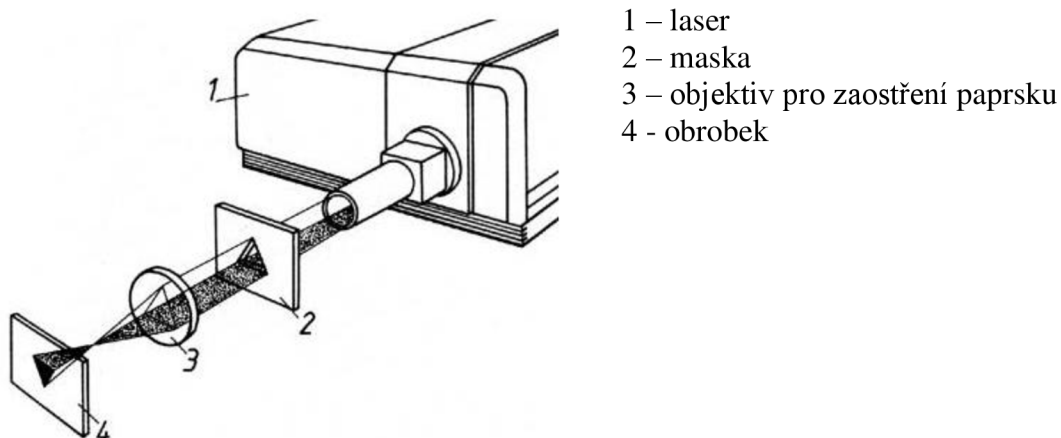
Laserové značení je založeno na stejném principu jako laserové vrtání. Dochází tedy k odpařování materiálu, ale pouze do hloubky několika mikrometrů. Výška znaků bývá obvykle v jednotkách milimetru. Značení je možno použít pro všechny typy materiálů od papíru až po titan. Další výhodou je, že značený materiál může mít jakoukoli povrchovou úpravu a téměř libovolný tvar.

Ke značení laserem se používají dvě metody:

**Popis přes masku:** Princip této metody je takový, že celý text popisu je vyříznut v tzv. masce, což je bronzový, nebo mosazný plech, který se vkládá mezi zdroj paprsku a popisovaný materiál. Místa, která jsou zakryta maskou, zůstávají nepopsána. Princip je zobrazen na obr. 18.

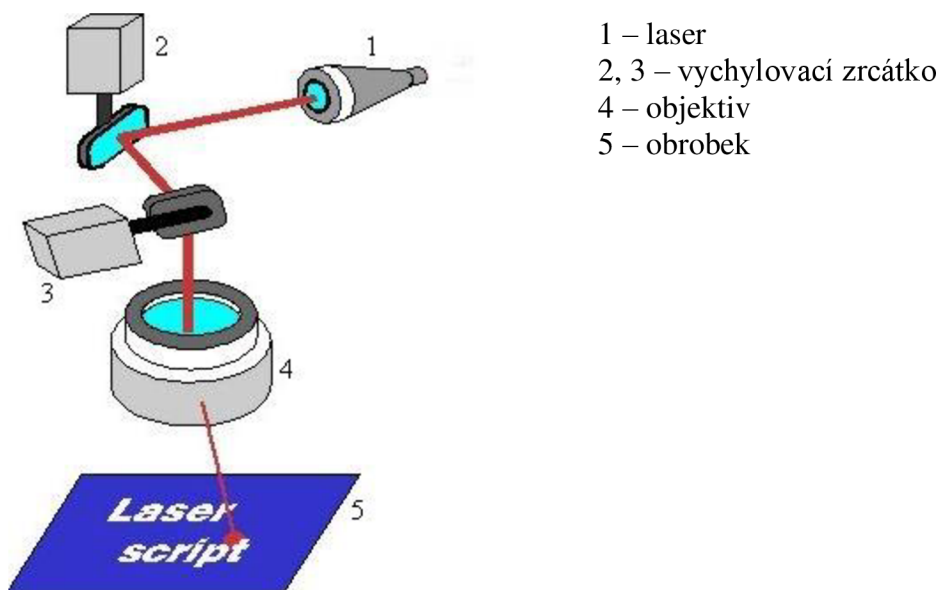
Nevýhodou je horší kvalita popisu a vyšší náklady při změně popisu. Proto je tato metoda vhodná především pro velké série.





Obr. 18 Popisování součásti přes masku [28].

**Popis vychylováním paprsku:** Princip je založen na vychylování laserového paprsku dvěma vzájemně kolmými zrcadly, která jsou řízena počítačem. Výhodou této metody popisování je okamžitá změna psaného textu změnou řídicího programu a také vysoká kvalita popisu. Princip je zobrazen na obr. 19.



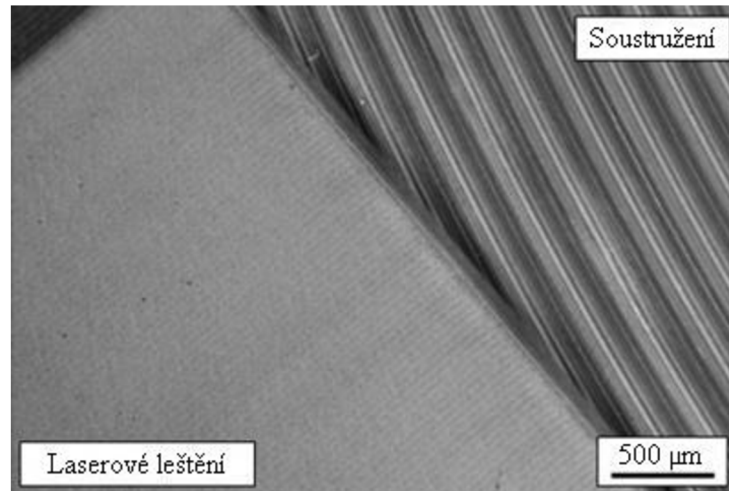
Obr. 19 Popisování součásti vychylováním paprsku [28].

## 2.4 Gravírování laserem [14], [28]

Laserové gravírování opět využívá princip odpařování materiálu stejně jako předchozí dvě technologie. Někdy bývá tato technologie označovaná jako mikrofrézování laserem. Používá se především k vytváření trojrozměrných reliéfů. Ve strojírenství se nejvíce využívá Nd: YAG laser, kterým se gravírují kalené oceli, následně použité jako formy pro vstřikování plastů, nebo jako zápustky.

## 2.5 Leštění povrchu laserem [14], [29]

V dnešní době se lasery běžně používají k odmašťování povrchu nebo k čištění od starých nátěrů, popřípadě rzi. Při laserovém leštění v podstatě dochází k natavování velmi tenké vrstvy materiálu, která díky působení povrchového napětí zarovná drsnosti vzniklé při předchozím obrábění. Na obr. 20 je znázorněn rozdíl mezi strukturou povrchu po soustružení a po leštění laserem. Dosahovaná drsnost při laserovém leštění se pohybuje okolo 0,1 až 0,2  $\mu\text{m}$ . Výkon laseru musí být volen tak, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění leštěného materiálu.

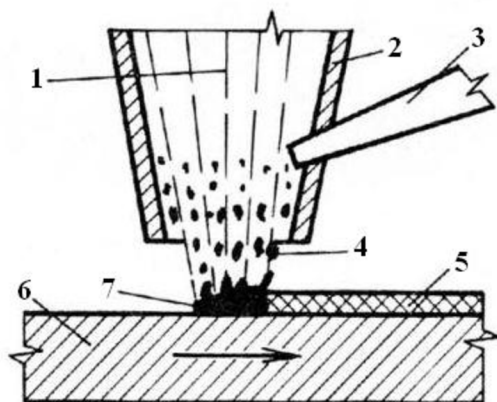


Obr. 20 Porovnání soustruženého a laserem leštěného povrchu [29].

## 2.6 Nanášení ochranných povlaků laserem [14], [15], [28]

Principem povlakování je přivádění nanášeného materiálu, který je buď ve formě drátu, nebo prášku, do laserového paprsku. Tento materiál je roztaven a nanesen na základní materiál, kde ztuhne. Nanesený materiál tvoří pásy, které se překrývají. Princip je zobrazen na obr. 21. Dalším způsobem povlakování je nanesení vhodného materiálu na povrch obrobku a jeho následné roztavení paprskem laseru.

V praxi se pro povlakování nejčastěji používají  $\text{CO}_2$  lasery, které mají výkon 5 kW. Nanesený povlak může dosahovat až 1 mm tloušťky a rychlost povlakování se pohybuje od 20 do 100  $\text{cm}^2$  za minutu.

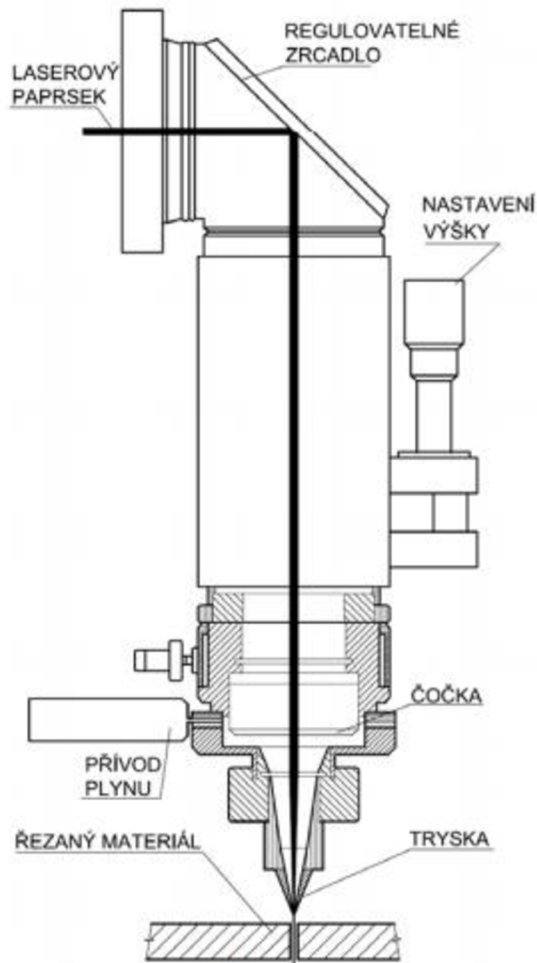


- 1 – laserový paprsek
- 2 – pracovní hlava
- 3 – přívod nanášeného materiálu
- 4 – roztavený nanášený materiál
- 5 – nanášený materiál
- 6 – obrobek
- 7 – tavenina

Obr. 21 Princip povlakování [28].

## 2.7 Řezání laserem [1], [3], [9], [11], [16], [17], [19], [22], [23], [27], [28], [35], [37], [39]

Řezání laserovým paprskem patří k nejnovějším metodám dělení materiálu ve strojírenské praxi. Z hlediska laserových technologií je řezání tou nejpoužívanější. K dělení materiálu se nejčastěji využívají CO<sub>2</sub> lasery, které dosahují vysoké přesnosti, malé šířky řezu a způsobují minimální tepelně ovlivněnou oblast. Dalšími neopomenutelnými výhodami laserového řezání jsou vynikající kvalita řezu, vysoká produktivita práce a snadná automatizace. Pomocí laseru můžeme dělit i velmi tvrdé materiály, protože při řezání nezáleží na tvrdosti materiálu, ale na jeho optických a tepelných vlastnostech.



Obr. 22 Řezací hlavice [9].

Laser využívaný pro řezání je vybaven tzv. řezací hlavici. Jejím úkolem je chránit optiku před poškozením a přivádět do místa řezu pomocný, nebo ochranný plyn. Pro různé tloušťky materiálů se používají různé hlavice, které se liší především průměrem výstupní trysky. Schéma hlavice je popsáno na obr. 22.

Čočka – upravuje paprsek, aby dosahoval co nejlepších parametrů pro řezání a aby byl vhodně zaostřen na řezaný materiál.

Nastavení výšky – zmiňované zaostřování je realizováno pomocí regulátoru výšky, který dostává informace od senzorů a udržuje konstantní vzdálenost mezi materiálem a čočkou.

Tryska – používá se k usměrnění plynu do místa řezu, její průměr se volí dle typu řezaného materiálu, většinou se pohybuje v rozmezí od 0,8 do 3 mm. Musí se dbát na to, aby tryska neomezovala procházející laserový paprsek.

### 2.7.1 Rozdělení metod řezání podle použitého řezného plynu

#### Oxidační laserové řezání

Při oxidačním způsobu řezání se jako řezný plyn využívá kyslík, který slouží k vyfukování nataveného materiálu z řezné spáry. Kyslík také způsobuje exotermickou reakci, která vzniká v důsledku interakce kyslíku s roztaveným materiálem. Díky tomuto jevu dochází k dalšímu ohřívání materiálu a zvyšování účinnosti celého procesu. Tento způsob dělení materiálu umožňuje vysoké řezné rychlosti, ale na úkor kvality řezu. Mezi hlavní nevýhody patří široká řezná spára, vysoká drsnost povrchu a velká tepelně ovlivněná oblast. Oxidační řezání se využívá hlavně pro dělení konstrukční oceli.

## Tavné laserové řezání

Tavné řezání je metoda, při níž dochází k roztavení děleného materiálu jen v důsledku působení laserového paprsku. Řezný plyn, nejčastěji dusík v tomto případě pouze vyfukuje roztavený materiál ven z řezné spáry. Nejpodstatnější výhodou tavného řezání je dosažení kvalitního povrchu řezných ploch, které již nemusí být dále nijak opracovávány. Nevýhodami jsou vyšší cena dusíku v porovnání s kyslíkem, ale především výraznější opotřebení stroje. Opotřebení nastává, protože při použití dusíku musíme v porovnání s kyslíkem několikanásobně zvýšit tlak plynu. Tento způsob se používá především k dělení nerezových ocelí a barevných kovů.

## Sublimační laserové řezání

Podstata sublimačního řezání je odpařování materiálu z místa řezu. Aby se materiál mohl odpařovat, je potřebná vysoká intenzita laserového záření. Jako řezný plyn se nejčastěji využívá dusík, nebo argon, díky čemuž nedochází k oxidaci materiálu. Výsledkem řezání je úzká řezná spára s velmi kvalitním povrchem. Tato metoda se používá pro tenké fólie a nekovové materiály. Tlusté kovové materiály sublimačně dělit nelze, protože při vzniku tekuté fáze mohou zkondenzovat vzniklé páry a vytvořit svarové spojení. Z tohoto důvodu platí pravidlo, že tloušťka děleného materiálu musí být menší než průměr paprsku. Metoda sublimačního dělení materiálu je používaná velmi zřídka.

### 2.7.2 Řezné parametry

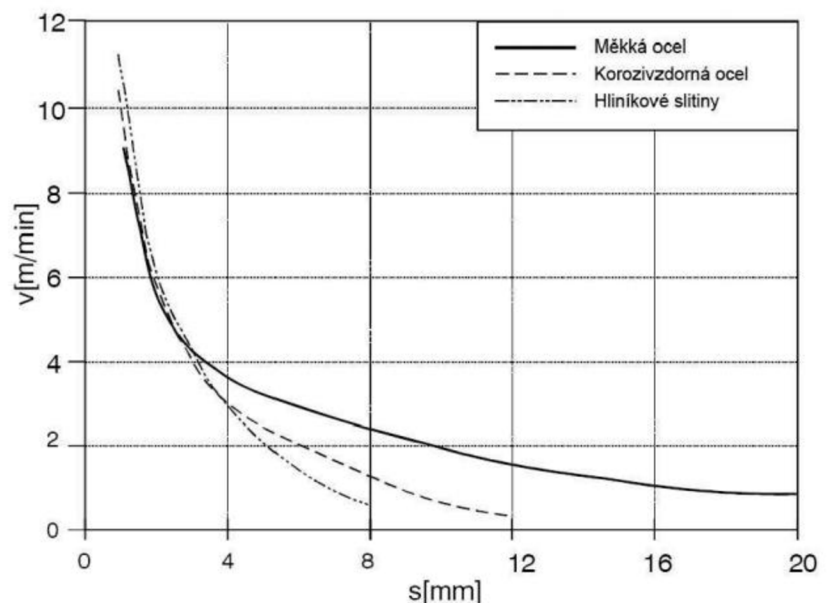
Při nesprávném nastavení řezných parametrů dochází především ke vnesení většího množství tepla, než je pro řez optimální, což způsobuje zhoršení kvality řezných ploch. Nejčastěji se jedná o výrazné zhrubnutí řezu, velké otřepy, apod.

Mezi tyto parametry se řadí:

**Výkon laseru** – základní parametr laserového řezání. Nastavení se musí volit takovým způsobem, aby došlo k prořezu materiálu, ale ne ke zbytečnému zhrubnutí řezu.

**Řezná rychlost** – jedná se o relativní rychlost mezi nástrojem a řezaným kusem. Udává se nejčastěji v metrech za minutu. Závislost řezné rychlosti na tloušťce materiálu je znázorněna na obr. 23.

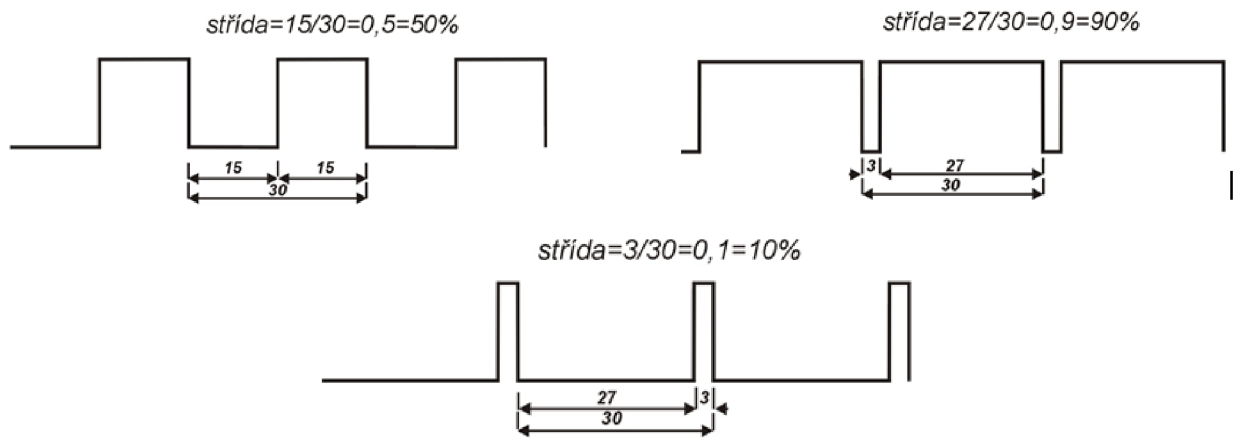
Obr. 23 Maximální rychlost řezání 4 kW laserem v závislosti na tloušťce materiálu [35].



v [m/min] Rychlost řezání

s [mm] Tloušťka materiálu

**Režim řezu** – paprsek dopadající na řezaný materiál může být buď časově kontinuální, nebo pulzní. U pulzního režimu pak nastavujeme frekvenci a střídu, což je poměr časů, ve kterých je signál v jednotlivých úrovních (obr. 24).



Obr. 24 Střída frekvence [23].

**Tlak a typ řezného plynu** – další parametr ovlivňující kvalitu řezné plochy je typ a tlak řezného plynu. Typ plynu se musí volit s ohledem na ekonomiku výroby. Na obr. 25 je znázorněn rozdíl kvality laserového řezu při použití kyslíku (spodní vzorek) a dusíku.



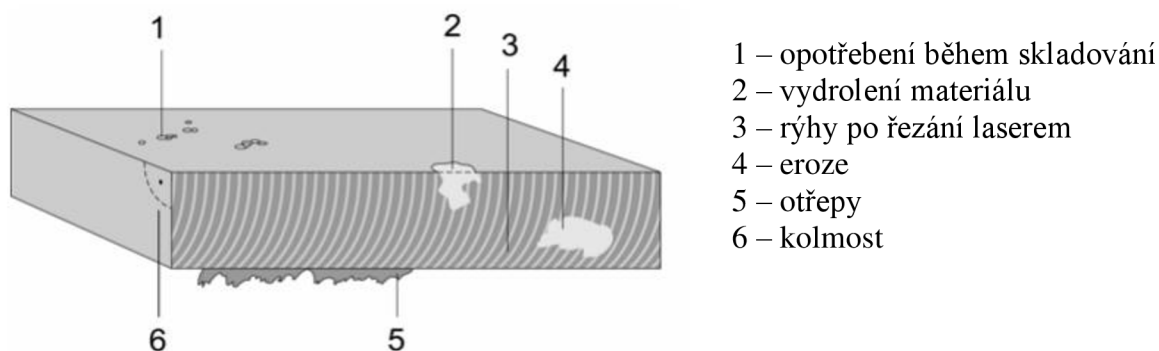
Obr. 25 Porovnání řezů při použití kyslíku a dusíku [10].

**Poloha ohniska** – tento parametr je většinou udáván výrobcem stroje a označuje polohu ohniska vůči řezanému materiálu. Nastavování polohy ohniska je nutné především z důvodu degradace čočky během řezání a také proto, že každá čočka má mírně odlišné optické parametry.

**Odstup trysky od plechu** – spolu se změnou tohoto parametru dochází ke změně polohy ohniska a mění se i množství plynu vstupující do řezné spáry. Zmenšení odstup trysky se provádí zejména kvůli zvýšení množství plynu ovlivňujícího řez. Může ale dojít ke zničení čočky v důsledku rozštíhnutí materiálu, nebo kontaktu s řezaným materiálem.

### 2.7.3 Vyhodnocení laserového řezání

Nejčastěji vyhodnocovaným parametrem po laserovém dělení materiálu je drsnost, které se podrobně věnuje praktická část práce. Další parametry jsou uvedeny a vyhodnocovány dle normy ČSN EN ISO 9013. Základní kritéria hodnocení řezné plochy po laserovém řezání jsou zobrazeny na obr. 26.



Obr. 26 Kritéria hodnocení kvality řezné plochy [35].

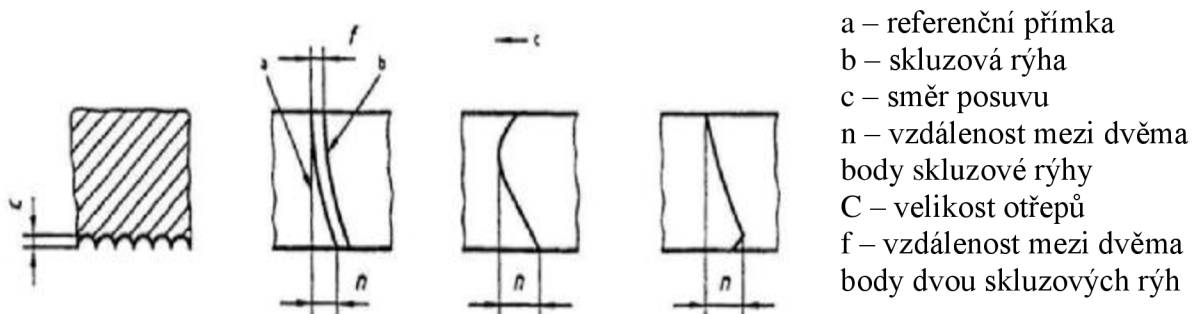
Vybraná kritéria pro vyhodnocení řezné plochy:

**Otřepy** – musí být vždy odstraněny. Můžeme je rozdělit do dvou skupin, kdy jednu skupinu tvoří otřepy snadno odstranitelné, druhou pak otřepy velmi ostré a tvrdé, které se musí z řezaného materiálu odstraňovat například broušením.

**Tvar a šířka řezu** – s rostoucí tloušťkou materiálu se zvětšuje šířka řezu. U materiálů do 6 mm je šířka řezné spáry obvykle 0,15 mm. U materiálů s tloušťkou 20 mm se může šířka řezu vyšplhat až na 0,5 mm.

**Materiál a výkon laseru** – největší tloušťka řezu je závislá na druhu řezaného materiálu a výkonu laseru. Čím tlustší materiál, tím výkonnější laser. Můžeme říci, že mezi těmito parametry je téměř lineární závislost.

**Skluz** – norma ČSN EN ISO 9013 definuje skluz jako průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání. Schéma je zobrazeno na obr. 27.



Obr. 27 Skluzová rýha [17].

### 2.7.4 Porovnání řezání laserem s dalšími nekonvenčními metodami dělení materiálu

Tab. 2 Porovnání různých nekonvenčních metod dělení materiálu [11].

	LASER	PLAZMA	VODNÍ PAPERSEK
Dělitelné materiály	všechny, kromě materiálů s vysokou světelnou odrazivostí	pouze kovy	všechny materiály
Teplota řezu	až 10 000 °C	nad 1 000 °C	do 40 °C
TOO	malá	velká	není
Kolmost řezu	mírný odklon	silný odklon	mírný odklon
Struktura povrchu obrobene plochy	nízká drsnost	výrazné rýhy	nízká drsnost
Výronek v řezné spáře	většinou bez výronku	možno i bez výronku	vždy bez výronku
Tvrdomost řezaného materiálu	nemá vliv na rychlost řezání	nemá vliv na rychlost řezání	mírně ovlivňuje rychlost řezání
Velikost dílce	malé i velké dílce	velké dílce	malé i velké dílce
Tloušťka řezaného materiálu	ocel do 25 mm	ocel do 40 mm	ocel do 500 mm
Složitost tvaru	složité tvary	jednoduché tvary	složité tvary
Průpal	je možný	je možný	je možný
Vznik plynných emisí	malé množství	velké množství	nevznikají
Vznik oxidických povlaků	vznikají pouze při řezání kyslíkem	vznikají	vznikají u materiálů korodujících při styku s vodou

### 3. STRUKTURA POVRCHU [12], [17], [18], [25]

Nejdůležitější složkou struktury povrchu je drsnost, kterou můžeme definovat jako část geometrických úchylek skutečného povrchu s relativně malou vzdáleností sousedních nerovností. Pokud se zaměříme na laserové řezání, pak drsnost obrobků je určena hloubkou rýh v řezné rovině. Tyto rýhy jsou při vniku paprsku do materiálu rovnoběžné s osou paprsku, ale se zvětšující se tloušťkou materiálu se zakřívují. Stejně tak platí, že čím větší tloušťka řezaného materiálu, tím větší drsnost obrobku.

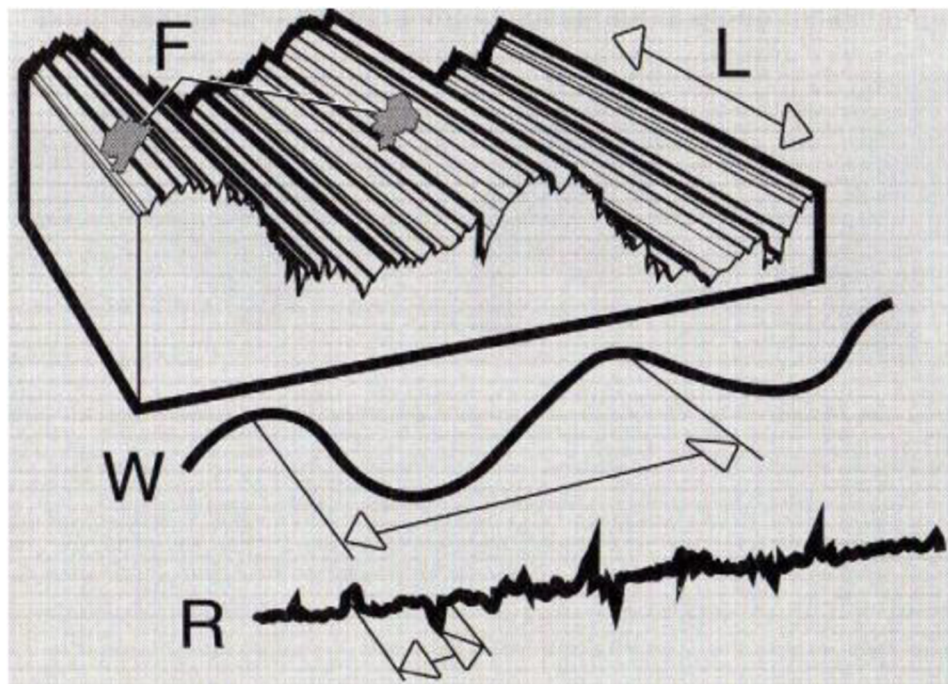
Z hlediska struktury povrchu rozlišujeme dva druhy nerovností:

**Mikronerovnost** – je dána stopami, které zanechává laserový paprsek na obráběné ploše. Jedná se o jemné nerovnosti, např. drsnost povrchu.

**Makronerovnost** – nejčastěji je způsobena vibrací soustavy Stroj – Nástroj – Obrobek – Prostředí. Jsou to rozlehlejší periodické nerovnosti jako např. vlnitost povrchu.

Na obr. 28 si můžeme všimnout čtyř základních typů nerovností povrchu. Nejdůležitějším parametrem je drsnost označená písmenem R. Tento parametr označuje jemně strukturované mikrogeometrické odchylky od ideálního povrchu. Drsnost měříme po krátkých úsecích. Dalším parametrem je vlnitost, kterou označujeme W. Vlnitost makrogeometricky překrývá drsnost a jedná se v podstatě o vzdálenost nevyšších a nejnižších bodů na mnohem větší vzdálenosti, než u drsnosti. Třetím parametrem je textura povrchu označená písmenem L, která je určena uspořádáním rýh po obrábění. Posledním ze základních typů nerovností jsou porušená místa, s označením F. Tyto nerovnosti vznikají v důsledku náhodného poškození a do struktury povrchu se nezahrnují. Nejčastěji to bývají póry, nebo trhliny v materiálu.

Norma ČSN EN ISO 4287 ještě definuje parametr P, který označuje základní profil měřeného materiálu. Tato mezinárodní norma Geometrických požadavků na výrobky stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu profilovou metodou.

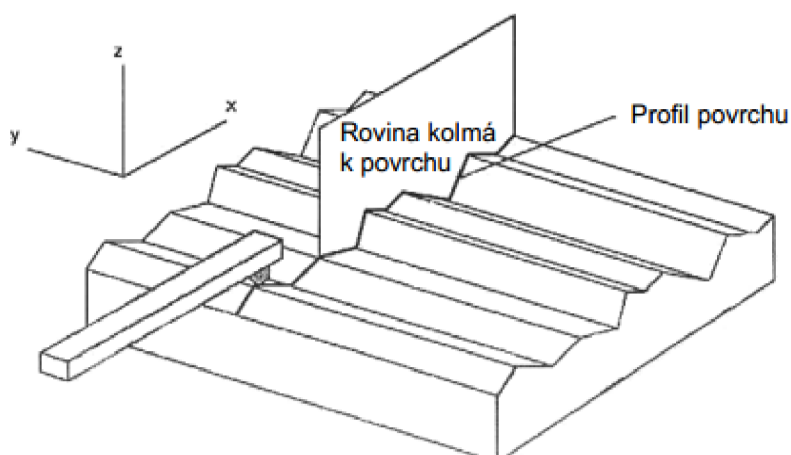


Obr. 28 Nerovnosti povrchu [18].



### 3.1 Základní parametry a měření drsnosti povrchu [7], [12], [18], [25], [34]

Měření drsnosti obrobene součásti se realizuje redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu se následně získá profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování drsnosti. Schéma je zobrazeno na obr. 29.



Obr. 29 Profil povrchu [25].

#### 3.1.1 Definice parametrů při měření drsnosti

Parametry využívající se k vyhodnocování drsnosti můžeme rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou parametry výškové, druhou pak délkové. Před podrobným rozбором jednotlivých skupin je ovšem nutné uvést alespoň základní terminologii a význam elementů, které napomáhají k jejich popisu.

**Základní délka ( $l_r$ )** – délka ve směru osy x, která je používána pro rozpoznání nerovností charakterizující daný profil.

**Vyhodnocovaná délka ( $l_n$ )** – délka ve směru osy x, která může obsahovat jednu a více základních délek. Je využívána k posouzení vyhodnocovaného profilu.

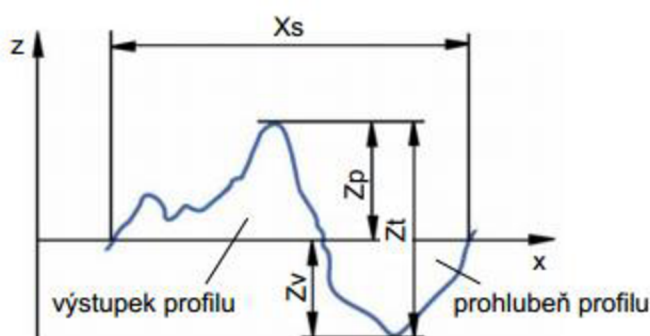
**Prvek profilu** – jedná se o výstupek a přilehlou prohlubeň. Prvek profilu a všechny následující parametry na něm definované jsou znázorněny na obr. 30.

**Výška výstupku profilu ( $Z_p$ )** – vzdálenost nejvyššího bodu výstupku profilu od osy x.

**Hloubka prohlubně profilu ( $Z_v$ )** – vzdálenost nejnižšího bodu prohlubně profilu od osy x.

**Výška prvku profilu ( $Z_t$ )** – součet hloubky prohlubně profilu  $Z_v$  a výšky výstupku profilu  $Z_p$ .

**Šířka prvku profilu ( $X_s$ )** – délka osy x na níž se nachází prvek profilu.



Obr. 30 Prvek profilu [25].

## Výškové parametry

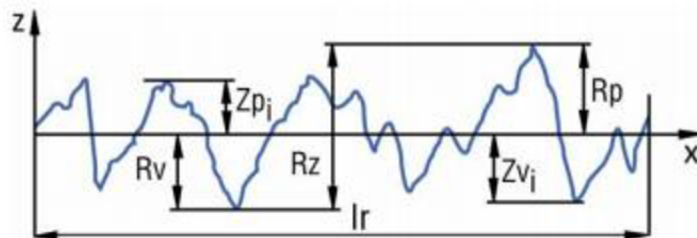
**Největší výška výstupku profilu ( $R_p$ )** – je to výška  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (obr. 31).

**Největší hloubka prohlubně profilu ( $R_v$ )** – jedná se o hloubku  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (obr. 31).

**Největší výška profilu ( $R_z$ )** – je rovna součtu výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku a  $Z_v$  nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky  $l_r$  (obr. 31).

**Průměrná výška profilu ( $R_c$ )** – udává průměrnou hodnotu výšek  $Z_t$  prvků profilu v rozsahu základní délky  $l_r$ .

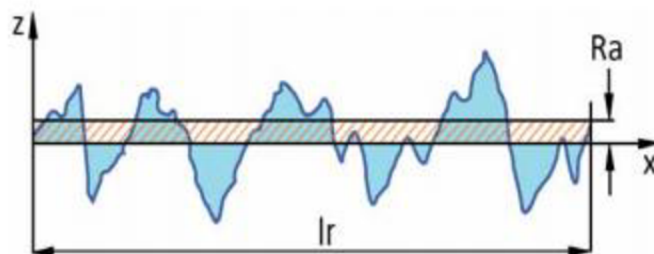
**Celková výška profilu ( $R_t$ )** – je rovna součtu výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky  $l_n$ .



Obr. 31 Parametry  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$  [25].

**Střední aritmetická úchylka profilu ( $R_a$ )** – ve strojírenství se jedná o nejčastěji vyhodnocovaný parametr při měření struktury povrchu. I přes tento fakt je ovšem známo, že  $R_a$  má malou vypovídací schopnost, jelikož nereaguje na extrémní výšky, popřípadě hloubky profilu (obr. 32). Největší nevýhodou tohoto parametru je, že nelze zjistit, jak daný povrch vlastně vypadá. Střední aritmetická úchylka se vypočte jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$  (vzorec 3.1).

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad [\mu m] \quad (3.1)$$



Obr. 32 Střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu [25].

**Průměrná kvadratická úchylka profilu (Rq)** – jedná se o kvadratickou hodnotu pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$  (vzorec 3.2).

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z^2(x)| dx} [\mu m] \quad (3.2)$$

**Šikmost profilu (Rsk)** – využívá se ke zpřesnění hodnoty  $R_a$ , konkrétně přispívá k lepší představě o tvaru profilu. Můžeme ji vyjádřit jako podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky  $l_r$  (vzorec 3.3).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[ \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z^3(x)| dx \right] [\mu m] \quad (3.3)$$

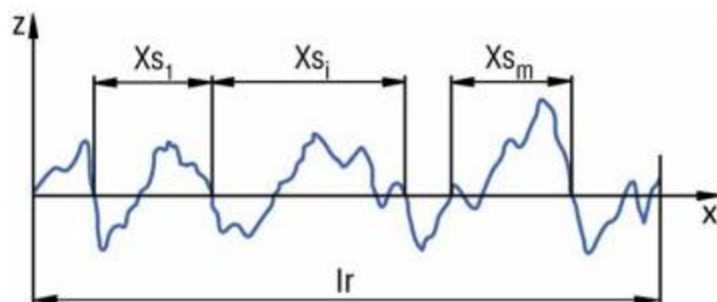
**Špičatost posuzovaného profilu (Rku)** – je rovna podílu průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny  $Rq$  v rozsahu základní délky  $l_r$  (vzorec 3.4). Můžeme říci, když je  $Rku > 3$ , pak jsou na povrchu ostřejší výstupky a rýhy a naopak.

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[ \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z^4(x)| dx \right] [\mu m] \quad (3.4)$$

## Délkové parametry

**Průměrná šířka prvků profilu (RSm)** – využívá se jako základní charakteristika drsnosti povrchu v podélném směru (obr. 33). Je dána průměrnou hodnotou šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (vzorec 3.5).

$$RSm = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m X_{s_i} [\mu m] \quad (3.5)$$



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

### 3.1.2 Měření drsnosti

K měření drsnosti slouží mnoho metod založených na různých principech. Každá z metod má své pro a proti. Nejzákladnějšími skupinami přístrojů používaných pro měření drsnosti jsou dotykové měřicí přístroje, které jsou popsány níže.

Hojně využívanou skupinou přístrojů jsou také měřidla bezdotyková. Jejich princip je založen na optickém měření drsnosti, kdy paprsek elektromagnetického záření dopadá na povrch měřené součásti. Z následného vyhodnocení odrazu, nebo rozptylu paprsku je zjištěna drsnost.

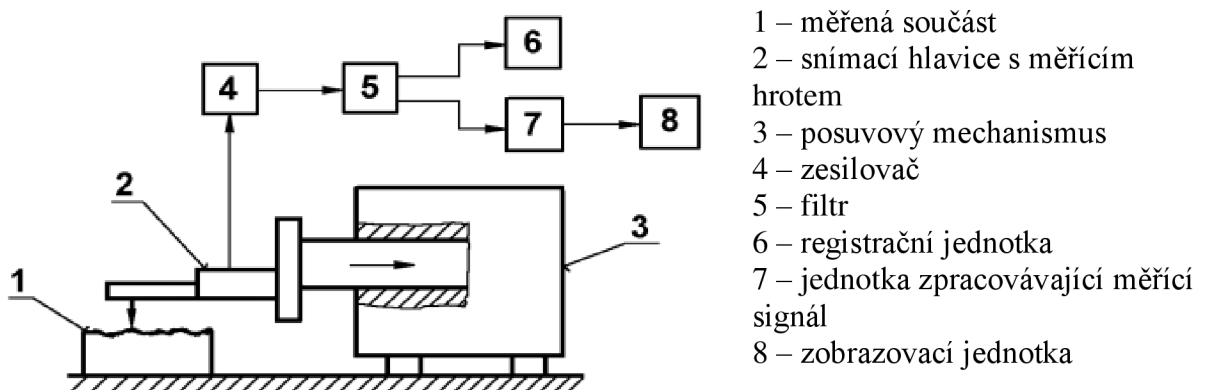
Existují ale i přístroje, které nefungují ani na jednom z těchto principů. Jako příklad může sloužit pneumatické měření nerovností povrchu, jehož principem je přitlačení trysky k povrchu měřené součásti. Následným vyhodnocením průtoku, nebo tlaku vzduchu z trysky získáme stupeň nerovností na součásti.

**Dotykové měřicí přístroje** – nejdokonalejší a také nejpoužívanější přístroje na měření drsnosti ve strojírenství. Princip zařízení spočívá v posunu diamantového hrotu po povrchu měřené součásti. Mechanický signál získaný hrotem se následně transformuje na signál elektrický, který je dále zpracováván. Po zpracování jsou nám přístrojem nabídnuty číselné hodnoty daného parametru drsnosti, grafický záznam apod. Na obr. 34 je zobrazeno schéma přístroje.

Výhodami dotykového měření drsnosti jsou především vysoká přesnost a citlivost. Nevýhodou je pak částečné poškození povrchové vrstvy v důsledku pohybujícího se diamantového hrotu po povrchu součásti.

Výsledky měření také ovlivňují následujícími parametry:

- poloměr zaoblení snímacího hrotu (2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ )
- vrcholový úhel snímacího hrotu (60°, 90°)
- přitlačná síla (přibližně 0,00075 N)



Obr. 34 Schéma dotykového měřicího přístroje [34].

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4. CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE

Cílem praktické části práce bylo zjištění drsnosti vzorků oceli S235JR a následné porovnání naměřených hodnot s normou ČSN EN ISO 9013. Vzorky byly vypáleny CO<sub>2</sub> laserem a jejich tloušťka byla od 2 do 15 mm.

## 5. POUŽITÝ MATERIÁL [5], [6], [23], [30], [31]

K měření byly vybrány vzorky vypálené z oceli S235JR, která byla dříve označována jako ocel 11 375. Tato nelegovaná ocel se využívá především ve stavebnictví a strojírenství, kde se z ní vyrábí běžné konstrukční a strojní součásti. Dále je vhodná pro statické i dynamické namáhání a pro svařování. Její chemické složení je uvedeno v tabulce tab. 3.

Z normy ČSN 41 1375 vyplývá, že plechy do tloušťky 3 mm musí být normalizačně žihány, jejich mechanické vlastnosti udává tabulka tab. 4. Od 3mm tloušťky již nemusí být prováděno žádné tepelné zpracování. Mechanické vlastnosti plechu tloušťky 3 až 16 mm jsou zapsány v tabulce tab. 5.

Tab. 3 Chemické složení [23].

C [%]	P [%]	S [%]	N [%]	Mn [%]
max 0,17	max 0,045	max 0,045	max 0,009	max 1,4

Tab. 4 Mechanické vlastnosti plechu do tloušťky 3 mm [5].

Stav	Nejnižší mez kluzu ReH [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A [%]
.0	235	340 až 470	24

Tab. 5 Mechanické vlastnosti plechu tloušťky 3 až 16 mm [5].

Stav	Nejnižší mez kluzu ReH [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A [%]
.1	235	360 až 510	17

## 6. POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE

### 6.1 Laserové řezné centrum [2], [8], [17]

Vzorky materiálu byly nařezány na řezném centru Amada FO 3015 (obr. 35) ve firmě Dendera a.s. se sídlem v Kanicích. Toto zařízení obsahuje laser na bázi CO<sub>2</sub> a dosahuje maximálního výkonu 4 kW. Díky robustnímu litému rámu je možno zpracovávat materiál o hmotnosti až 900 kg. Řezný systém je typu létající optika, kdy plech leží na roštu a pohybuje se pouze řezná hlava, řízená CNC systémem. Podrobnější technická data jsou vypsána v tabulce tab. 6.

Pro zhotovení vzorků bylo využito oxidačního způsobu řezání, z čehož plyne, že řezným plynem byl kyslík. Parametry nastavené při vypalování vzorků z oceli S235JR jsou uvedeny v tabulce tab. 7.



Obr. 35 Řezné centrum Amada FO 3015 [2].

Tab. 6 Technická data použitého laseru [17].

Model	Amada FO 3015
Výkon [kW]	4
Vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ]	10,6
Řezná rychlost [m/min]	0 - 20
Přesnost [mm]	0,1/1000
Pojezdy X x Y x Z [mm]	3070 x 1550 x 200
Řídící jednotka	Fanuc FS - 160iLA
Nosnost stolu [kg]	900
Rozměry laserového řezacího stroje d x š x v [mm]	9789 x 2967 x 2343
Rozměry pomocného stolu d x š x v [mm]	4080 x 2480 x 1390
Hmotnost centra [kg]	12 000

Tab. 7 Použité řezné parametry

Tloušťka	Rychlost	Výkon	Frekvence	Duty	Tlak $\text{O}_2$	Odstup trysky	Poloha ohniska	Čočka
[mm]	[mm/min]	[W]	[Hz]	[%]	[bar]	[mm]	[mm]	[inch]
2	4000	1200	2000	90	2,0	0,8	+2,5	5,0"
3	3600	1900	2000	95	0,5	0,8	+2,0	7,5"
4	3000	2700	1800	75	0,4	1,2	-1,0	
5	3200	3000	2000	95	0,6	0,8	+2,0	
6	2700	2500	2000	100	0,6	1,2	+0,5	
8	2400	4000	2000	90	0,7	1,2	+2,0	
10	1800	4000	2000	100	0,7	1,2	-1,0	
12	1500	4000	2000	100	0,5	0,8	+2,0	
15	800	3000	1000	80	0,6	1,5	+3,0	

## 6.2 Zařízení na měření drsnosti [24]

Bylo použito měřicí zařízení MarSurf M300, které je primárně určeno k měření drsnosti povrchů. Naměřené hodnoty se odečítají přímo z digitálního displeje na zařízení, nebo je lze vytisknout. Dále byla použita posuvová jednotka MarSurf RD 18 C a snímací hrot PHT 350. Měřicí přístroj je zobrazen na obr. 36 a jeho technické parametry jsou vypsány v tabulce tab. 8.



Obr. 36 MarSurf M 300 [24].

Tab. 8 Technická data MarSurf M 300.

Typ	MarSurf M 300
Měřicí princip	profilová metoda
Rozsah měření	do 350 $\mu\text{m}$
Rychlost snímání	0,5 mm/s
Snímací hrot	PHT - 350, $r = 2 \mu\text{m}$
Parametry měření	Ra, Rq, Rz, Rmax, Rp, Rpk, Rk, Rvk, Rv
Paměť	40 000 výsledků
Provozní teplota	5° C - 40 °C
Rozměry M 300 (d x š x v)	190 x 140 x 75 mm
Rozměry RD 18 (d x š x v)	130 x 70 x 50 mm

## 6.3 Posuvné měřítko [24]

K určení tloušťky nařezaných vzorků bylo použito digitální posuvné měřítko Schut o měřicím rozsahu 0 – 150 mm (obr. 37). Hodnoty byly odečítány z digitálního displeje a měřidlo pracovalo s rozlišitelností 0,01 mm.



Obr. 37 Digitální posuvné měřítko [24].



## 7. POPIS MĚŘENÍ

Měření probíhalo v prostorách Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Podmínky měření byly

- teplota: 20 °C,
- tlak: 101 kPa,
- vlhkost: 53 %.

Nejprve bylo vybráno 9 vzorků oceli S235JR o rozměrech 20 x 80 mm (obr. 38). Jejich tloušťka byla měřena pomocí posuvného měřidla a pohybovala se v rozmezí od 2 do 15 mm.

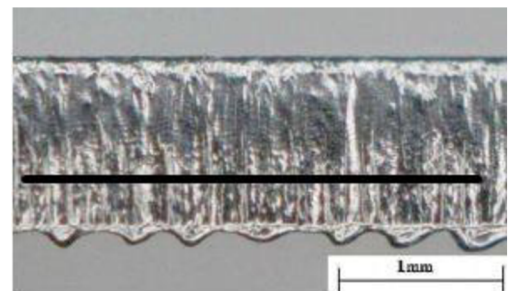


Obr. 38 Měřený vzorek.

Vybrané vzorky byly pevně upnuty ve svěráku a proměřeny drsnoměrem MarSurf M 300. Poloha měřicího přístroje vůči vzorku je zobrazena na obr. 39. Měření bylo prováděno ve vzdálenosti 2/3 tloušťky materiálu od horní hrany řezu (obr. 40). Tato vzdálenost byla stanovena podle normy ČSN EN ISO 9013, která říká, že zde je drsnost materiálu po laserovém řezání největší. Ze stejného důvodu bylo měření prováděno ve směru kolmém na rýhy vzniklé při řezání.



Obr. 39 Měřicí hrot.



Obr. 40 Vzdálenost místa měření od horní hrany řezu.

Každý vzorek byl proměřen na třech různých místech, přičemž hodnoty byly odečítány z displeje přístroje. Měřící prostředí a použité pomůcky jsou vyobrazeny na obr. 41.



obr. 41 Měřící prostředí a použité pomůcky.

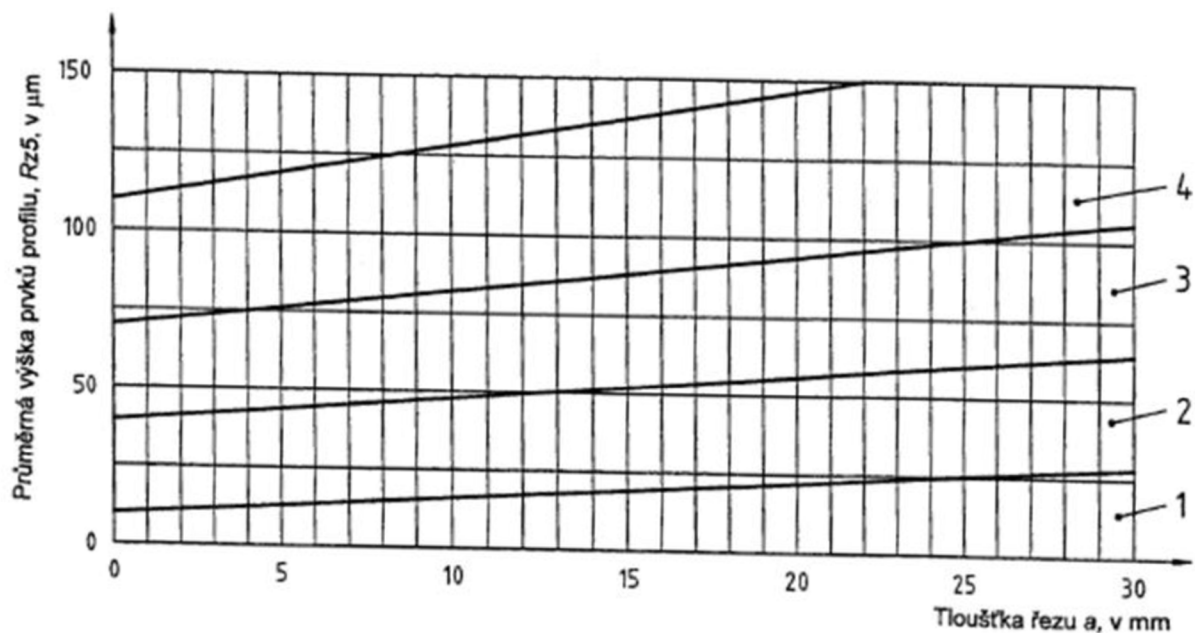
## 8. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ [7]

### 8.1 Průměrná výška prvků profilu dle normy

V normě ČSN EN ISO 9013 byly vyhledány grafy závislosti průměrné výšky profilu na tloušťce řezu, z nichž se po vynesení hodnot odečítá toleranční pole příslušného řezu (obr. 42). Velikosti jednotlivých tolerančních polí pak znázorňuje tabulka tab. 9.

Tab. 9 Průměrná výška prvků profilu [7].

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu [μm]
1	10 + (0,6a mm)
2	40 + (0,8a mm)
3	70 + (1,2a mm)
4	110 + (1,8a mm)



Obr. 42 Průměrná výška prvků profilu – tloušťka zpracovávaného kusu do 30 mm [7].

## 8.2 Vlastní výsledky

Po zjištění hodnot Ra a Rz jednotlivých vzorků, byla spočtena průměrná výška profilu (vzorec 8.1) a směrodatná odchylka (vzorec 8.2). Vypočtené hodnoty byly zapsány do tabulky tab. 10. Průměrné výšky jednotlivých profilů byly vyneseny do grafu odpovídajícímu normě ČSN EN ISO 9013, podle kterého byly následně vyhodnoceny. Graf je zobrazen na obr. 43.

Pro výpočet byly použity následující vzorce:

Bodový odhad střední hodnoty (průměrná výška profilu):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (8.1)$$

Bodový odhad směrodatné odchylky:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (8.2)$$

## 8.2.1 Tabulky naměřených a zpracovaných hodnot

Tab. 10 Naměřené a vypočtené hodnoty.

Ocel S235JR						
Tloušťka vzorku [mm]	Parametr	Drsnost [ $\mu\text{m}$ ]			Střední hodnota [ $\mu\text{m}$ ]	Směrodatná odchylka [ $\mu\text{m}$ ]
		1. měření	2. měření	3. měření		
2	Ra	1,638	1,474	1,677	1,6	0,1
	Rz	7,409	7,051	6,697	7,1	0,4
3	Ra	0,392	0,505	0,973	0,6	0,3
	Rz	1,867	2,671	4,433	3,0	1,3
4	Ra	0,944	0,746	0,635	0,8	0,2
	Rz	4,966	3,142	3,134	3,7	1,1
5	Ra	1,025	0,679	1,171	1,0	0,3
	Rz	4,785	3,442	7,025	5,1	1,8
6	Ra	1,098	1,065	1,413	1,2	0,2
	Rz	5,737	5,43	6,915	6,0	0,8
8	Ra	3,147	2,044	3,262	2,8	0,7
	Rz	12,84	9,064	13,05	11,7	2,2
10	Ra	2,915	2,3	1,853	2,4	0,5
	Rz	11,75	10,39	7,954	10,0	1,9
12	Ra	1,555	1,8	1,975	1,8	0,2
	Rz	6,977	7,748	8,577	7,8	0,8
15	Ra	1,663	2,288	1,607	1,9	0,4
	Rz	8,253	10,11	7,647	8,7	1,3

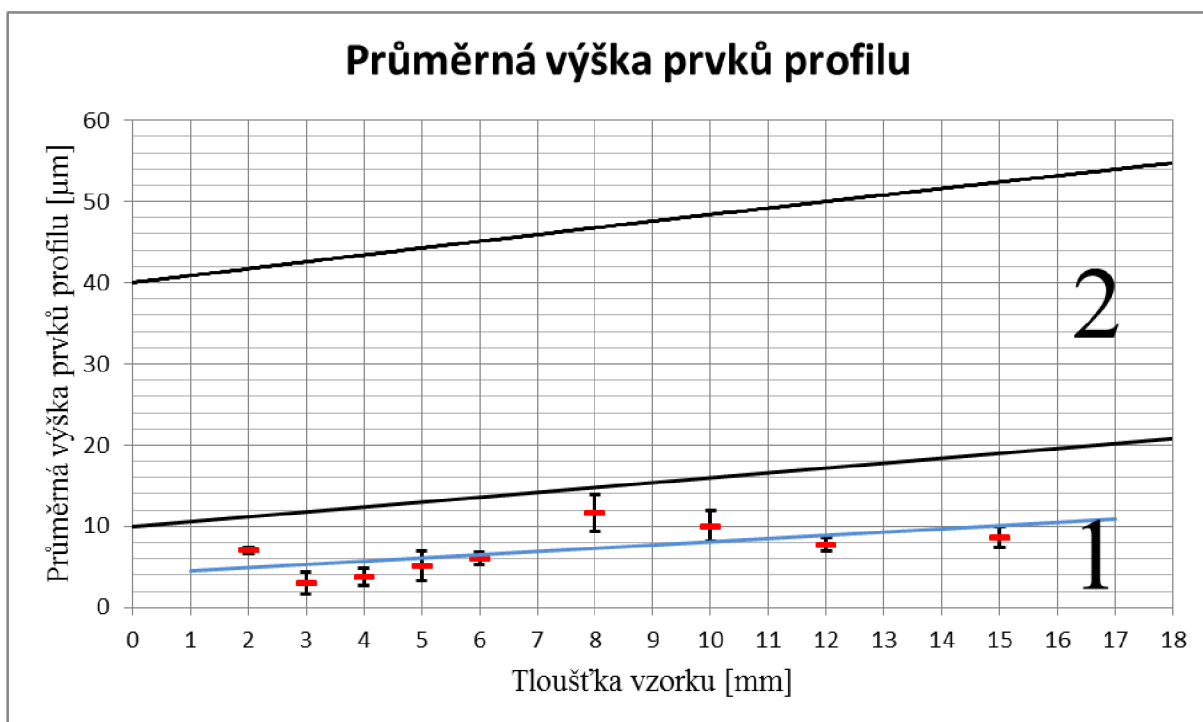
Pro přehlednost byla zpracována tabulka tab. 11, ve které jsou zapsány výsledné hodnoty průměrné výšky profilů jednotlivých tlouštěk vzorků, včetně vypočtené směrodatné odchylky.

Tab. 11 Přehledná tabulka výsledných hodnot.

Tloušťka vzorku [mm]	Parametr	Hodnota parametru [ $\mu\text{m}$ ]
2	Ra	$1,6 \pm 0,1$
	Rz	$7,1 \pm 0,4$
3	Ra	$0,6 \pm 0,3$
	Rz	$3,0 \pm 1,3$
4	Ra	$0,8 \pm 0,2$
	Rz	$3,7 \pm 1,1$
5	Ra	$1,0 \pm 0,3$
	Rz	$5,1 \pm 1,8$

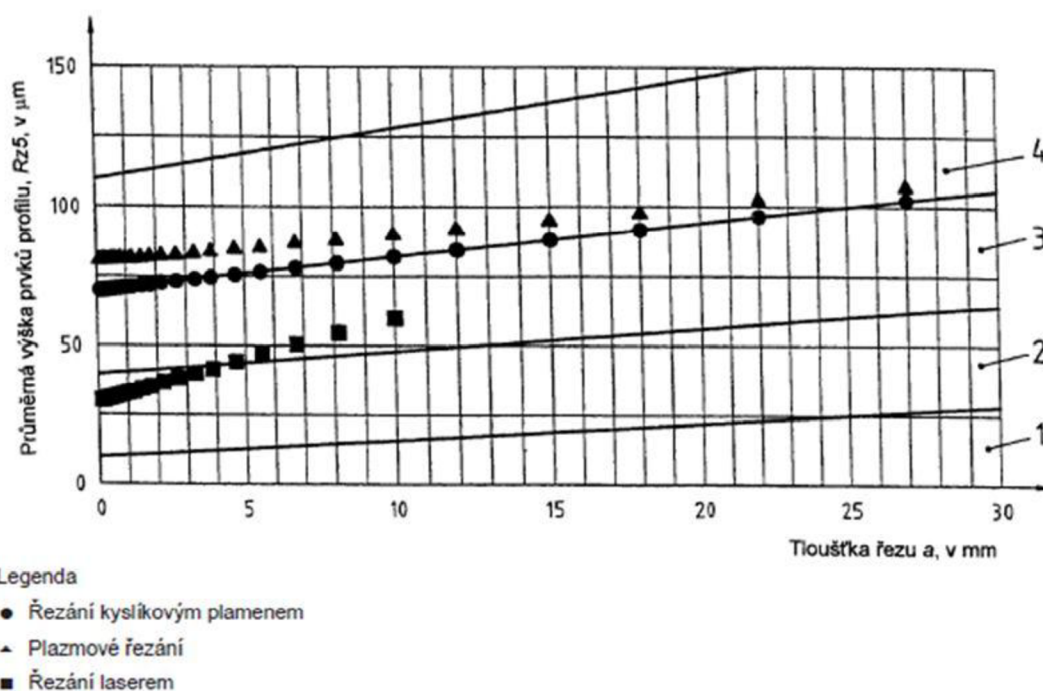
Tloušťka vzorku [mm]	Parametr	Hodnota parametru [ $\mu\text{m}$ ]
6	Ra	$1,2 \pm 0,2$
	Rz	$6,0 \pm 0,8$
8	Ra	$2,8 \pm 0,7$
	Rz	$11,7 \pm 2,2$
10	Ra	$2,4 \pm 0,5$
	Rz	$10,0 \pm 1,9$
12	Ra	$1,8 \pm 0,2$
	Rz	$7,8 \pm 0,8$
15	Ra	$1,9 \pm 0,4$
	Rz	$8,7 \pm 1,3$

## 8.2.2 Srovnání výsledků s normou ČSN EN ISO 9013



Obr. 43 Průměrná výška prvků profilu Rz naměřených hodnot.

Pro porovnání drsností naměřených při vlastním pokusu a drsností, které jsou typické pro laserové řezání, byl použit graf z normy ČSN EN ISO 9013, který je zobrazen na obr. 44. Náležitě srovnání hodnot, které byly naměřeny a vyneseny do grafu na obr. 43 a hodnot vycházejících z normy je uvedeno ve zhodnocení výsledků experimentu.



Obr. 44 Typické dosažitelné hodnoty průměrné výšky prvků profilu do tloušťky 30 mm.

## 9. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Při řezání materiálu S235JR na laserovém řezném centru Amada FO 3015 bylo dosaženo velmi kvalitních výsledků. Při srovnání hodnot naměřených při experimentu a vynesných v grafu na obr. 43 s hodnotami uváděnými v normě ČSN EN ISO 9013 (obr. 44) je na první pohled patrné, že rozdíl u tlustších plechů činí až 2 toleranční pole. To svědčí především o tom, že laserové řezání a jeho kvalita se neustále zvyšují, ale také tento fakt poukazuje na neaktuálnost zmiňované normy.

Po proložení naměřených hodnot přímkou, můžeme sledovat pozvolné narůstání drsnosti v závislosti na řezané tloušťce. Jednotlivé odchylky od lineárního průběhu jsou téměř zanedbatelné. V případě tloušťky plechu 8 mm a 2 mm, jejichž odchylky jsou výraznější, mohly nastat situace, kdy došlo například k zaprskání čočky, nevhodnému nastavení parametrů řezání, apod. Tyto situace by musely být řešeny v momentě, kdy by hodnoty drsnosti zasahovaly do dalšího tolerančního pole. V opačném případě by bylo zkoumání příčin a následné řešení problémů pro firmu pouhou ztrátou času.

Nemalý podíl na kvalitu řezné plochy má také použitý materiál. Z tohoto důvodu se na trhu začínají objevovat firmy zaměřující se na výrobu materiálů speciálně určených k řezání laserem. Jednou z takových firem je například Ruukki. Tato firma dodává materiály zhotovené speciálními technologiemi válcování s garancí přesného chemického složení. Díky tomu má řezaná ocel rovnoměrnou absorpci po celé ploše, což výrazně zvyšuje jakost řezané plochy.

Při našem experimentu byl použit oxidační způsob řezání, při jehož použití bývá ve srovnání s řezáním tavným obvykle jakost povrchu horší. I přes tento fakt výpalky svou drsností nepřekročily hranici 1. tolerančního pole. Z toho vyplývá, že výsledná drsnost řezu je dostatečně nízká, díky čemuž by pro mnohé aplikace již nemusely být použity žádné dokončovací operace.

## 10. ZÁVĚR

Laserové technologie, na které je bakalářská práce zaměřena, patří mezi nejpoužívanější nekonvenční metody výroby. V této práci bylo popsáno několik technologií, při nichž se laser ve strojírenské praxi využívá. Dále byla práce rozdělena na několik na sebe navazujících celků.

Úvod práce byl věnován obecnému seznámení s lasery. Nejprve byla popsána historie laseru, konstrukce laseru, jeho fyzikální princip, vlastnosti paprsku a další témata týkající se obecného popisu laserového zařízení. V této části práce bylo také popsáno rozdělení laserů a byly rozebrány základní typy zařízení používající se ve strojírenství.

Následující část práce se zabývá využitím laseru ve strojírenství, rozdělením a popisem jednotlivých technologií. Zde byla největší pozornost věnována laserovému řezání, protože tato technologie byla použita při zhotovování vzorků použitých v praktické části práce.

Posledním obecně zaměřeným úsekem práce byl popis jednotlivých parametrů, využívajících se při měření drsnosti. V této části byl také stručně popsán princip měření drsnosti a rozdělení jednotlivých využitelných metod.

Součástí této bakalářské práce byla také praktická část, jejímž úkolem bylo proměření drsnosti několika vzorků řezaných na laserovém centru Amada FO 3015. Tyto vzorky byly zhotoveny z materiálu S235JR a měly rozdílnou tloušťku. Naměřené drsnosti byly následně srovnány s normou ČSN EN ISO 9013 a podrobně zhodnoceny. Hlavním závěrem měření bylo zjištění, že na současných laserech je dosahováno mnohem kvalitnějších řezných ploch, než udává norma.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AMADA AMERICA, Inc. *Cutting know-how: for amada lasers*. Los Angeles, 2011.
2. Amada. *Iwanaka.net* [online]. 2010 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://iwanaka.net/>
3. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB KN20020910012. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
4. *Citace.com* [online]. 2009 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: [www.citace.com](http://www.citace.com)
5. ČSN 41 1375. *Ocel 11 375*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
6. ČSN 42 0209. *Plechý tlusté z ocelí tříd 10 až 16 válcované za tepla*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
7. ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
8. FO-3015 II NT laser cutting machine. *Amada.de* [online]. 2010 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://amada.de/default.asp?fid=605&sid=126&L=2>
9. HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství*. Brno, 2008. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5663](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5663). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
10. CHPS S.R.O. *Chps* [online]. 2008 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.chps.cz>
11. INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání*. Brno, 2011. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39787](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39787). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
12. JANEČKO, Ondřej. *KONTROLA STRUKTURY POVRCHU*. Brno, 2010. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28678](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28678). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jiří Perníkář, Csc.
13. KACHTÍK, Lukáš. *Laser* [online]. 2009 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.lasery.wz.cz/>
14. KAVAN, Petr. *Analýza a využití laseru při obrábění*. Brno, 2009. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18069](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18069). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Csc.



15. KOLKOP, Jaroslav. *Technologie řezání laserem*. Brno, 2010. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26869](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26869). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
16. KOŘÁŇ, Pavel a Miroslav NOVÁK. Seriál na téma lasery. *Lasery a optika* [online]. 2002 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech.htm>
17. KRAMOLIŠ, Lukáš. *Laserové řezání s podporou vzduchu*. Brno, 2010. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27990](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27990). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
18. KUNZ, Jiří. *Technologické vlivy na parametry struktury povrchu obrobené plochy*. Brno, 2008. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5677](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5677). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Prokop, Csc.
19. Laser. *Wikipedie.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
20. Laser. *Britannica.com* [online]. 2010 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/330874/laser/256336/History>
21. Laserart. *Laserart* [online]. 2010 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: [http://www.laserart.wbs.cz/Historie\\_laseru.html](http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html)
22. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
23. Materiály získané při osobních konzultacích.
24. Microtes. *Microtes* [online]. 2009 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://www.microtes.cz/>
25. PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno, 2010. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=30527](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30527). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.
26. ŘASA, Jaroslav a Kerečaninová ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění. *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
27. ŘASA, Jaroslav a Kerečaninová ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

28. ŘASA, Jaroslav a Kerečanicinová ZUZANA. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
29. ŘASA, Jaroslav a Kerečanicinová ZUZANA. Leštění povrchu laserem. *Mmspektrum.com* [online]. 2008 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lesteni-povrchu-laserem.html>
30. *Strojnické tabulky* [online]. 2005 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://www.strojnicke-tabulky.cz/>
31. *Svarinfo* [online]. 2006 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://svarbazar.cz/phprs/index.php>
32. SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2003. ISBN 80-7196-307-0.
33. ŠULC, Jan. PLS LASER SYSTEMS SPOL. S R.O. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. Praha, 2004.
34. TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: část 1*. Ostrava, 2004. Dostupné z: <http://www.346.vsb.cz/346.vsb.cz/STROJ%C3%8DRENSK%C3%81%20METROLOGIE-1.d%C3%ADl.pdf>. Studijní literatura. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
35. TRUMPF. *Technical information: Laser processing*. Ditzingen, 2007.
36. VOJTA, Filip. *Princi laseru*. České Budějovice, 2003. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>. Seminární práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce Ing. Jiří Konečný, Csc.
37. Wiki. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2005 [cit. 2012-03-29]. Dostupné z: <http://www.laser.zcu.cz/wiki>
38. ZAJÍČEK, Ondřej. *Vliv technologických parametrů na kvalitu řezné plochy při laserovém řezání*. Zlín, 2010. Dostupné z: [http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13246/zaj%C3%AD%C4%8Dek\\_2010\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13246/zaj%C3%AD%C4%8Dek_2010_bp.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.
39. ZLESÁK, Jakub. *Trendy vývoje laserové technologie*. Brno, 2008. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6067](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6067). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osíčka.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	tloušťka řezu	[mm]
b	skluzová rýha	[-]
c	směr posuvu	[-]
C	velikost otřepů	[mm]
CAD	počítačově podporované navrhování	[-]
CAM	počítačem podporovaná výroba	[-]
ČSAV	Československá akademie věd	[-]
f	vzdálenost mezi dvěma body dvou skluzových rýh	[mm]
IR	infračervená spektrální oblast	[-]
ln	vyhodnocovací délka	[mm]
lr	základní délka	[mm]
n	vzdálenost mezi dvěma body skluzové rýhy	[mm]
Ra	střední aritmetická úchylka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rc	průměrná výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rku	špičatost posuzovaného profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rp	největší výška výstupku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	průměrná kvadratická úchylka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rsk	šikmost profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
RSm	průměrná šířka prvků profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rt	celková výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	největší hloubka prohlubně profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	největší výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz5	základní drsnost	[ $\mu\text{m}$ ]
s	tloušťka materiálu	[mm]
$s_x$	bodový odhad směrodatné odchylky	[-]
v	rychlost řezání	[m/min]
$\bar{X}$	bodový odhad střední hodnoty	[-]
Xs	šířka prvku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Zp	výška výstupku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Zt	výška prvku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Zv	hloubka prohlubně profilu	[ $\mu\text{m}$ ]