

# Vliv technologických parametrů na kvalitu řezné plochy při laserovém řezání

Zajíček Ondřej

---

Bakalářská práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Ondřej ZAJÍČEK

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Vliv technologických parametrů na kvalitu řezné plochy při laserovém řezání

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická studie konvenčních metod dělení materiálu stříháním a progresivních technologií dělení materiálů
2. Experimentální řezání plechů laserem za různých technologických podmínek
3. Hodnocení jakosti povrchu v závislosti na technologických podmínkách
4. Statistické vyhodnocení a rozbor výsledků

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- MAŇKOVÁ, I. *Progresivne technologie*, Vienala, Košice, 2000.
- MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 1999. 102 s.
- NOVOTNÝ, J. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980. 213 s.
- SRP, K. *Základy lisování*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 247 s

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

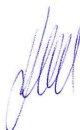
Datum zadání bakalářské práce:

**19. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**2. června 2010**

Ve Zlíně dne 21. ledna 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*vedoucí katedry*

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na porovnání metod laserového řezání, mechanického stříhání a jejich vlivu na řeznou plochu.

Teoretická část je zaměřena především na princip a sestavení laserového zařízení, možnosti laserového řezání a jeho využití. Praktická část je zaměřena na měření drsnosti řezné plochy a vyhodnocení naměřených výsledků.

Klíčová slova: Laser, Laserové řezání, Technologické parametry, Řezná plocha

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is focused on the confronts method of laser cutting, mechanical cutting and their influence on cutting surface.

Theoretical part is sign above all on working principle and compilation of laser devices, possibility of laser cutting and his utilization. Experiment in practical part is dealing with roughness measurement of shear surface and evaluation of measured data.

Keywords: Laser, Laser cutting, Technological parameters, Cutting surface

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 10. 5. 2010

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

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

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

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

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

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

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

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

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

Děkuji vedoucímu svému bakalářské práce Ing. Ondřeji Bílkovi PhD. za odborné vedení práce, rady a čas, který mi poskytnul.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské 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 PŘEHLED VYBRANÝCH METOD NMO .....	12
1.1.1 Elektroerozivní drátové řezání.....	12
1.1.2 Anodomechanické řezání.....	12
1.1.3 Řezání elektronovým paprskem.....	13
1.1.4 Řezání paprskem plasmu .....	13
1.1.5 Obrábění vysokotlakým kapalinovým paprskem.....	14
1.1.5.1 Kapalinový (vodní) paprsek.....	14
1.1.5.2 Kapalinový (vodní) paprsek s abrazivní příměsí .....	15
<b>2 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ</b> .....	<b>16</b>
2.1 HISTORIE LASERU .....	16
2.2 PRINCIP LASERU .....	17
2.2.1 Stavba laserového zařízení .....	18
2.2.1.1 Laserová hlavice: .....	19
2.2.1.2 Budící zařízení: .....	19
2.2.1.3 Zdroj energie buzení: .....	19
2.2.1.4 Chladicí zařízení:.....	19
2.3 ROZDĚLENÍ LASERU PRO TECHNOLOGICKÉ OPERACE.....	20
2.3.1 Dělení podle použité aktivní látky (aktivního prostředí).....	20
2.3.2 Dělení podle použité vlnové délky.....	22
2.3.3 Dělení podle emise záření.....	22
2.4 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (DĚLENÍ) MATERIÁLŮ .....	22
2.5 METODY LASEROVÉHO DĚLENÍ MATERIÁLU.....	24
2.5.1 Laserové protavování.....	24
2.5.2 Laserové sublimační řezání.....	24
2.5.3 Laserové pálení.....	25
2.6 PLYNY PRO ŘEZÁNÍ LASEREM .....	26
2.6.1 Kyslík .....	26
2.6.2 Dusík .....	26
2.6.3 Argon .....	26
2.6.4 Směsné plyny .....	27
2.7 KRITÉRIA HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM.....	27
2.8 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA KVALITU ŘEZNÉ PLOCHY .....	30
2.9 VÝHODY A NEVÝHODY LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ.....	33
<b>3 TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO STRÍHÁNÍ</b> .....	<b>34</b>



3.1	STŘIŽNÝ PROCES .....	34
3.2	SÍLY PŘI STŘÍHÁNÍ .....	36
3.3	STŘÍHÁNÍ TENKÝCH PLECHŮ .....	37
3.3.1	Způsoby stříhání.....	37
3.3.2	Stříhání pružným prostředím .....	38
3.3.2.1	Nástroj na stříhání pryží .....	39
3.4	STŘÍHÁNÍ TLUSTÝCH PLECHŮ .....	39
3.4.1	Stříhání za studena .....	39
3.4.2	Stříhání za tepla .....	40
3.5	PŘESNÉ VYSTŘIHOVÁNÍ .....	40
3.5.1	Princip přesného vystřihování.....	40
3.5.2	Způsoby vystřihování s kvalitní střížnou plochou .....	41
3.5.3	Vystřihování se zaoblenými střížnými hranami.....	41
3.5.4	Vystřihování se zkoseným přídržovačem .....	41
3.5.5	Přistřihování.....	42
3.5.6	Přesné vystřihování .....	42
3.6	JAKOST STŘIŽNÉ PLOCHY .....	43
3.7	SROVNÁNÍ MECHANICKÉHO STŘÍHÁNÍ A LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ .....	44
<b>4</b>	<b>SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>45</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>SPECIFIKACE ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ, LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ A MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>47</b>
5.1	VZORKY A JEJICH ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	47
5.2	SPECIFIKACE ŘEZACÍCH STROJŮ .....	48
5.3	SPECIFIKACE MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ .....	49
5.3.1	Mitotuyo surfest SJ-301 .....	50
5.3.2	ProScope HR.....	50
<b>6</b>	<b>POPIS MĚŘENÍ.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>53</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>66</b>

## ÚVOD

Už od počátku si lidstvo zjednodušovalo práci za pomoci fyzikálních zákonů, kterým se snažilo porozumět a využít jejich možnosti ve svůj prospěch. Nutno říct, že tomu tak bylo i v případě LASERU. Lidé, tak jako v mnoha jiných případech, se naučili ovládat síly, které zde byly dávno před nimi. Dnes již víme, že mnohé MASERY a LASERY se vyskytují v mezihvězdném prostoru přirozeném stavu již milióny let.

Není to tak dávno co pojem LASER, patřil do oblasti science fiction. Avšak dnes je pojem LASER všeobecně znám a našel si své místo i ve všedních oblastech lidského života, nebo i těch nevšedních velmi rychle. Ať už jde o jeho využití ve vědních oborech přírodních nebo technických, LASER pomohl posunout výzkum dopředu. Ale nepomohl jen objevovat metody nové, ale také zdokonalovat ty staré, které se s příchodem LASERU staly zastaralými nebo byly odsunuty na pomyslnou vedlejší kolej.

V mé bakalářské práci, se budu věnovat především pojmu laserového řezání jako nahrazení metody mechanického stříhání (vystřihování), jejich vzájemného porovnání a to z pohledu vlivu těchto metod na střižné, popř. řezné plochy.

V teoretické části se tedy budu zabývat seznámením se s laserem, jeho vlastnostmi a využitím. Dále se seznámím se stříháním a procesy, které při něm probíhají. To by nám mělo více osvětlit hlavní rozdíly právě mezi mechanickým stříháním a laserovým řezáním.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Pro souhrnný název nekonvenční metody obrábění (NMO) zahrnujeme způsoby obrábění, které na rozdíl od klasického třískového obrábění v převážné míře nepoužívají mechanické práce pro úběr materiálu. K úběru materiálu využívají tepelných, elektrických, chemických, ultrazvukových a jiných fyzikálních jevů, nebo jejich kombinací.

K rozvoji nekonvenčních metod přispěli zejména požadavky zbrojního a kosmického průmyslu na obrábění obtížně obrobitelných materiálů nebo složitých tvarů. V těchto oblastech průmyslu, byly soustředěny potřebné finanční prostředky a vědeckovýzkumné kapacity pro úspěšné dokončení vývoje a zavedení nových zařízení do výrobní praxe. Jednotlivé NMO se pak rozšířily do všech odvětví strojírenské výroby a jejich další vývoj neustále pokračuje. [1]

### 1.1 Přehled vybraných metod NMO

#### 1.1.1 Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivní řezání drátovou elektrodou patří k nejrozšířenějším nekonvenčním metodám obrábění a je využíváno zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, šablon a řady dalších plochých součástí z kovových materiálů.

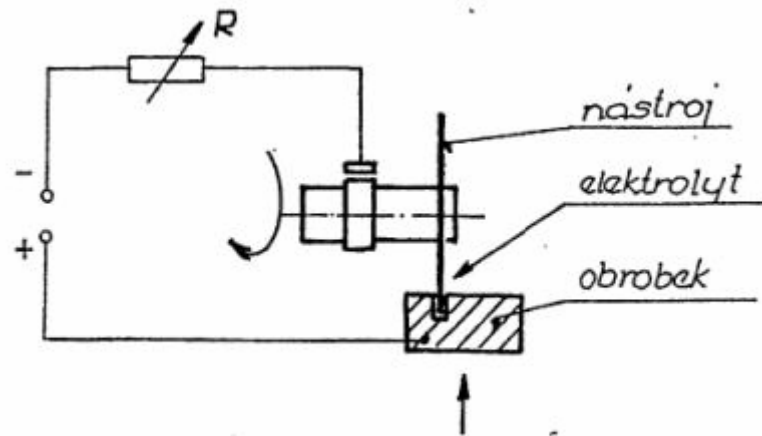
Elektroeroze probíhá mezi nástrojovou elektrodou, kterou vytváří tenký drát převíjený pomocí speciálního zařízení a obráběnou součástí, připojenou ke generátoru jako elektroda opačné polarity. [1]

#### 1.1.2 Anodomechanické řezání

Při anodomechanickém řezání (Obr. 1) dochází ke kombinaci účinků jak elektroerozivního tak i elektrochemického úběru materiálu. Obrobek je připojen na plus pól stejnosměrného zdroje a je přitlačován malou silou k povrchu nástroje (- pól), rotujícímu ocelovému kotouči nebo pásu (pásová pila). Elektrolyt, nejčastěji křemičitan sodný ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  - vodní sklo) vytváří pasivační vrstvu zabraňující přímému kontaktu nástroje s obrobkem.

Nástroj stírá tuto vrstvu v místech, které nejvíce vyčnívají nad povrch, vznikají elektrické výboje a dochází k odtavení materiálu na stykové ploše. Přiváděným elektrolytem se pasivační vrstva obnovuje a výboje se opakují. Vzhledem k podmínkám vhodným pro elektrolyzu tvoří menší složku úběru elektrochemické rozpouštění.

Anodomechanické řezání je používáno pro dělení obtížně obrobitelných kovových materiálů a SK. Nevýhodou je nekvalitní a nepřesný řez. Konkurenční a podstatně dokonalejší metodou pro dělení SK je řezání diamantovým rozbrušovacím kotoučem. [1]



Obr. 1. Anodomechanické řezání [1]

### 1.1.3 Řezání elektronovým paprskem

Obrábění elektronovým paprskem má velmi speciální charakter a je zejména využíváno v leteckém a kosmickém průmyslu a v oblasti technologie výroby polovodičů a mikroelektronických prvků.

Podstatou zařízení je elektronové dělo, které slouží ke generaci, urychlení a zaostření svazku elektronů. Pro zachování parametrů elektronového paprsku při průchodu pracovní komorou je nutno v zařízení vytvořit vakuum. Urychlený svazek elektronů předá svoji kinetickou energii při dopadu na obráběný materiál ve formě tepla. Dochází k lokálnímu přehřátí, natavení a případně i k odpaření materiálu. [1]

### 1.1.4 Řezání paprskem plasmy

Technologie řezání materiálu paprskem plasmy je již používána od poloviny padesátých let. V posledních letech došlo k podstatnému zdokonalení a následnému rychlému rozvoji uplatnění této metody, která v řadě případů předčí jiné tepelné dělicí technologie. Plasmové obrábění je založeno na tavení řezaného materiálu teplotou vyšší než  $10000^{\circ}\text{C}$ . V elektrickém oblouku, který hoří mezi netavící se elektrodou (katoda) a řezaným materiálem (anoda) dochází k rozkladu molekul plynu s vysokým vývinem tepla. Z hořáku vychází vysokou rychlostí úzký paprsek plasmy (plynného stavu hmoty), který je zionizován a v důsledku

toho dobře vodivý pro elektrický proud. Materiál se taví a je kinetickou energií proudu vytlačován z místa řezu. [1]

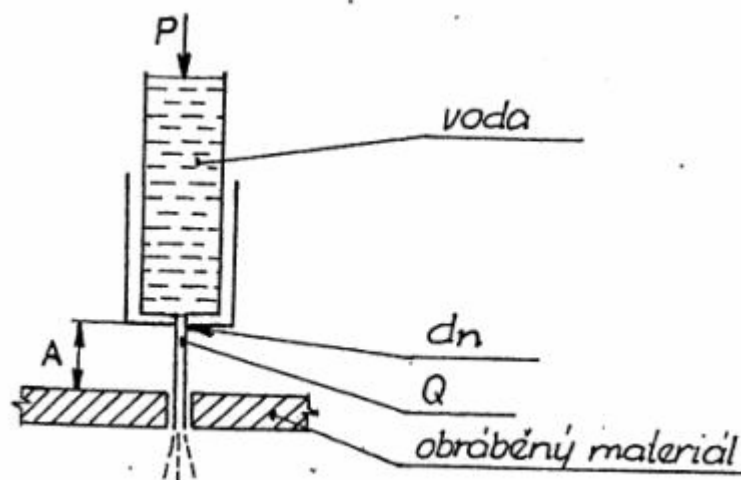
### 1.1.5 Obrábění vysokotlakým kapalinovým paprskem

Technologie VKP je založena na využití abrazivních účinků vysokoenergetického kapalinového (vodního) paprsku pro obrábění, (dělení) materiálu. Byla vyvinuta a propracována při vývoji technologie zpracování netradičních, převážně nekovových materiálů použitých při stavbě raketoplánů v USA. Vzhledem ke svým mimořádným přednostem našla tato technologie velmi rychle uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu a díky své univerzálnosti pak v celé řadě různých průmyslových oborů. Velmi dobré zkušenosti s obráběním pomocí VKP byly získány i v ČR. [1]

#### 1.1.5.1 Kapalinový (vodní) paprsek

Tlak kapaliny je možno plynule regulovat podle technologických potřeb a druhu obráběného materiálu. Vodní trysky jsou vyráběny ze safíru, rubínu nebo diamantu. Velikostní řada trysek zajišťuje různou kinetickou energii paprsku a určuje také počet pracovišť, které je možno současně napájet z jednoho zdroje. Životnost trysek při nadzvukové rychlosti výtoku kapaliny (asi 1000 m.sec ) je přímo úměrná množství minerálů obsažených ve vodě a je v rozmezí 50-500 hod.

Je možno řezat materiály menších tloušťek (do 5-15 mm) i s vysokou pevností, např. kevlarů (aramidem vyztužené epoxidové pryskyřice), laminátů, azbestocementů, uhlíkových kompozitů, sklotextitů, gumotextitů a pod. [1]



Obr. 2. Schéma řezání kapalinovým paprskem [1]

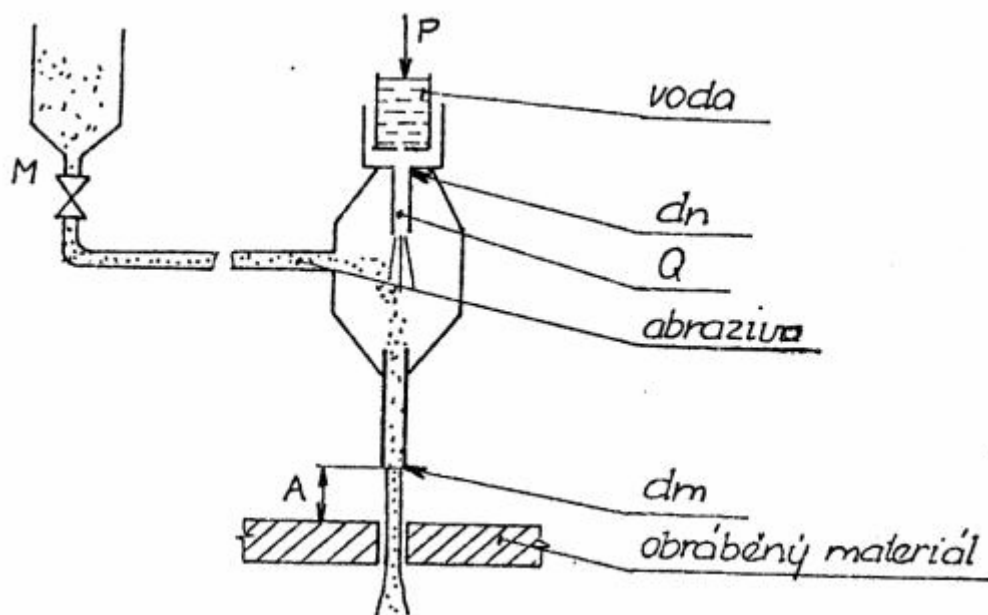
### 1.1.5.2 Kapalinový (vodní) paprsek s abrazivní příměsí

Při této variantě VKP se zvyšuje účinnost paprsku přidáním abrazivních zrn do proudu vody.

Používají se jak syntetické tak i přírodní abrazivní materiály jako jsou křemičitý písek používaný při výrobě skla, korundová nebo SiC zrna používaná k výrobě brusných nástrojů, granát, olovín aj. o zrnitosti 0,2-0,5 mm.

Výstupní abrazivní tryska musí odolávat vysokým abrazivním účinkům a je vyráběna z karbidu wolframu, keramických materiálů na bázi korundu nebo z kubického nitridu bóru. Při použití běžných parametrů, tj. tlaku vody 200 MPa a křemičitého písku o zrnitosti 0,4 mm dosahuje životnost trysky max. 8 hod.

Rychlost řezání se obvykle stanovuje optimalizační zkouškou. Vzdálenost výstupní trysky od materiálu se volí co nejmenší z důvodů minimální šířky spáry a tím i dosahované přesnosti. [1]



Obr. 3. Schéma řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí [1]

## 2 LASEROVÉ ŘEZÁNÍ

Laserové řezání, patří samozřejmě také do oblasti NMO. V dnešní době se zařazuje jednoznačně k nejrozšířenějším nekonvenčním metodám vůbec. Laserové řezání má výhodu v širokém spektru materiálů, které jimi můžeme obrábět, účinnosti technologie, úspoře materiálu atd..

### 2.1 Historie laseru

Historie laseru začíná v roce 1917, kdy Albert Einstein ukázal, že kromě jevů jako jsou spontánní emise a absorpce, musí existovat ještě stimulovaná emise. Následující krok směrem k vynálezu laseru udělal ruský fyzik V.A. Fabrikant, který v roce 1939 poukázal na možnost použití stimulované emise k zesilování elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Později v roce 1951, spolu s M.M.Vudynským a F.A.Butajevovou přihlásili patent na metodu zesilování elektromagnetického záření (ultrafialového, viditelného, infračerveného a pásma radiových vln) tím způsobem, že záření prochází prostředím, ve kterém je vytvořen nerovnovážený stav. Stav takového charakteru, že je preferováno obsazení horních energetických stavů atomů. popř. jiných elementů prostředí.

Poprvé byla tato idea realizována pro zesilování záření v mikrovlnné oblasti. V roce 1952 moskevští fyzikové N.G.Basov a A.M.Prochorov na konferenci o radiospektroskopii referovali o molekulárním svazkovém generátoru – MASER (Mikrowave Amplification by Stimulated Emission of Radiation - zesílení mikrovln s využitím stimulované emise záření). Prakticky současně byla vyjádřena myšlenka použití stimulované emise k zesílení a generaci vln americkým fyzikem Ch.H.Townesem. V roce 1954 byl sestaven první molekulární generátor. Realizace maseru dala vznik novému vědnímu oboru – kvantové elektronice. Basov, Prochorov a Townes dostali společně za vynález maseru Nobelovu cenu v roce 1964.

Mezi realizací prvního maseru a prvního laseru (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, zesílení světla pomocí vynucené emise záření) uplynulo šest let. V roce 1955 Basov a Prochrov navrhli optické buzení a prostředek pro dosažení populační inverze. V roce 1957 pak Basov uvažoval o využití polovodičových materiálů pro kvantové oscilátory a realizoval optický rezonátor leštěnými planparalelními stěnami na polovodičovém čipu. V téže roce Fabrikant a Butajevová pozorovali zesílení optického záření v experimentu s



elektrickým výbojem procházejícím směsí par rtuti, vodíku a helia. V roce 1958 Prochorov, Schawlow a Townes vyslovili nezávisle na sobě ideu, že jev stimulované emise, užitý v maseru, může být použit i v infračervené a optické oblasti spektra. R.H.Dicke (Princeton University) navrhl použití otevřeného rezonátoru pro realizaci kladné zpětné vazby v optické oblasti. V roce 1960 Theodore Maiman publikoval článek o generaci záření ve viditelné oblasti světla v rubínové tyči. Byl vynalezen rubínový laser. V téže roce (1960) A.Javan, W.R.Bennett a D.R.Herriott demonstrovali laserovou akci ve směsi plynů helia a neonu. V roce 1960 se podařilo zkonstruovat první vodíkový maser. Od roku 1961 začal bouřlivý vývoj různých typů laserů zároveň s vývojem laserové technologie. První polovodičový laser byl sestaven v roce 1962. V Československé republice se maser objevil v roce 1962 a laser o rok později. [5]

## 2.2 Princip laseru

Laser je vlastně generátorem záření v optické oblasti vlnových délek při využití stimulovaného záření. Podstatu laseru je možno objasnit na základě pojmů kvantové fyziky a zjednodušeného planetového modelu atomu.

V tomto modelu okolo kladně nabitého jádra (protonu) obíhají na uzavřených drahách elektrony podléhající elektrostatickým silám. Každé dráze přísluší určité množství energie (energetická hladina). Čím je dráha elektronu bližší jádru, tím je jeho energie menší. U atomu v základním stavu zaujímají všechny elektrony nejnižší energetické hladiny, příslušné drahám o nejmenších poloměrech. Přejít elektronu ze základní energetické hladiny  $E_0$  na vyšší  $E_1$  vyžaduje absorpci a přechod v opačném směru emisi určité hodnoty energie (Obr. 4). Toto přesné množství energie nazývané kvantem je v podstatě elektromagnetickým zářením o určité frekvenci  $\nu$ , která se určí z rovnice

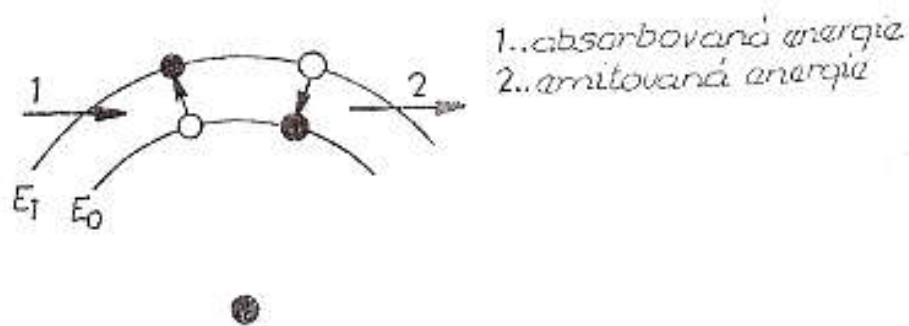
$$E_1 - E_0 = h \cdot \nu \quad (1)$$

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

Znamená to tedy, že atomu, kterému bylo dodáno určité množství energie se vrátí do základního stavu, tj. na nižší energetickou hladinu, odevzdáním přebytečné energie, například spontánní emisí ve formě elektromagnetického záření (světelné záření rozžhaveného předmětu). Energie ve formě elektromagnetického vlnění, elektronového záření nebo ionového

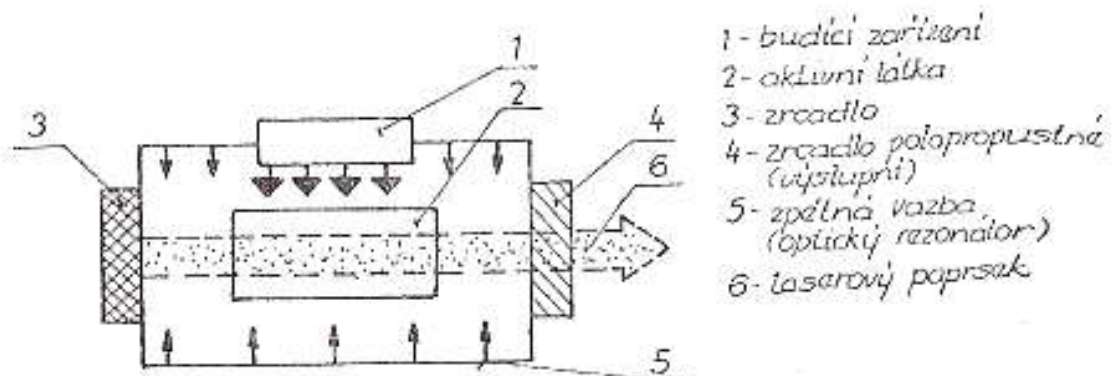
záření excituje (budí) atomy tuhé, kapalné nebo plynné aktivní látky, ve které nastane inverzní stav.

Přechodem atomů této látky do základního stavu vznikne stimulovanou emisí monochromatické (jednobarevné, tj. s jedinou vlnovou délkou) koherentní (vzájemně související světelné paprsky se společným původem v jediném zdroji) záření, jednoduše ovládané optickými čočkami a zrcadly. Světelný paprsek (svazek paprsků.) při dopadu na překážku přemění svoji energii na tepelnou. [1]



Obr. 4. Přechod elektronu [1]

Princip laseru si můžeme popsat pomocí Obr. 5



Obr. 5. Princip laseru [1]

### 2.2.1 Stavba laserového zařízení

Hlavní části každého laseru jsou:

### 2.2.1.1 Laserová hlavice:

Která obsahuje,

- Laserové médium: může být pevné, kapalné, popř. to mohou být páry. Určuje vlnovou délku vlny záření.
- Rezonátor: optický systém umožňující zformovat a zesílit záření. Optický rezonátor se vždy sestává nejméně ze dvou zrcadel. [3]

### 2.2.1.2 Budící zařízení:

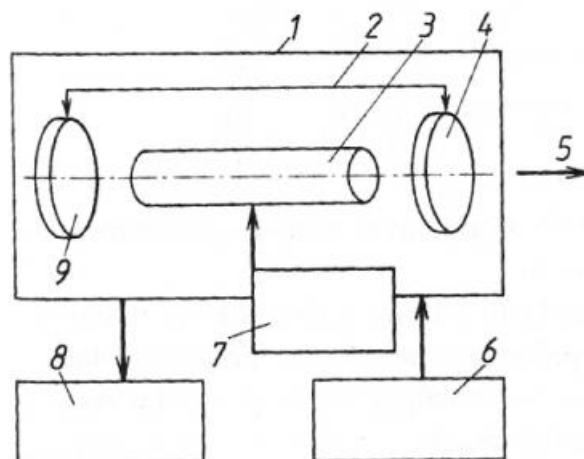
Ovlivňuje pracovní režim laseru, způsob buzení je dán laserovým médiem. Plyné médium je téměř vždy buzeno elektrickým výbojem (podobně jako u zářivek). Pevné laserové médium nejčastěji buzeno lampami (výbojkami). [3]

### 2.2.1.3 Zdroj energie buzení:

Jedná se o speciální druh síťového napáječe. [3]

### 2.2.1.4 Chladicí zařízení:

Odvádí nevyužitou energii, která se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laseru se nejčastěji používá chlazení vodou. [3]



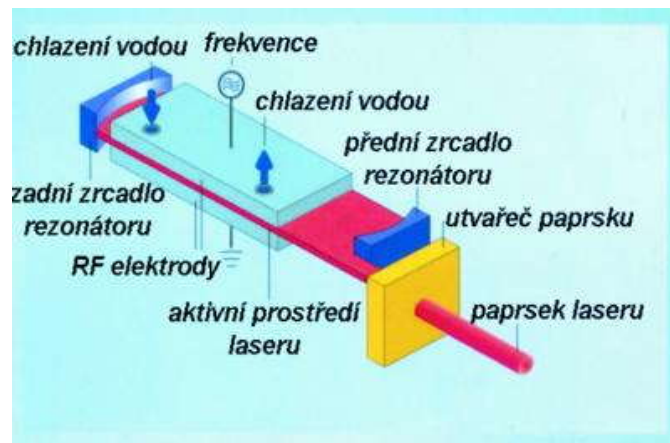
Obr. 6. Schéma zařízení pro obrábění laserem [8]

- 1 – laserová hlavice, 2 – rezonátor, 3 – laserové médium, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – výstup paprsku, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budící zařízení, 8 – chladicí systém, 9 – nepropustné zrcadlo

## 2.3 Rozdělení laseru pro technologické operace

### 2.3.1 Dělení podle použité aktivní látky (aktivního prostředí)

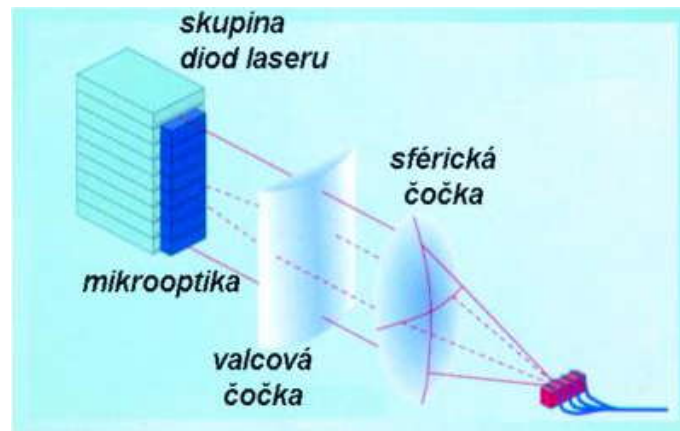
- Plynné: aktivní prostředí plynového laseru je v plynné fázi, tyto lasery pracují v kontinuálním i pulzním režimu. Do této skupiny patří helium-neonový laser, měděný laser, jódový laser, argonový laser, helium-kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser, excimerové lasery a CO<sub>2</sub> lasery. Z uvedených laserů se helium-neonový laser používá např. v měřicí technice. V technologii opracování materiálů se používají především CO<sub>2</sub> lasery (Obr. 7) pro řezání a svařování a excimerové lasery pro popísování, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchů strojních součástí i uměleckých děl a vrtání děr od průměru 10 μm.



Obr. 7. Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru [7]

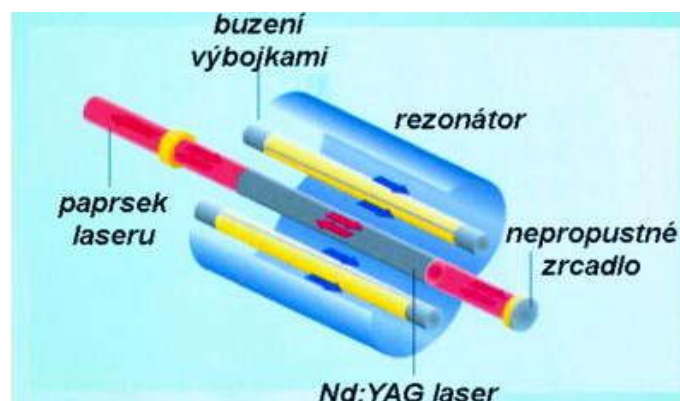
- Polovodičové: aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek. Typickými představiteli polovodičových laserů jsou: polovodičový laser buzený svazkem elektronů a injekční polovodičový laser, kde je buzení prováděno elektrickým polem. Polovodičové lasery mohou mít výstupní výkon 30 W až 6 kW. U vysoce výkonných diodových laserů má vystupující paprsek tvar obdélníkové plochy. Laser o výstupním výkonu 150 W má po zaostření rozměr stopy 0,6 x 1,2 mm. Lze jej však zaostřit i na 1,3 x 1,3 mm nebo na stopu ve tvaru kruhu

o průměru 1,5 mm. Polovodičové lasery (obr. 4) se používají především pro svařování, tepelné zpracování a nanášení povlaků.



Obr. 8. Konstrukce polovodičového laseru [7]

- V pevné fázi: Aktivním prostředím v pevnolátkovém laseru je pevná opticky propustná látka - krystaly, oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, tungstáty, molybdáty, vanadáty, beryláty, sklo a keramika. Do této skupiny patří rubínový laser, neodymový laser, Nd:YAG laser, Nd:YLF laser, Er:YAG laser a Ho/CTH:YAG laser. Dnes nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru je Nd:YAG laser (obr. 3). Laser pracuje jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. Je vhodný pro vrtání, sváření, řezání a popisování. V lékařství se používá kontinuální Nd:YAG laser jako skalpel v chirurgii a pulzní Nd:YAG laser v oční mikrochirurgii. Dále se používá v radarové technice a ve spektroskopii. [7]



Obr. 9. Konstrukce Nd:YAG laseru [7]

- Kapalinové: laserovým médiem jsou roztoky organických barviv, nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Účinnost je řádově desítky procent. Použití

kapalinových laseru je především ve spektroskopii, neboť umožňují především naladění přesné vlnové délky. [3]

### 2.3.2 Dělení podle použité vlnové délky

Používají se lasery s vlnovou délkou v intervalu 0,4-10,6  $\mu\text{m}$ . Vlivem soustředění energie do průměru 0,05-0,25 mm je hustota energie větší než  $10^8 \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a teplota v místě dopadu na materiál dosahuje hodnoty až  $25\cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ . [1]

### 2.3.3 Dělení podle emise záření

Provoz laseru (emise záření) je možný buď v kontinuálním nebo pulsním režimu. Pulsní provoz umožňuje dosáhnout velké hustoty energie pro zvýšení absorpce záření v materiálech s velkou odrazivostí, snížení objemového ohřevu materiálu v důsledku krátké doby interakce paprsku s materiálem a provedení řady vysokorychlostních operací při schopnosti rychlého zažhání a zhasínání paprsku, výsledek působení laseru na materiál je ovlivněn řadou technických a technologických parametrů. [1]

## 2.4 Laserové řezání (dělení) materiálů

Pro řezání se nejvíce používají lasery ND:YAG s výkony do 800 W a CO<sub>2</sub> lasery o výkonu do 3-4 kW s možností pracovat jak v kontinuálním tak i v pulsním provozu. [1]

Laser je možné považovat za univerzální nástroj pro technologii řezání (tepelné dělení materiálů), vhodný pro sériovou a malosériovou výrobu, pro dodávky JIT (Just in Time) a též pro výrobu v dávkách.

Řezání a gravírování (vyrývání tvarů, dekorování) patří mezi nejvyužívanější procesy laserového obrábění.

Z technologického hlediska existují dvě metody řezání:

- řezání/dělení materiálů (obvykle se používá pro plechy a jiné tenké materiály).
- tvoření drážky na povrchu materiálu a potom jeho lom (kontrolovaný lom), aplikuje se na křehké materiály jako sklo a keramika.

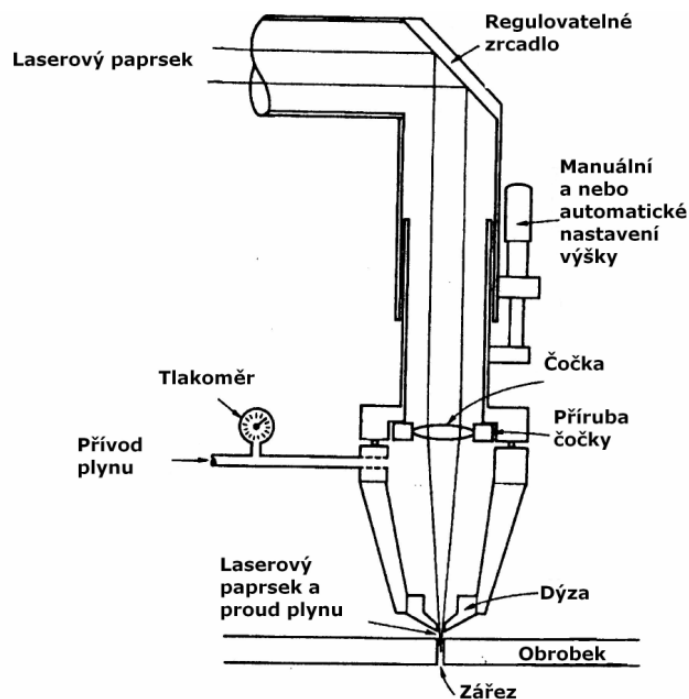
Na řezání se nejvíc používají CO<sub>2</sub> lasery, většinou v kontinuálním režimu. Řezání/dělení laserem je odstraňování materiálu postupnými působeními paprsku a proudu plynu, obvykle kyslíku (O<sub>2</sub>), dusíku (N<sub>2</sub>), stlačeného vzduchu, argonu (Ar) a/nebo hélia (He).

Hlavní mechanismus úběru řezání laserem se skládá z:

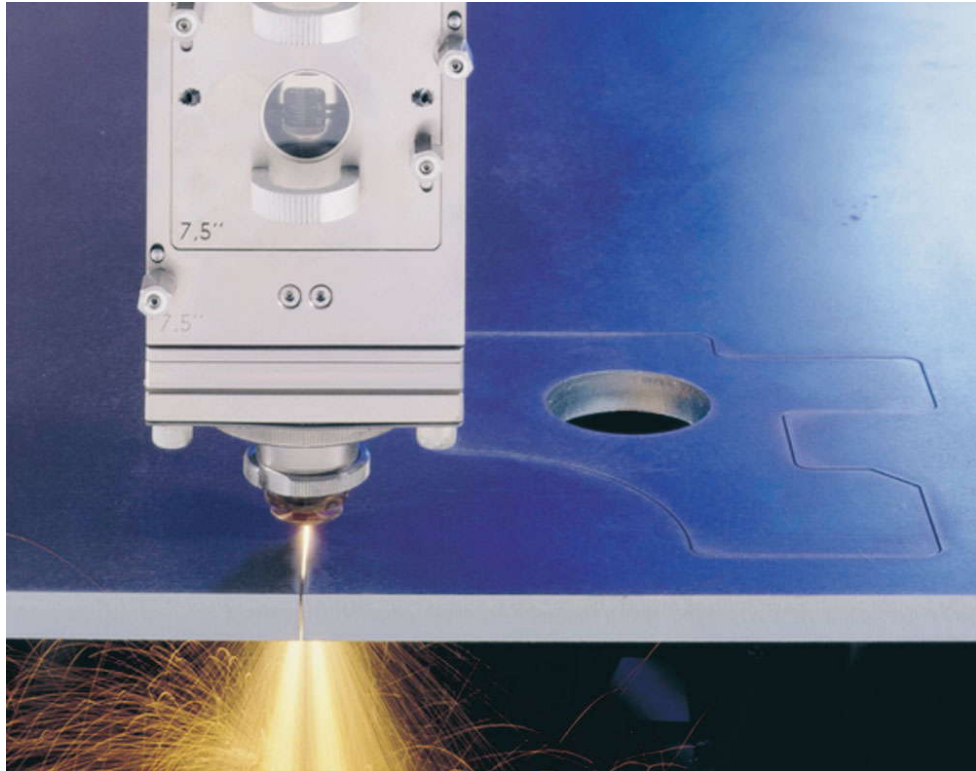
- erozivního účinku vysokoenergetických částic fotonů na povrch materiálu,
- lokálního natavení povrchu,
- odstranění taveniny odpařením a/nebo pomocí přídavného stlačeného plynu, který tlakem odstraňuje (doslovně vyfukuje) natavené částice materiálu ze zóny řezání.

Řez vzniká v tavenině stříhem/smykem, působením tlaku přídavného plynu, který je vedený koaxiálně s laserovým paprskem. I když větší část taveniny je vytlačena ze zářezu (řezné spáry), vysoká jakost povrchu je závislá na povrchovém napětí materiálu. Pro řezání je laser vybavený tzv. řezací hlavicí (Obr. 10), která chrání optiku před poškozením a zároveň přivádí pomocný anebo ochranný plyn do zóny řezání.

Volba přídavného plynu závisí od materiálu dílce. Pro kovy a uhlíkové ocele se používá kyslík, vzduch a inertní plyny se používají pro nekovy a plasty (plexisklo, polypropylén). Kromě inertních plynů a kyslíku se používá též dusík, zejména pro řezání nekovových materiálů (PVC, textil apod.). Dusík chrání řezné plochy před spálením a vznícením. [4]



Obr. 10. Schéma laserové řezací hlavy [4]



Obr. 11. Laserové zařízení při řezání [9]

## 2.5 Metody laserového dělení materiálu

### 2.5.1 Laserové protavování

Při absorpci fokusované energie laserového paprsku do ohniska o průměru 0,05-0,25 mm dochází k ohřevu materiálu nad teplotu tavení. Roztavený materiál je ze spáry odstraňován proudem inertního plynu vedeného tryskou koaxiálně s laserovým paprskem. U nekovových materiálů, které snadno hoří (např. plexisklo, polypropylen, PVC atd.) se používá inertních plynů např. argonu nebo dusíku jako ochrany proti vznícení nebo opálení řezných hran. Tato metoda je charakteristická vysokou rychlostí řezání a nízkou spotřebou energie na jednotku délky řezu. Na řezu jsou patrné stopy po odběru materiálu a v některých případech kapičky rozstříknutého kovu na spodní straně řezaného polotovaru. [1]

### 2.5.2 Laserové sublimační řezání

Fokusovaný laserový paprsek ohřívá materiál na teplotu odpaření. Vznikající páry jsou z řezné spáry odstraňovány proudem inertního plynu z trysky. Metoda je charakterizována úzkou



řeznou spárou a vysokou jakostí řezu. Ve srovnání s laserovým protavováním je však spotřeba energie na jednotku délky řezu větší. [1]

### 2.5.3 Laserové pálení

Materiál je v místě dopadu fokusovaného laserového paprsku ohřát na zápalnou teplotu a spálen v proudu aktivního plynu nejčastěji kyslíku. Oxidační účinek se projevuje jednak počáteční oxidací povrchu a tím zvýšením schopnosti materiálu absorbovat energii laseru snížením koeficientu odrazivosti, jednak vznikem přídavného exotermického reakčního tepla hoření, které se projevuje podstatným zvýšením rychlosti řezání. Vlastní proces řezání je pak důsledkem exotermické reakce materiálu s kyslíkem.

Technicky je možno řezat ocele do tloušťky cca 20 mm. Nejčastěji používané CO<sub>2</sub> lasery jsou nejhospodárnější pro řezání ocelí do tloušťky 6-7 mm. [1]

Tab. 1. Doporučené parametry pro řezání CO<sub>2</sub> laserem [4]

Materiál	Tloušťka [mm]	Rychlost [mm/min]	Šířka zářezu [mm]	Výkon [kW]
Sklo	9,5	1520	1,0	20
Křišťál	1,9	600	0,2	0,3
Beton	38	50	6,35	8
Měkká ocel	0,3	6000	0,1	0,3
	1,0	4 500	0,05 – 0,1	0,4
	2,0	4900	0,1 - 0,2	2
	3,18	840	0,5	0,4
	6,4	2300	1,0	15
Korozivzdorná ocel	0,45	635	0,46 – 0,92	0,2
	1,27	760	0,51	0,16
	3,18	5080	0,1 – 0,2	0,5
	4,75	1270	2,0	20
Nástrojová ocel	3,0	1700	0,2	0,4
Titan	0,5	200	0,46 – 0,9	0,2
	5	3300	0,4	0,8
Titanové slitiny	5	4 000	0,4	1,0
Hliník	1,5	2 500	0,8	1,0
	12,7	2 300	1,0	15

## 2.6 Plyny pro řezání laserem

### 2.6.1 Kyslík

Pro řezání laserem nelegovaných a nízkolegovaných ocelí se používá v nejbližší míře kyslíku jako řezného plynu. Kyslík chemicky reaguje s řezaným materiálem, kdy s přispěním exotermické reakce vzrůstá řezná rychlost, která je navíc výrazně ovlivňována čistotou kyslíku. Pro dosažení vysoké produktivity a kvality řezání (tedy i návratnosti vysoké investice) je vhodné využít pro řezání laserem vysoké čistoty řezacího kyslíku, např. min. 99,95%. Tlak kyslíku při výstupu z řezné dýzy je 5 barů pro tenké materiály o tloušťce 1–3 mm, pro tloušťky materiálu do 10 mm je tlak cca 1 bar a pro silnější materiály bývá zpravidla 1 bar. [6]

### 2.6.2 Dusík

Dusík se používá k řezání vysoce legovaných ocelí včetně korozivzdorných ocelí, hliníku a jeho slitin. Dusík při řezání nereaguje s řezaným materiálem (pouze obsažené nečistoty), chybí tedy tepelný příspěvek chemické reakce a řezná rychlost je mnohem nižší ve srovnání s rychlostmi při řezání kyslíkem. Pro dosažení minimálního chemického ovlivnění řezaného materiálu a kvalitních řezných hran s minimem okují je vhodné jako řezný plyn využít dusík vysoké čistoty, např. min. 99,999 %. Během řezání nedochází k oxidaci materiálu (pouze obsažené nečistoty), což je základním předpokladem pro zachování korozivzdornosti u korozivzdorných ocelí popř. u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí s protikorozní vrstvou zinku. Tlak dusíku musí být nastaven na mnohem vyšších hodnotách než při řezání kyslíkem. Pro získání kvalitních řezných ploch bez otřepů na spodní řezné hraně, musí být tlak vyšší než 10 barů. Při řezání dusíkem platí pravidlo, čím je silnější materiál, tím musí být vyšší tlak na řezné dýze, např. při řezání 10 mm Cr-Ni oceli je nutno nastavit tlak dusíku v rozmezí 16-18 barů. Tlak řezného plynu se vždy měří na výstupu z řezné dýzy. Tlak na zdroji plynu – láhvi, svazku láhví nebo zásobníku, musí být vlivem tlakových ztrát nastaven na hodnotu cca o 5-10 barů vyšší. [6]

### 2.6.3 Argon

Pro řezání vysoce reaktivních materiálů jako jsou titan a zirkon je nutné použít zcela inertního plynu, který s řezaným kovem nebude chemicky reagovat. K tomuto účelu se používá argon, který chrání řezné plochy před účinky okolního vzduchu. V některých případech se

používá komory s ochrannou atmosférou argonu, k zabránění reakcí po řezání, např. tvorby nitridu titanu.

Při řezání vysoce reaktivních materiálů se spotřeba argonu pohybuje v rozmezí od 30 do 150 l/min. Argon pro řezání laserem se dodává v láhvích nebo svazcích v závislosti na jeho spotřebě a frekvenci závozu. V případě velmi vysoké spotřeby lze argon dodávat v kapalné fázi a skladovat v paletových zásobnících nebo stacionárních zásobnících. [6]

#### 2.6.4 Směsné plyny

Směsné plyny se používají při aplikacích, kde jsou požadovány zvláštní požadavky na dělený materiál. Dusík+kyslík, se používá při řezání hliníku a jeho slitin pro zvýšení řezné rychlosti za předpokladu dobré kvality řezných hran. Argon+helium se používá při řezání titanu a zirkonu vysokovýkonnými lasery. [6]

### 2.7 Kritéria hodnocení kvality povrchu po obrábění laserovým paprskem

Podobně jako při klasickém řezání nástrojem s určitou geometrií řezné hrany, při posuzování kvality řezání/dělení a vrtání laserem je potřebné brát do úvahy spektrum vlivů, které König a van Luttervelt rozdělili do tří skupin:

1. parametry procesu
2. parametry materiálu produktu
3. kvalita řezu

Parametry procesu při řezání laserem zahrnují :

- výkon paprsku,
- rychlost posuvu paprsku (řezná rychlost),
- šířku vytvořené spáry (zářezu),
- druh paprsku a jeho mód,
- ohnisková vzdálenost,
- průměr fokusovaného paprsku,

- úhel vychýlení paprsku, který vzniká důsledkem průchodu paprsku materiálem, paprsek se odchyluje od původního směru ( $\alpha = 75^\circ - 80^\circ$ ),
- přídavný plyn (druh plynu, tlak plynu).

Parametry materiálu a komplexnost vytvořeného profilu jsou charakterizované:

- fyzikálně - chemickými vlastnostmi materiálu,
- typem materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit...),
- termofyzikálními vlastnostmi (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, reflektivita),
- geometrie obrobku.

Při sledování samotné kvality řezu je potřebné brát do úvahy parametry zóny řezání laserem, které zároveň mohou sloužit jako kritéria pro hodnocení laserem řezaného povrchu:

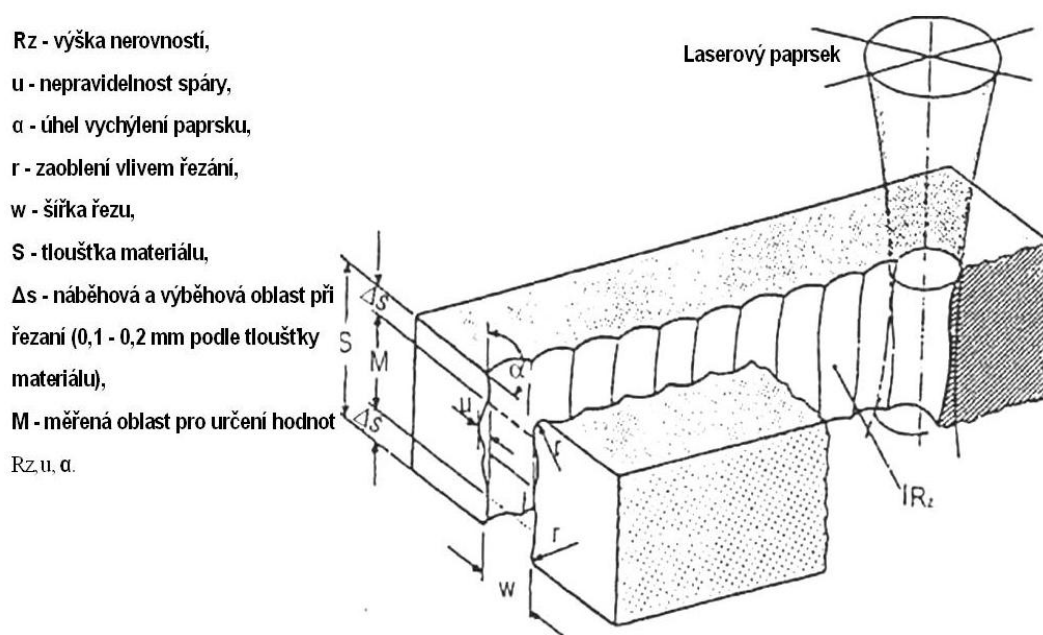
- šířka řezu
- zaoblení hrany vlivem řezání,
- nepravidelnost hrany,
- šířka tepelně ovlivněné vrstvy (poškozené vrstvy),
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupu paprsku)
- tvoření trhlin,
- úbytek materiálu,
- šířka kráteru,
- vychýlení paprsku,
- změna struktury povrchu materiálu,
- zpevnění,
- zbytkové napětí.

Obr. 12. ilustruje zónu po řezání laserem a doporučené veličiny používané pro kvantitativní hodnocení kvality řezu. Německá škola, kterou reprezentuje König, uvádí široké spektrum

kritérii ovlivňujících kvalitu řezu. Steen a Kamalu (1983), jako představitelé americké technologické školy, uvádějí redukovaný počet parametrů a kvalitu řezu určují:

- charakteristikou materiálu, tloušťkou HAZ a tvořením povrchových mikrotrhlin.
- geometrickými vlastnostmi, jako jsou drsnost povrchu, frekvence a amplituda rýhovatosti povrchu, sklon řezaného povrchu, zaoblení horní a dolní řezné hrany, přítomnost kapek a stlačené vrstvy.

Většina literárních pramenů, které se zabírají kvalitou řezaného povrchu, se soustřeďuje při hodnocení na jeden a nebo dva určující provozní parametry, jako jsou výkon paprsku a rychlost posuvu, a rovněž na jeden a nebo dva parametry kvality řezu, obvykle HAZ a šířku spáry. Vycházejí z toho, že při hodnocení kvality řezu a optimalizaci laserového řezání je spektrum výše uvedených kritérií velmi široké. [5]

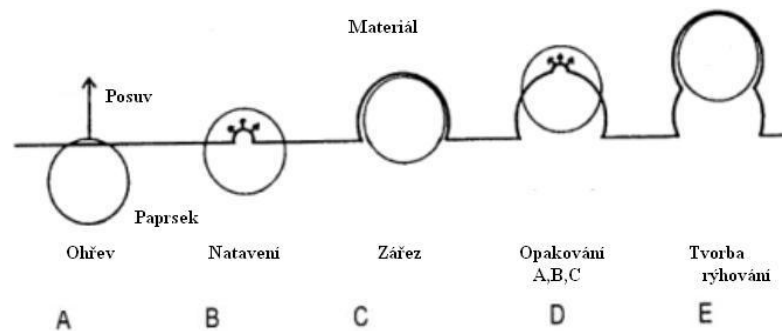


Obr. 12. Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem [4]

Obyčejně je teda kvalita řezu určena ve spojitosti s třemi základními parametry a to s řeznou rychlostí, která by měla být co nejvyšší, šířkou zářezu (spáry) s požadavkem, aby byla co nejužší a nakonec kvalitou povrchu, po řezání určenou parametry drsnosti Ra podle STN a ISO a Rz podle DIN.

Oblast řezání laserem je charakterizovaná, podobně jako skoro všechny vysokoenergetické technologie řezání, tvořením rýhované (striace) stopy řezu, která vzniká při laserovém tavném řezání jako výsledek cyklické povahy energetického paprsku při interakci s materiálem

v důsledku oscilace proudění a taveniny. Vznik ryhované oblasti je schematicky znázorněný na (Obr. 13).



Obr. 13. Model tvoření rýhy v zóně tavného řezání laserem [4]

Pro jednotlivé druhy materiálů (měkká ocel, korozivzdorné ocele, keramika, kompozitní materiály, titan, plasty) charakterizuje Powel kvalitu povrchu, řezaného CO<sub>2</sub> laserem s podporou přídavného plynu, následujícími veličinami:

- množstvím zůstávajících kapek (dross) nataveného a ztuhnutého materiálu na spodní části řezu,
- drsností povrchu,
- šířkou zářezu.

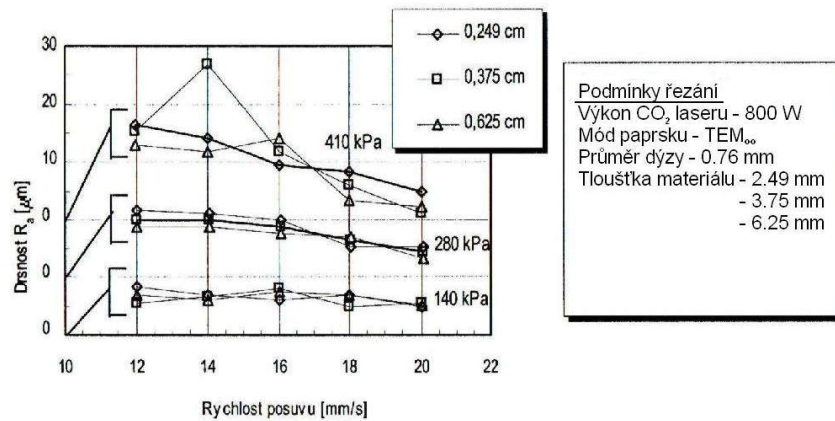
Analýza literárních zdrojů poukazuje na skutečnost, že převážná většina autorů nehodnotí kvalitu povrchu po řezání laserem drsností povrchu, ale soustřeďuje se na HAZ a šířku spáry jako primární ukazatele kvality řezu.

Niemeyer, Smith a Kaminski studovali vliv výkonu paprsku, řezné rychlosti, tlaku přídavného plynu a tloušťky řezaného materiálu na drsnost povrchu při řezání měkké ocele. Podmínkou určení optimální drsnosti po řezání/dělení materiálu laserem byl požadavek, že drsnost má být menší jak při dělení pásovou pilou. [4]

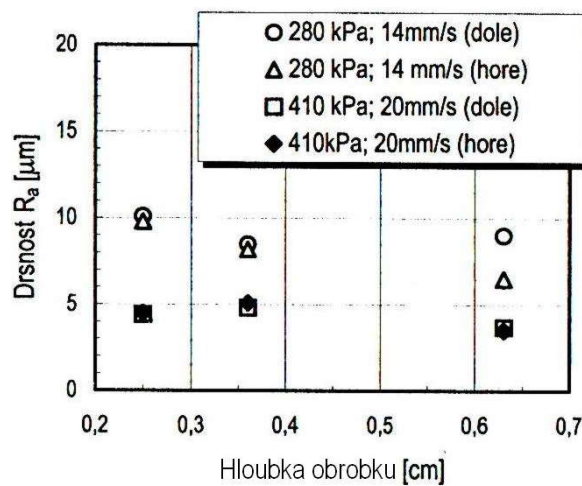
## 2.8 Vliv technologických parametrů na kvalitu řezné plochy

Při řezání CO<sub>2</sub> laserem přídavný plyn O<sub>2</sub> urychluje oxidační proces při nižších rychlostech posuvu. Avšak se zvyšováním rychlosti proudění přídavného plynu (vyšší tlaky) se drsnost povrchu tvořením výrazného ryhování zhoršuje. Naopak, jak se zvyšuje rychlost posuvu paprsku, ohřev povrchu je plynulejší a dosahuje se hladší povrch. Autoři konstatují, že rychlost posuvu (či už jde o posuv obrobku anebo posuv paprsku, záleží od konstrukci laseru) a

tlak přídavného plynu jsou významnými určujícími ukazovateli drsnosti povrchu, pro daný rozsah provozních parametrů. Jejich vliv na drsnost  $R_a$  znázorňuje graf na (Obr.14). Na druhé straně tloušťka obrobku vykazuje jen malý vliv na drsnost, jako to ilustruje (Obr.15).

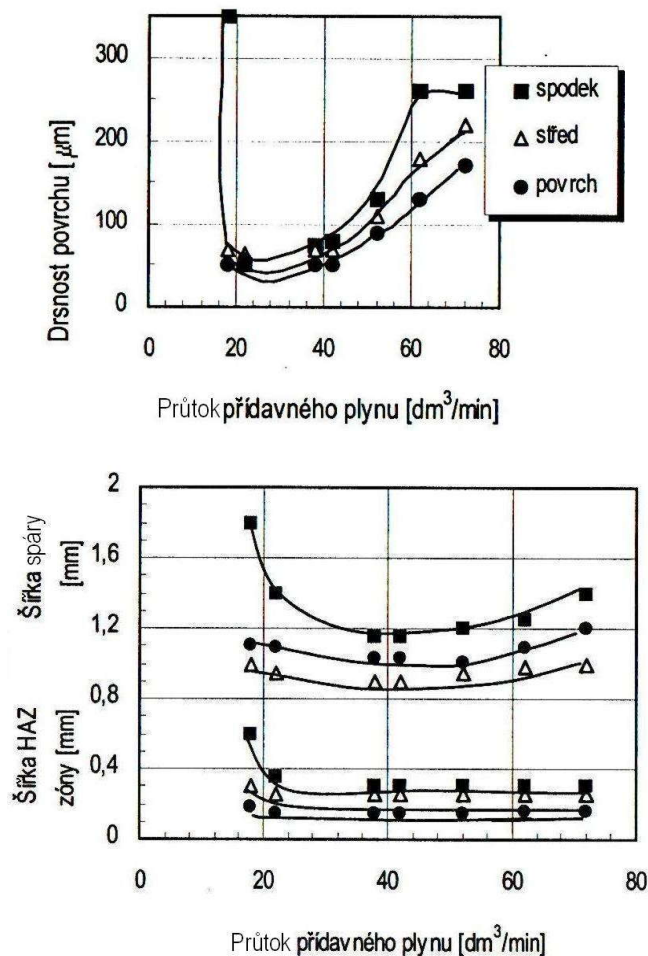


Obr. 14. Účinek rychlosti posuvu na drsnost povrchu pro různé hloubky [4]



Obr. 15. Vliv výšky materiálu na drsnost povrchu pro různé tlaky příd. plynu [4]

Taniguchi charakterizuje kvalitu řezu šířkou tepelně ovlivněné zóny, šířkou vytvořené řezné spáry a drsností povrchu v závislosti na průtokovém množství přídavného plynu (Obr.16)



Obr. 16. Vztah mezi kvalitou řezu a průtokem přídavného plynu [4]

Podmínky:  $\text{CO}_2$  laser, výkon 2kW, řezná rychlost 1m/min, tloušťka materiálu 5mm

Množství přiváděného přídavného plynu do zóny řezu ovlivňuje kvalitu řezu a profil průřezu. Podle toho, jak rovnoměrně se vytváří řezná spára a její profil v průřezu kolmo na osu paprsku, je možné řezání laserem pomocí přídavného plynu blíže charakterizovat následujícími oblastmi:

1. oblast tvoření kovového oparu (gauzing) vzniká při průtoku plynu do 20  $\text{dm}^3/\text{min}$ , je charakterizovaná širokou, přehrazující a velmi drsnou řeznou spárou ve spodní části řezu.
2. oblast tvoření drobných kapek ve formě pěny (dross) ztuhnutého materiálu, ve spodní části řezu je typická pro průtok v rozsahu 20-30  $\text{dm}^3/\text{min}$ .
3. oblast jemného řezu s úzkou řeznou spárou (rozdíl rozměrů mezi vrchní a spodní částí řezu je minimální) a nízkou srstností 35-45  $\text{dm}^3/\text{min}$ .



4. oblast hrubého řezu se širokou, ale pravidelnou řeznou spárou 50-65 dm<sup>3</sup>/min.
5. oblast ve které dochází k hoření materiálu v řezu, je charakterizována nepravidelnou spárou rozšířenou ve spodní části řezu, vzniká při průtoku plynu nad 70 dm<sup>3</sup>/min.

Tepelně ovlivněná zóna HAZ (Heat affected zone) je různá pro rozdílné materiály a závisí na posuvu paprsku, vlnové délce a absorpční vlastnosti materiálu. Čím vyšší je rychlost posuvu, tím menší je hloubka HAZ. Intenzita absorpce laserových paprsků do materiálu se zvyšuje se zvyšováním vlnové délky záření. Odborná literatura udává průměrnou šířku HAZ pod přetavenou zónou okolo 0,05 mm.[4]

## 2.9 Výhody a nevýhody laserového řezání

Výhody:

- vysoká přesnost řezaných dílů. Na polotovary nemusíme rýsovat řezný plán, protože souřadnicový stůl nebo řezací hlava se pohybují podle předem stanoveného programu, který zajišťuje maximální využití plochy výchozího materiálu a tím minimalizuje odpad.
- řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků a tvarů s ostrými úhly.
- dosahuje se velkých řezných rychlostí.
- plochy řezu mají velmi dobrou jakost povrchu a obvykle nevyžadují další úpravy. Řezná spára má velmi malou šířku.
- okrajová oblast oceli tepelně ovlivněná laserem je velmi úzká, nedochází k deformacím obráběného materiálu vlivem tepla. Ovlivněná plocha je o cca. 75% menší, než například u stříhání, kde je okrajová zóna ovlivněna zpevněním.

Nevýhody

- vysoké investiční a provozní náklady
- snížení efektivity procesu u řezání lesklých materiálů a u oceli s obsahem Si a P.
- omezení tloušťky materiálů vhodných k řezání: konstrukční ocel – 25 mm; vysokolegovaná ocel – 15 mm; hliník – 10mm; atd. .
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku

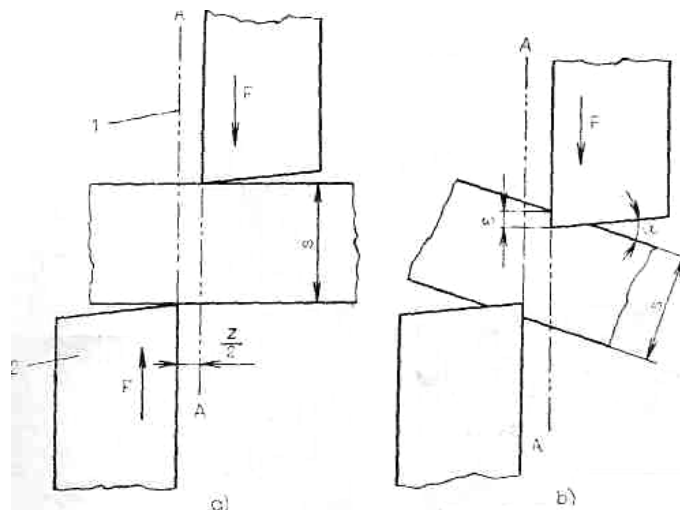
### 3 TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO STŘÍHÁNÍ

Při stříhání se působí na materiál vhodně upravenými noži tak, aby se materiál ustříhl v určité ploše. Pro dosažení kvalitního stříhu (bez ostřin) musíme zachovat určité podmínky, to je ostří nožů, vůle mezi noži atd., což klade určité požadavky na obsluhu a údržbu stroje. Nedodržení podmínek může mít za následek nejen nekvalitní střížnou plochu, ale i vylomení břitů nožů nebo zničení celého stroje (nůžek).

Obsluha stroje musí být seznámena se základními technologickými požadavky kvalitního stříhu, tzn. jaká má být správná vůle mezi noži a jaké může být maximální otupení nožů. [2]

#### 3.1 Střížný proces

Při stříhání zatlačujeme stříhací nože do materiálu dvojicí sil  $F$  tak, aby nastalo oddělení materiálu v tzv. střížné rovině A-A, tj. rovině, podél níž se nože pohybují (Obr.17).



Obr. 17. Princip stříhání bez přidržovače [2]

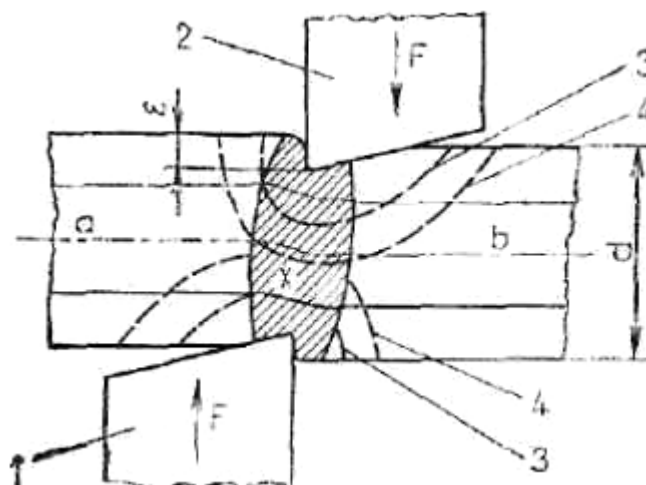
a — výchozí poloha; b — natočení stříhaného plechu; c — působíště střížné síly na břitu nože

1 — střížná rovina A-A; 2 — stříhací nože

Tlak se šíří ve stříhaném materiálu od místa styku s noži v plochách, znázorněných izobarami na obr. 7.

Protože nože přesunou části stříhaného kovu proti sobě (části a, b) podél střížné plochy, začne ve střížné ploše vznikat tahové napětí. Přetvoření stříhaného materiálu vznikne v oblasti X kolem střížné plochy (na Obr.18. vyšrafované), v ní budou při dalším vzájemném

posuvu nožů vlákna postupně ohýbána a protahována. Úměrně s úbytkem tlaku (tj. také úměrně se vzdáleností od bříty nože) se bude i prodloužení a prohnutí vlákna zmenšovat. [2]

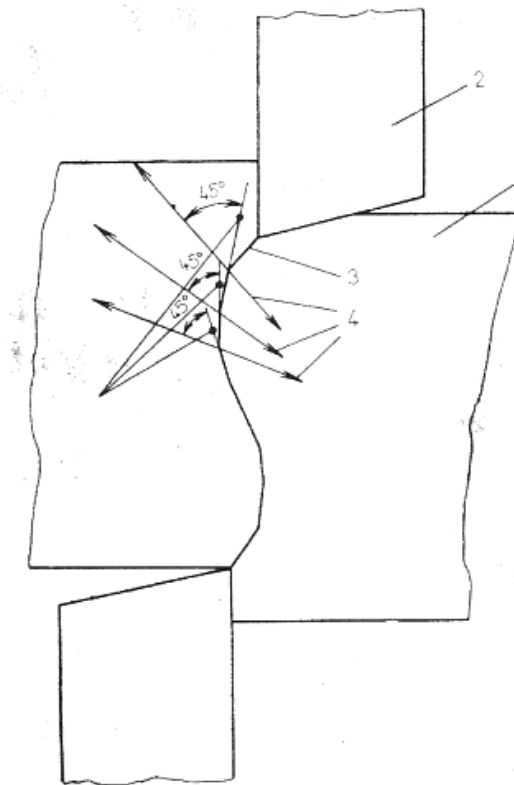


Obr. 18. Rozložení tlaků v okolí střížné roviny [2]

- 1 — pevný nůž; 2 — pohyblivý nůž; 3,4 — izobary;  
a, b — části stříhaného materiálu; X — oblast přetvoření

Když se nože zatlačí do určité poměrné hloubky, charakteristické pro stříhaný materiál, dosáhne tahové napětí takové hodnoty, že nastane porušení, tj. vznikne trhlina ve směru největšího smykového napětí. Protože největší tahové napětí je na bříty střížného nože, vznikne první trhlinka obvykle na tomto místě. Při dalším postupu nožů vznikají další trhlinky až do úplného oddělení jednotlivých částí.

Nerovnoměrné rozložení tlaku způsobuje i změnu směru (prohnutí) tahových vláken se vzdáleností od břitů nožů. Podobně se mění i směr trhlinek, v nichž se materiál odděluje; trhlinky postupují ve směru největšího smykového napětí, v úhlu asi  $45^\circ$  ke směru tahového napětí (tahových vláken). Tím je možno vysvětlit tvar střížné plochy (Obr.19). [2]

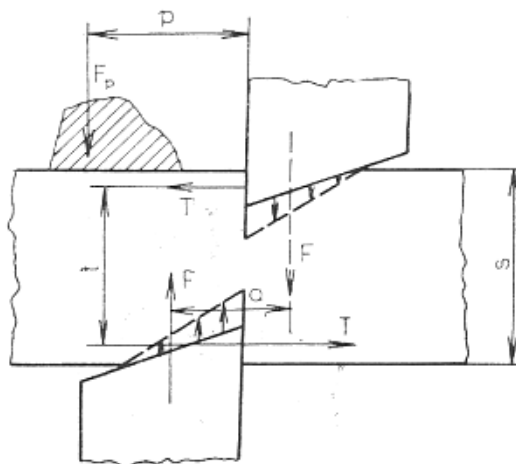


Obr. 19. Střížná plocha [2]

1 — stříhaný plech; 2 — nůž; 3 — směr maximálních smykových napětí; 4 — směr tahových napětí

### 3.2 Síly při stříhání

Působí-li na stříhaný plech dvojice sil, musí se plech naklonit ve směru působení momentu dvojice sil o úhel  $\alpha$ . Přitom se nože, které síly přenášejí, zatlačí do materiálu (Obr.20).



Obr. 20. Silová působení [2]

Síla  $F$  dosáhne maximální hodnoty  $F_{\text{stř.}}$ . Přitom bude nůž zatlačen do materiálu o hodnotu

$$\varepsilon = \chi \cdot s \quad (2)$$

Působením momentu sil  $F$  na rameni  $a$  se stříhaný materiál natočí o úhel  $\alpha$ .

Moment střížných sil je eliminován buď momentem přidržovače, nebo silami působícími na hřbety nožů. Za předpokladu trojúhelníkového rozložení tlaků na hřbetu nožů bude moment sil roven  $T_t$  (Obr.17). [2]

$$F \cdot a = T_t, \text{ bude } T = F \cdot \frac{a}{t} \quad (3)$$

V případě, že použijeme přidržovače, bude síla přidržovače  $F_p$  působit proti natáčení na rameni  $p$ ,

$$F a = F_p \cdot p \quad (4)$$

Sílu  $F_p$  vypočteme z předpokladu, že  $p=10a$ ; pak

$$F_p = \frac{F}{10} \quad (5)$$

Přidržovač obvykle zadržuje jenom jednu stranu stříhaného dílce. Odstřížek je tedy, tj. druhá strana stříhaného materiálu, ovlivněn tímto momentem jenom tehdy, když je s materiálem ještě pevně spojen. Tak například u stříhu plechu skloněnými noži tabulových nůžek je moment způsobený přidržovačem přenášen na odstřížek materiálem dosud neodstříženým. Proto se odstřížek ulomí na konci střížné plochy, kdy se moment přenášený materiálem zmenší na hodnotu momentu střížné síly. Proto na konci stříhu vznikne nekvalitní střížná plocha. Použitím přidržovače (či podložky) i na straně odstřížku se může vzniku nekvalitní střížné plochy zabránit. [2]

### 3.3 Stříhání tenkých plechů

#### 3.3.1 Způsoby stříhání

Běžný způsob stříhání noži skloněnými se používá na tzv. tabulových nůžkách. Jak vyplývá ze vzorců pro určení střížné síly, bude se potřebná střížná síla zmenšovat s rostoucím úhlem mezi noži  $\lambda$  a s rostoucím otupením nožů.

Na nůžkách se stříhá buď s předním dorazem, nebo s dorazem zadním; někdy se musí stříhat podle rysky narýsované na plechu.

Různé firmy vyrábějí nůžky s různými úhly  $\lambda$ , některé s úhlem  $\lambda$  měnitelným. To je značná výhoda. Čím větší je úhel  $\lambda$ , tím větší je i deformace (ohnutí, šavovitost) odstřížku, což se pokaždé projeví při stříhání úzkých pásů. Proto by se velké úhly neměly používat. Vhodné jsou úhly těchto velikostí:

Tab. 2. Vhodné úhly [2]

$s$ (mm)	$\lambda$	$\lambda$ max
4	1°	1°30'
10	2°	2°30'
20	3°	3°30'
30	3°30'	4°

Kvalitu střížné plochy ovlivňuje kromě míry otupení také vůle mezi noži. Moderní nůžky jsou řešeny tak, že je možno vůli velmi rychle nastavit na správnou hodnotu. Tak se dosáhne daleko kvalitnějšího stříhu, ať už se stříhá tenký nebo tlustší plech. [2]

### 3.3.2 Stříhání pružným prostředím

Z popisu procesu stříhání pryží, nebo jiným elastickým médii vyplývá také několik technologických zásad, které je nutno při návrhu střížného nástroje respektovat.

Protože k ustřížení dochází vlivem tahového napětí, které pružné tlakové prostředí musí vyvinout na lemu vystříhované součásti, musí být délka lemu dostatečně veliká. Lem musí být pevně přitlačen k desce stolu, aby v něm mohlo vzniknout tahové napětí rovné mezi pevností stříhaného materiálu. Ustřížení - vlastně utržení - nastane pak obvykle v místě koncentrace napětí, tj. na střížné hraně. Z uvedeného je zřejmé, že délka okraje musí být dostatečně velká, aby také třecí síla byla dostatečně velká. Není-li tato podmínka splněna, převýší tahová síla v materiálu sílu způsobenou třením a okraj materiálu se posune. Tím se sníží tahové napětí a nenastane utržení (ustřížení okraje). Z toho je zřejmé, že délka přečnávajícího okraje musí být v určitém poměru k výšce střížné desky a k tloušťce stříhaného materiálu.

Obvykle bývá:

$$H = 10s ; B \geq 3H \quad (6)$$

Střížná hrana střížné desky musí být ostrá. Je-li zaoblená, může se materiál oddělit v jiném místě než na střížné hraně a místo kvalitního ústrižku vznikne zmetek.

Také zkosení střížné hrany má značnou důležitost. Není-li hrana dostatečně ostrá, je nebezpečí dosednutí plechu na hřbet nástroje a utržení v jiném místě než na střížné hraně. Je-li úhel velký, vzniká nebezpečí poškození pryže. Vhodný úhel hřbetu je  $\beta = 2$  až  $4^\circ$ .

Z uvedeného popisu střížného pochodu je zřejmé, že střížná hrana nemusí být zdaleka tak dokonalá jako při klasickém způsobu stříhu. [2]

### **3.3.2.1 Nástroj na stříhání pryží**

Také pryžový stříhací nástroj má horní a spodní část. Horní část se skládá z válce a pryžového polštáře, spodní z ponorné desky a stříhové desky. Válec je velmi namáhán, a proto musí být jeho konstrukce důkladná. Pryžový polštář se vyrábí o několik milimetrů větší než je světlost válce, aby pryž nevypadávala. Pryž se do válce lisuje. Odvod vzduchu z válce se umožňuje otvory v čele válce. Při tváření jsou otvory uzavřeny, jinak by se jimi pryž vytlačila ven. [2]

## **3.4 Stříhání tlustých plechů**

### **3.4.1 Stříhání za studena**

Při stříhání a děrování tlustých plechů vznikají při výrobě technologické těžkosti. Ve srovnání s děrováním a stříháním tenkých plechů má tento proces specifické vlastnosti a jiné průběhy sil. Střížná pevnost se nejeví jako mechanická charakteristika; nýbrž je podmíněná fyzikálně mechanickými vlastnostmi. Stříhání a děrování za studena závisí na velikosti střížné vůle, na poměru  $s/d$  na rychlosti při stříhání. Při stříhání a děrování tlustých plechů za studena je střížná plocha nekvalitní, se zátrhy a velkými ostřinami. [2]

### 3.4.2 Stříhání za tepla

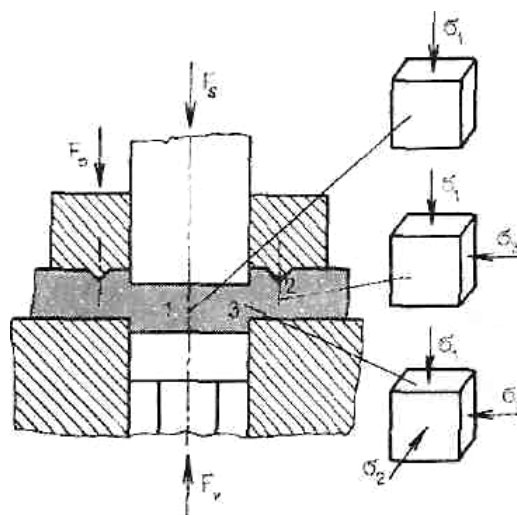
Při stříhání tlustých plechů za tepla se zmenšuje namáhání lisu a střížná plocha je kvalitní. Při dodržení střížné mezery v rozsahu 0,5 až 1 % tloušťky plechu je střížná plocha bez zátrhů do tlouštěk 30 mm. [2]

## 3.5 Přesné vystřihování

### 3.5.1 Princip přesného vystřihování

Stříhaný materiál procházející nástrojem je v počáteční fázi sevřen mezi přidržovačem a střížnicí, takže tlačná hrana je vtlačena do materiálu ještě před vlastním stříhem. Poloha tlačné hrany je volena mimo křivku stříhu. Uvnitř je materiál sevřen mezi střížníkem a vyházočem. Materiál se při vystřihování neprohne, přičemž radiální složka pružení, která vznikne jako následek plastické deformace, je zachycována tlačnou hranou.

Při přesném vystřihování se pásmo plastického stříhu rozšiřuje přes celou tloušťku materiálu. Protože plastické vlastnosti kovů závisí na stavu napjatosti, je nutné zkoumat, jaká schémata hlavních napětí jsou v různých částech tvářeného materiálu. Všeobecně platí, že se vzrůstajícím podílem tlakových napětí roste schopnost materiálu plasticky se deformovat a naopak velká tahová napětí porušují soudržnost materiálu a způsobují vznik trhlin.



Obr. 21. Schéma napjatosti při přesném vystřihování [2]

V materiálu vznikají při přesném vystřihování tři oblasti s různými schématy napjatosti (Obr.21). Nejvýhodnější rozložení hlavních napětí je právě v oblasti stříhu 3, kde vzniká tříosá tlaková napjatost. Je to oblast všestranného tlaku, vylučující vznik trhlin a podporující



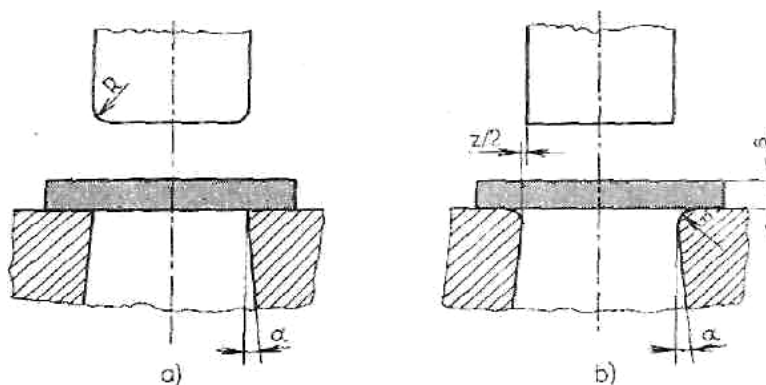
průběh čistě plastického stříhu. Mechanika přesného vystřihování se přibližuje dopřednému protlačování. [2]

### 3.5.2 Způsoby vystřihování s kvalitní střížnou plochou

Dosavadní způsoby vystřihování, jež vykazují přesné rozměry a které předcházely přesnému vystřihování, jsou vhodné pro vystřihování plechových součástí do tloušťky 3 mm v malosériové výrobě. Je to technologie vystřihování se zaoblenými střížnými hranami a vystřihování se zkoseným přidržovačem. Přistřihování je na rozdíl od předchozích způsobů vhodné pro dodatečné opracování součástí nejen stříhaných z plechů, ale i pro součásti protlačované, kované a lité pod tlakem v malosériové výrobě. [2]

### 3.5.3 Vystřihování se zaoblenými střížnými hranami

Při vystřihování se zaoblenými střížnými hranami na střížnici nebo střížníku (Obr.22) se dosáhne hladké a kolmé střížné plochy, neboť materiál je při stříhu částečně dopředně protlačován. V místě stříhu vzniká dvojosý stav napjatosti. Potřebný poloměr zaoblení střížné hrany se pohybuje mezi 15 až 20 % tloušťky materiálu podle tvaru součásti. [2]

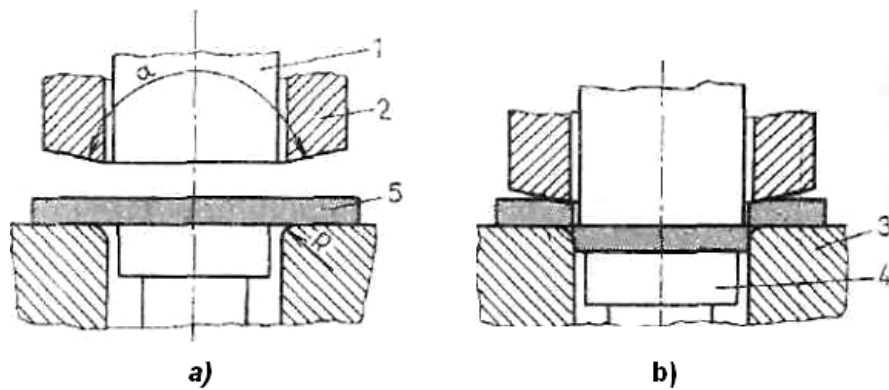


Obr. 22. Vystřihování se zaoblenými střížnými hranami [2]

a — hladká střížná plocha při děrování; b — hladká střížná plocha při vystřihování

### 3.5.4 Vystřihování se zkoseným přidržovačem

Tento málo používaný způsob vystřihování má na rozdíl od běžného vystřihování zkosený přidržovač (Obr. 23) k vyvození dvojosého stavu napjatosti. Vrchlový úhel přidržovače je  $\alpha = 178^\circ 30'$ , přičemž poloměr na střížné hraně střížnice je  $R \leq 0,01 \text{ mm}$  [2]



Obr. 23. Vystřihování se zkoseným přidržovačem [2]

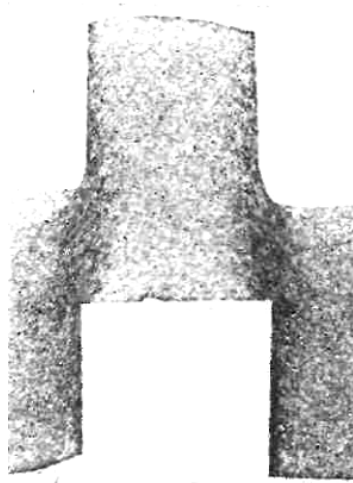
a — výchozí poloha; b — konečná fáze stříhu; 2 — střížník; 2 — přidržovač; 3 — střížnice; 4 — vyhazovač;  
5 — materiál

### 3.5.5 Přistřihování

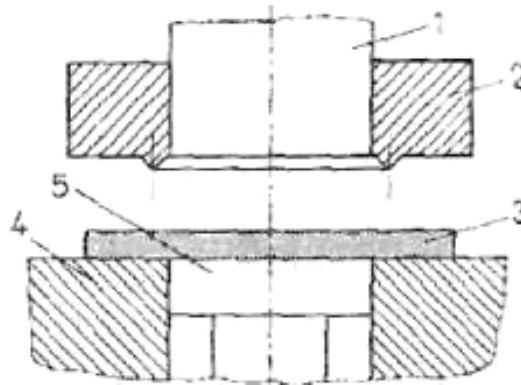
Princip přistřihování je oddělování malého množství kovu ze střížné plochy. Cílem je dosažení větší přesnosti a kvality povrchu střížné plochy. Přistřihování může být prováděno jak po otevřené, tak i po uzavřené čáře stříhu. Technologie není vhodná pro velkosériovou výrobu. [2]

### 3.5.6 Přesné vystřihování

Nejdokonalejší způsob vystřihování, jímž se získají velmi kvalitní střížné plochy a přesné rozměry, je přesné vystřihování. Na (Obr.24) je makrostruktura přesně stříhané součásti při dvacetinásobném zvětšení. [2]



Obr. 24. Makrostruktura přesně stříhané součásti [2]

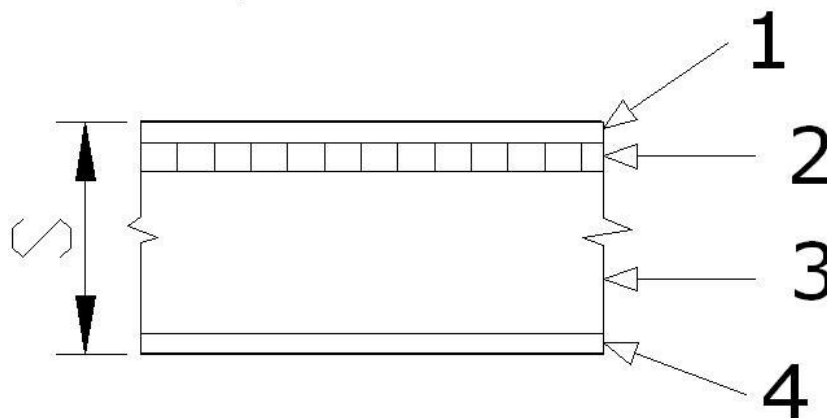


Obr. 25. Přesné vystřihování [2]

1—střížník;2—přidrzoč s tlačnou hranou;3—materiál;4—střížnice;5—vyhazovač

Přesné vystřihování je velmi složitý proces, jehož průběh závisí především na vyvození tříbového stavu napjatosti v místě stříhu. Přesné vystřihování je vhodné zejména pro velkosériovou výrobu součástí z plechu s uzavřenou čarou stříhu. [2]

### 3.6 Jakost střížné plochy



Obr. 26. Kvalita střížné plochy

1—zaoblení vstupní hrany;2—zatlačení nože do vzniku trhliny;3—Vlastní střížná plocha;4—zatlačení spodního nože

Střížná plocha je vytvořena obecně čtyřmi plochami. Část 3 tvoří u běžného stříhu 80% střížné plochy, a proto je pro posouzení charakteristická.

V okolí střížné plochy se stříhaný materiál trvale deformuje. Se zvyšující se mírou deformace, dochází úměrně i ke zpevnění a ke snížení tvárnosti. K maximálnímu přetvoření dochází na ploše kde se od sebe stříhané části oddělily

Na jakost střížné plochy se nejvíce podílí střížná vůle a rychlost stříhání. Se zvyšující se rychlostí stříhání klesá hloubka zasažené oblasti zpevněním, avšak při překročení tzv. kritické nárazové rychlosti se oblast zasažena tvářením rozšiřuje.

### **3.7 Srovnání mechanického stříhání a laserového řezání**

Laserové řezání, má oproti mechanickému stříhání mnoho výhod. Práce na laseru je rychlejší, přesnější a úspornější na odpadu. Ve velkosériové výrobě má dnes laser nad lisy navrch. Mechanické vystřihování má dnes uplatnění spíše v malosériové, nebo kusové výrobě i když se začínají prosazovat i malé ruční lasery s ručně vedenou laserovou hlavicí.

Při řezání paprskem fotonů, dochází k odtavování, nebo rovnou k vypařování materiálu a řezná plocha se pak nemusí upravovat. V obráběném materiálu nedochází k mechanickým deformacím, a tepelně ovlivněná část je přibližně o 75% menší, než část zpevněná stříháním. Z toho jasně vyplývá, že laserové řezání je k obrobku šetrnější.

Pomocí laseru můžeme na rozdíl od mechanického vystřihování dělit širší škálu materiálů. Omezujícím faktorem ovšem může být obsah některých prvků, tloušťka materiálu nebo jejich odrazivost.

Na rozdíl od lisů je u laserové zařízení nutnější přísnější údržba. Optika, musí být před okolím dobře ukryta a chráně. Jakákoli výrobní vada, poškození, nebo nečistota mají velký vliv na přesnost paprsku a ve výsledku i na jakost řezné plochy. Laserové zařízení je mnohem více náchylnější na nečistoty

## 4 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem teoretické části bylo přiblížit si laserové řezání a konvenční dělení materiálu mechanickým stříháním a děrováním. Větší část práce byla věnována právě laseru. Přiblížili jsme si jeho historii, fyzikální základ procesu, dělení laserů a vliv řezání na řeznou plochu. Na konec jsme si obě metody porovnaly.

Cílem praktické části je změřit drsnost řezné plochy. Zjištěné výsledky vyhodnotit a zhotovit graf, na kterém si ukážeme profil drsnosti v závislosti na hloubce. Pak ještě zjištěné drsnosti porovnáme v závislosti na výkonu laseru a řezné rychlosti při řezání zkušebních vzorků.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## **5 SPECIFIKACE ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ, LASEROVÝCH ZAŘÍZENÍ A MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ**

V praktické části byly použity celkem tři druhy vzorků, které byly řezány za rozdílných technologických podmínek. Vzorek 1 a 2 byly řezány na stroji Sincrono CP 4000 a vzorek 3 na stroji ROFIN DC020. Vzorky měly tvar kruhových disků.

### **5.1 Vzorky a jejich řezné podmínky**

#### **Vzorek 1**

Řezná rychlost: 3400 mm/min

Výkon laseru: 1700 W

Frekvence laserového paprsku: 1000 Hz

Tlak plynu: 1,4 bar

Materiál: ST 37 (11375)

Síla materiálu: 3mm

#### **Vzorek 2**

Řezná rychlost: 4300 mm/min

Výkon laseru: 2100 W

Frekvence laserového paprsku: 1000 Hz

Tlak plynu: 1,8 bar

Materiál: ST 37 (11375)

Síla materiálu: 3mm

#### **Vzorek 3**

Výkon laseru: 1500 W

Materiál: S235 JR+AR

Síla materiálu: 5mm

Řezná rychlost: 1500 mm/ min

## 5.2 Specifikace řezacích strojů

Vzorky 1 a 2, byly řezány na laserovém zařízení Synchrono CP 4000 (4 kW).



Obr. 27. Synchrono CP 4000 [10]

### Specifikace

- Rozpětí pracovního výkonu: 200-4000 W
- Výkonová stabilita: +/- 2%
- Vlnová délka: 10,6 micrometrů
- Vychýlení paprsku: 1,5 mrad (Poloviční úhel)
- Bodová stabilita: +/- 150  $\mu$ rad

### Provozní podmínky

- Teplota okolí: 10°-20° C
- Relativní vlhkost vzduchu: <95%

### Specifikace technického vybavení

1. Napájení
  - Maximální požadovaný výkon 34 kW
  - Napětí (střídavé) 400 V - 460 V, 3 fáze
2. Chlazení
  - Požadovaná chladicí kapacita 40 kW
  - Poměr průtoku 133 l/m (35 g/m)
  - Vstupní teplota 18° až 20° C



- Maximální vstupní tlak 6 barů
- Nominální vstupní tlak 3 bary
- Chladicí tekutina destilovaná voda
- Požadovaná jemnost filtru 100 micrometrů [10]

Vzorky 3 byly řezány na laserovém zařízení ROFIN DC020 (Germeny)



*Obr. 28. Rofin DCO20 [11]*

Výstupní výkon: 2000W

Rozpětí pracovního výkonu: 200-2000 W [11]

### **5.3 Specifikace měřících zařízení**

Jako měřící zařízení byly použity Mitotuyo surfest SJ-301 a digitální mikroskop ProScope HR.

### 5.3.1 Mitutoyo surfest SJ-301

Přenosný drsnoměr s prachutěsným na dotek citlivým displejem a vestavěnou tiskárnou. Na LCD displeji se odečítají naměřené hodnoty a vypočítané křivky.

Pomocí vestavěné termotiskárny lze nechat rychle a čitelně vytisknout výsledky v různých formátech.

Velká prachutěsná tlačítka pro výběr měřících funkcí a ovládací displej včetně tužky pro nastavení podmínek měření usnadňují a urychlují ovládání přístroje. SJ-301 ukládá do paměti až 5 různých podmínek měření. Naměřené hodnoty mohou být předány externímu počítači. Odpovídá mezinárodním standardům DIN, ISO, ANSI a JIS. Naměřené hodnoty mohou být uloženy do paměti a později zpracovány nebo vytisknuty. Při použití přídatné paměťové karty je možné uložit do paměti až 20 podmínek měření, souborů naměřených a statistických dat. [12]



*Obr. 29. Mitutoyo SJ-301 [13]*

### 5.3.2 ProScope HR

ProScope je vybaven zobrazovacím zařízením 1,3 Mpx a nově doplněn o programy pro Windows a Mac, které umožňují zachytit obraz, video a čas pouhým kliknutím

Můžete nastavit rozlišení 320×240 pro video, rozlišení 640×480 pro živé prezentace a rozlišení 1 280×1 024 pro pořízení fotografií s velkou rozlišovací schopností.

## 6 POPIS MĚŘENÍ

Od každého ze vzorků bylo vybráno pět kusů. Na vzorcích 1 a 2, se měření provedlo ve třech hladinách, přičemž se postupovalo tak, že umístění první hladiny M1 bylo zvoleno při vstupu laseru do materiálu, hladina M2 ve středu vzorku a hladina M3 při výstupu laseru z materiálu. U vzorku 3 se rozložení volilo obdobně, pouze s tím rozdílem, že počet hladin byl pět. Samotné měření se provádělo za pomoci přístroje Mitotuyo surfstest SJ-301.

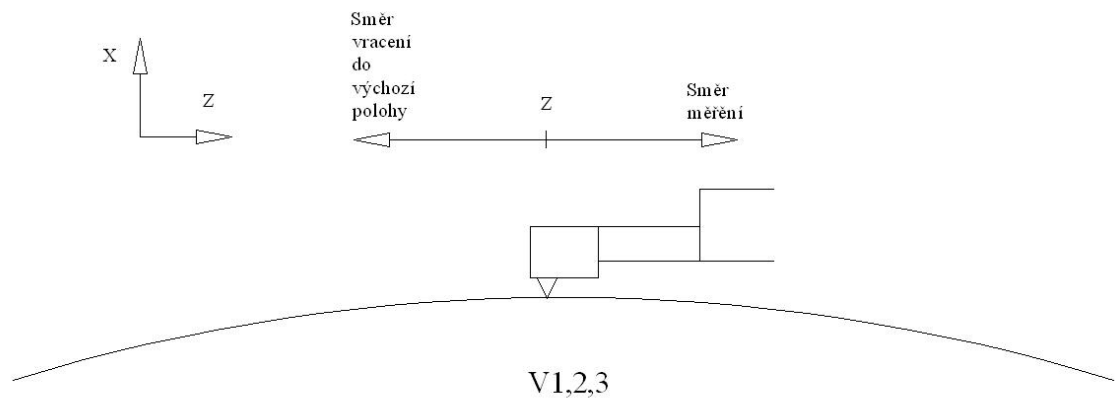


Obr. 30. Rozložení měřených poloh

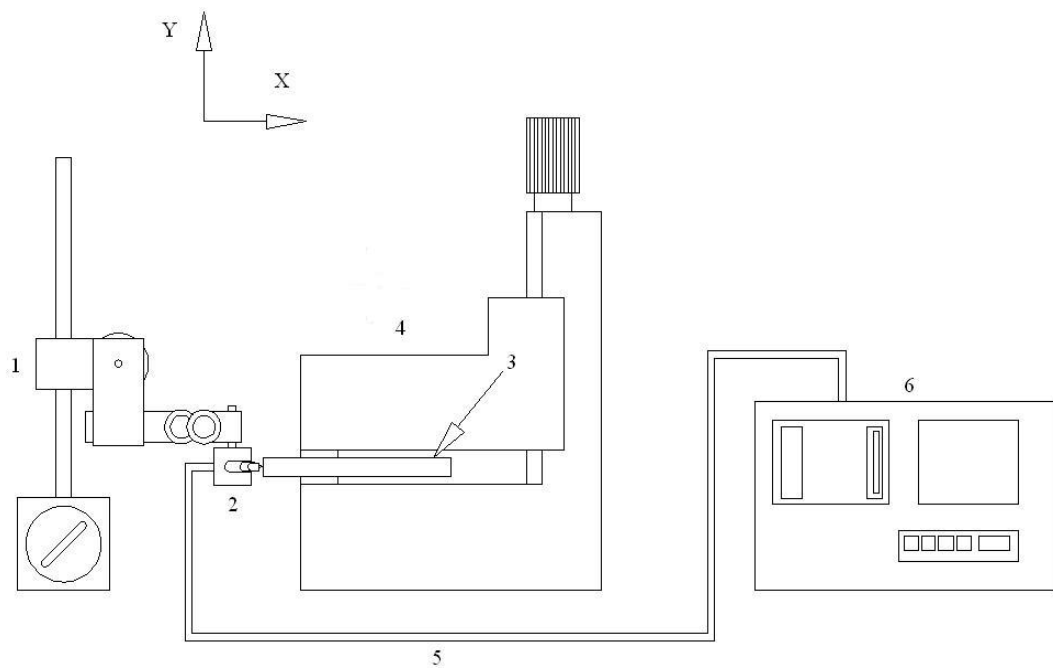
Nejprve se provedla kalibrace posunové jednotky se snímacím hrotem. Následně jsem na zařízení SJ 301 nastavil podmínky za kterých bude měření probíhat. Měřený vzorek jsem si upnul a opatrně jsem se přiblížil se snímacím hrotem.

Měření jsem provedl ve třech hladinách u vzorků 1 a 2, v pěti hladinách u vzorku 3. Tyto měření se prováděly ve dvou různých místech na obvodu vzorku. Celkem se tedy u vzorku 1 a 2 provedlo šest měření ve třech hladinách a u vzorku 3 deset měření v pěti hladinách.

Z naměřených výsledků jsem musel z důvodu nevhodně vybraných míst měření odstranit z vyhodnocení dva výsledky. Odstraněné výsledky se příliš lišily a ovlivnily by celkové výsledky.



Obr. 31. Schéma procesu měření



Obr. 32. Schéma měření

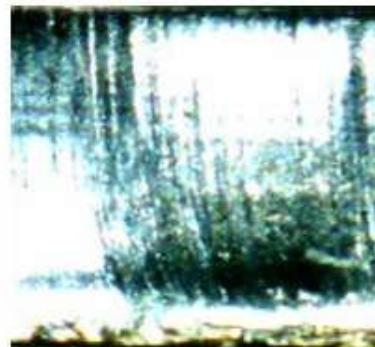
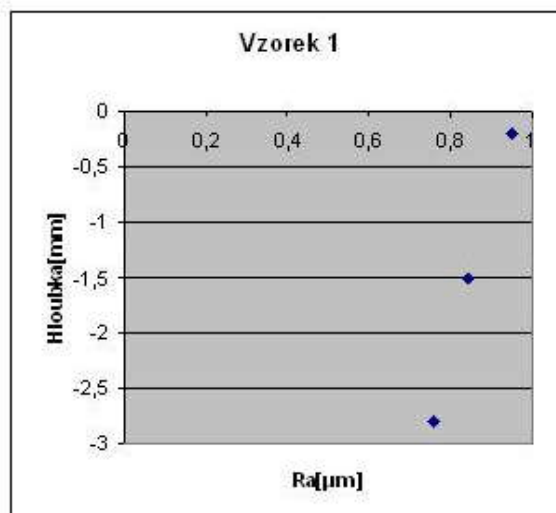
1-Stojan; 2-Posuvová jednotka pro zařízení SJ-301; 3-Vzorek; 4-Svěřák; 5-Kabel; 6-Zobrazovací zařízení Mitutoyo surfest SJ-301

## 7 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Vzorek 1

Ra(μm)	M1	M2	M3
Měření 1	1,08	0,93	0,57
Měření 2	0,69	0,84	0,88
Měření 3	1,25	0,99	0,73
Měření 4	0,91	0,87	0,81
Měření 5	0,89	0,79	1,06
Měření 6	1,26	0,80	0,70
Měření 7	0,91	0,87	0,71
Měření 8	0,64	0,55	0,61
Průměr	0,95	0,83	0,76
Sm. Odchylka	0,23	0,13	0,16

Rz(μm)	M1	M2	M3
Měření 1	5,10	4,57	3,42
Měření 2	5,45	4,35	4,55
Měření 3	6,71	4,22	4,68
Měření 4	5,78	3,12	4,12
Měření 5	5,49	4,92	4,94
Měření 6	6,32	4,18	3,93
Měření 7	4,37	4,76	3,50
Měření 8	3,95	6,24	3,51
Průměr	5,40	4,55	4,08
Sm. Odchylka	0,92	0,88	0,59

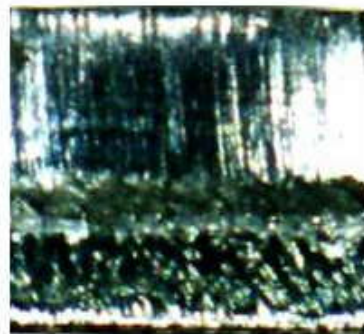
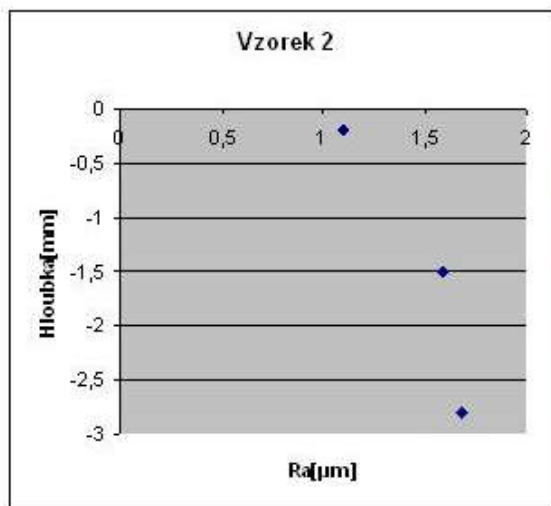


Obr. 33. Graf drsnosti profilu řezné plochy s fotkou řezné plochy vzorku 1

Vzorek 2

Ra(μm)	M1	M2	M3
Měření 1	1,24	1,74	2,01
Měření 2	0,64	3,49	2,34
Měření 3	1,72	1,32	1,65
Měření 4	1,37	0,64	1,14
Měření 5	1,42	0,84	0,74
Měření 6	0,70	1,41	2,26
Měření 7	1,13	2,46	2,17
Měření 8	0,61	0,73	1,12
Průměr	1,10	1,58	1,68
Sm. Odchylka	0,41	0,98	0,61

Rz(μm)	M1	M2	M3
Měření 1	7,55	9,56	11,69
Měření 2	3,72	20,01	12,98
Měření 3	4,89	8,82	9,32
Měření 4	5,67	3,40	4,14
Měření 5	7,89	6,56	4,92
Měření 6	3,77	7,10	11,54
Měření 7	6,32	12,92	12,53
Měření 8	3,11	3,43	5,77
Průměr	5,37	8,98	9,11
Sm. Odchylka	1,80	5,46	3,64

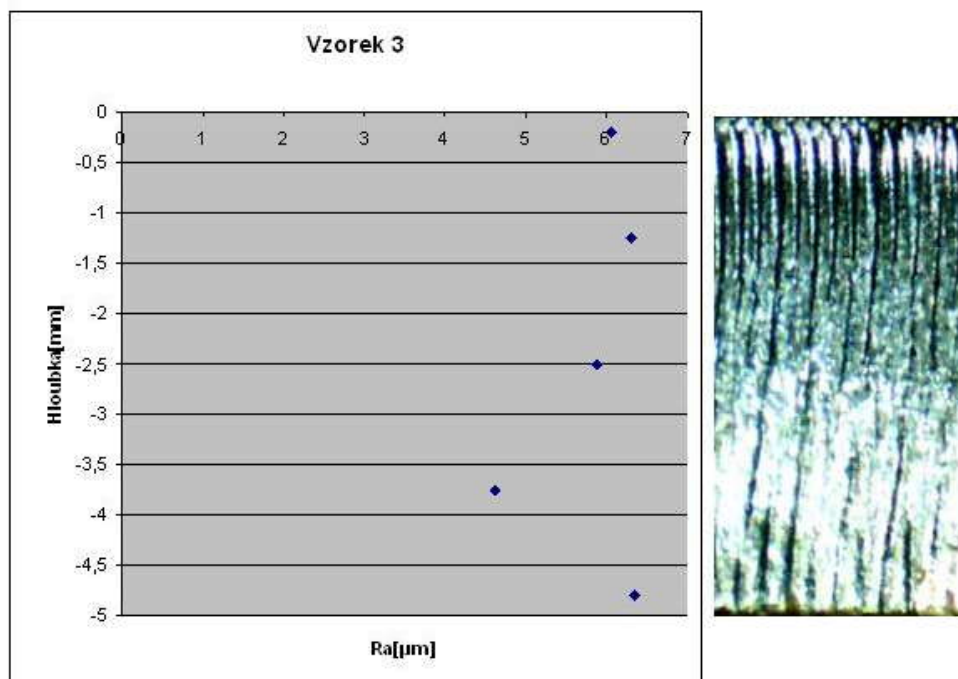


Obr. 34. Graf drsnosti profilu řezné plochy s fotkou řezné plochy vzorku 2

## Vzorek 3

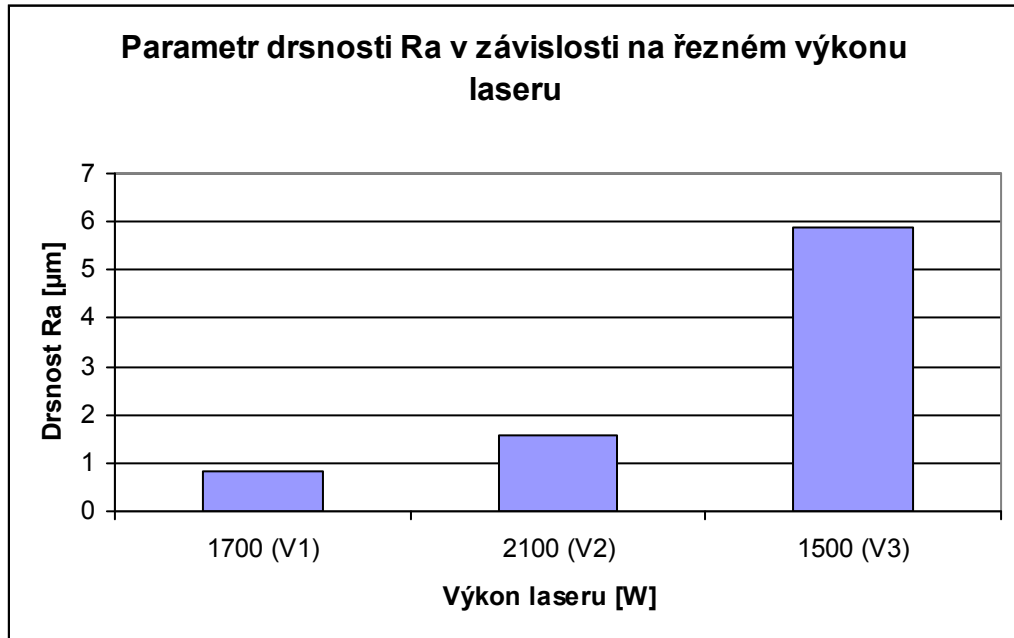
Ra( $\mu\text{m}$ )	M1	M2	M3	M4	M5
Měření 1	8,49	4,48	5,49	5,60	8,76
Měření 2	4,54	5,80	8,28	5,65	5,18
Měření 3	4,04	7,02	6,37	5,36	7,86
Měření 4	4,30	4,31	3,74	3,41	7,49
Měření 5	4,48	6,84	6,84	2,86	4,93
Měření 6	6,00	5,34	4,25	5,46	5,81
Měření 7	8,19	8,20	4,07	3,90	4,69
Měření 8	8,37	8,29	7,94	4,71	6,09
Průměr	6,05	6,29	5,87	4,62	6,35
Sm. Odchylka	1,99	1,55	1,77	1,09	1,51

Rz( $\mu\text{m}$ )	M1	M2	M3	M4	M5
Měření 1	41,41	21,21	26,52	32,08	27,87
Měření 2	22,02	34,75	52,29	33,46	37,60
Měření 3	27,91	33,24	38,76	29,85	37,45
Měření 4	24,54	25,60	21,68	21,26	49,02
Měření 5	23,18	34,14	36,86	42,37	49,39
Měření 6	30,61	20,60	23,09	29,16	25,75
Měření 7	43,81	28,06	30,11	22,96	30,45
Měření 8	47,70	40,28	48,36	27,90	44,66
Průměr	32,65	29,74	34,71	29,88	37,77
Sm. Odchylka	10,16	7,01	11,40	6,55	9,30

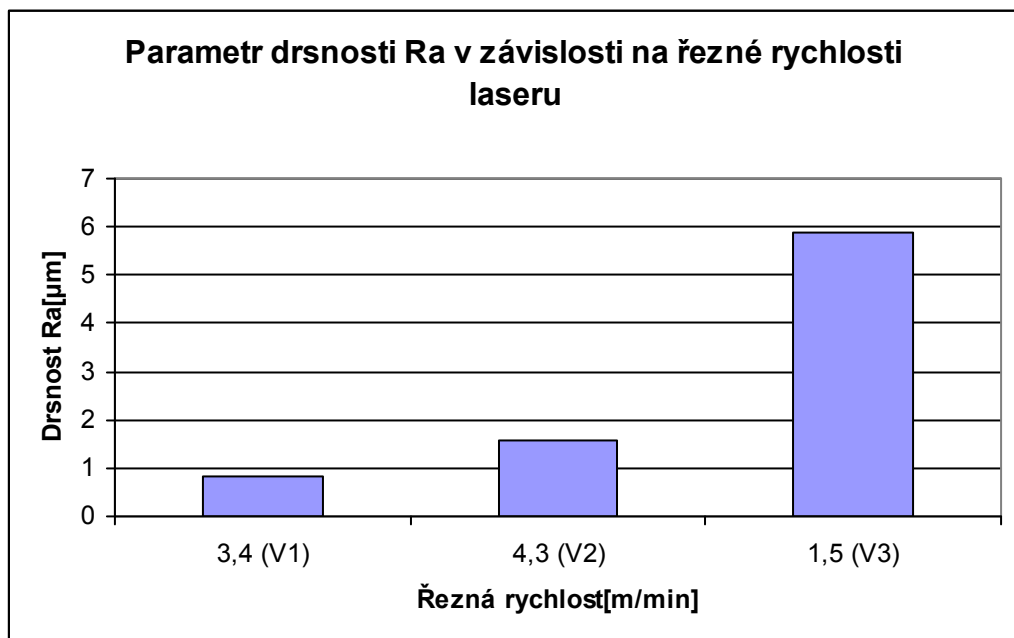


Obr. 35. Graf drsnosti profilu řezné plochy s fotkou řezné plochy vzorku 3

Naměřené a hodnocené hodnoty byly získány ve středu vzorků, tzn. M2 pro vzorky 1 a 2  
M3 pro vzorek 3.

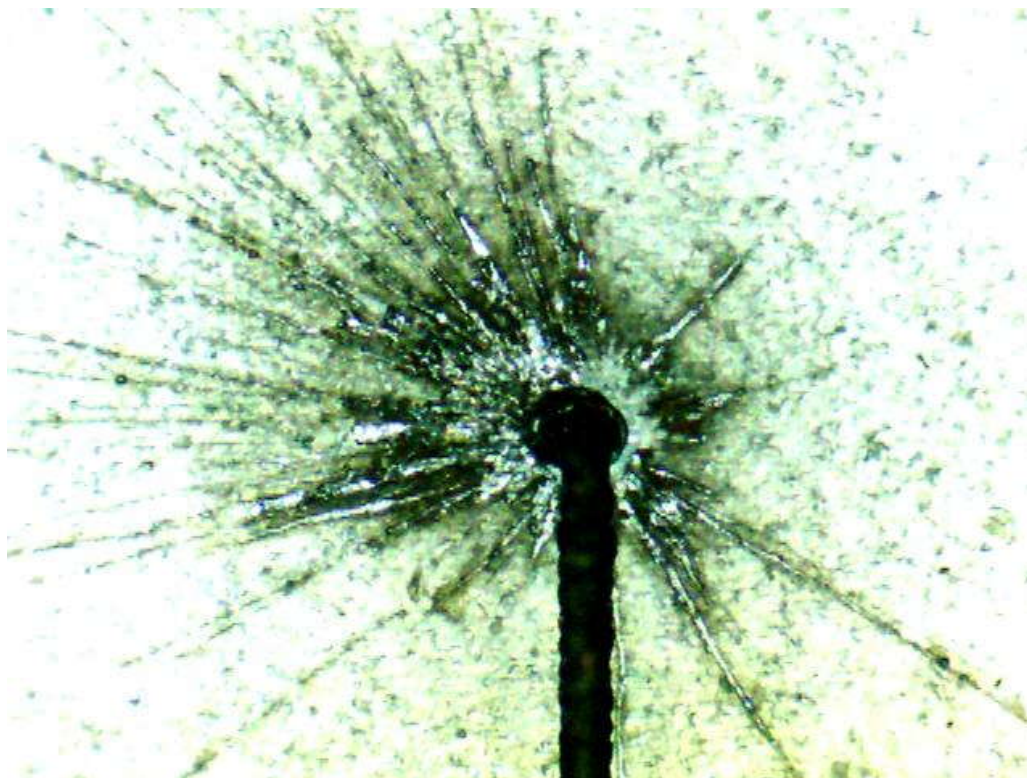


Obr. 36. Graf pro Ra v závislosti na řezném výkonu



Obr. 37. Graf pro Ra v závislosti na řezné rychlosti

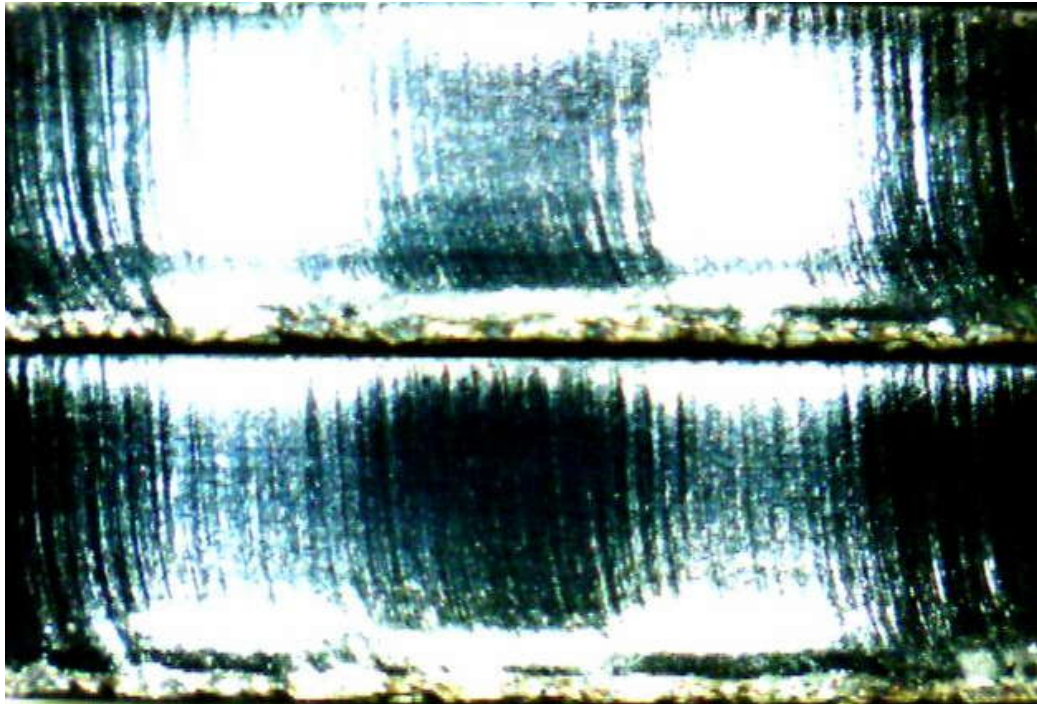




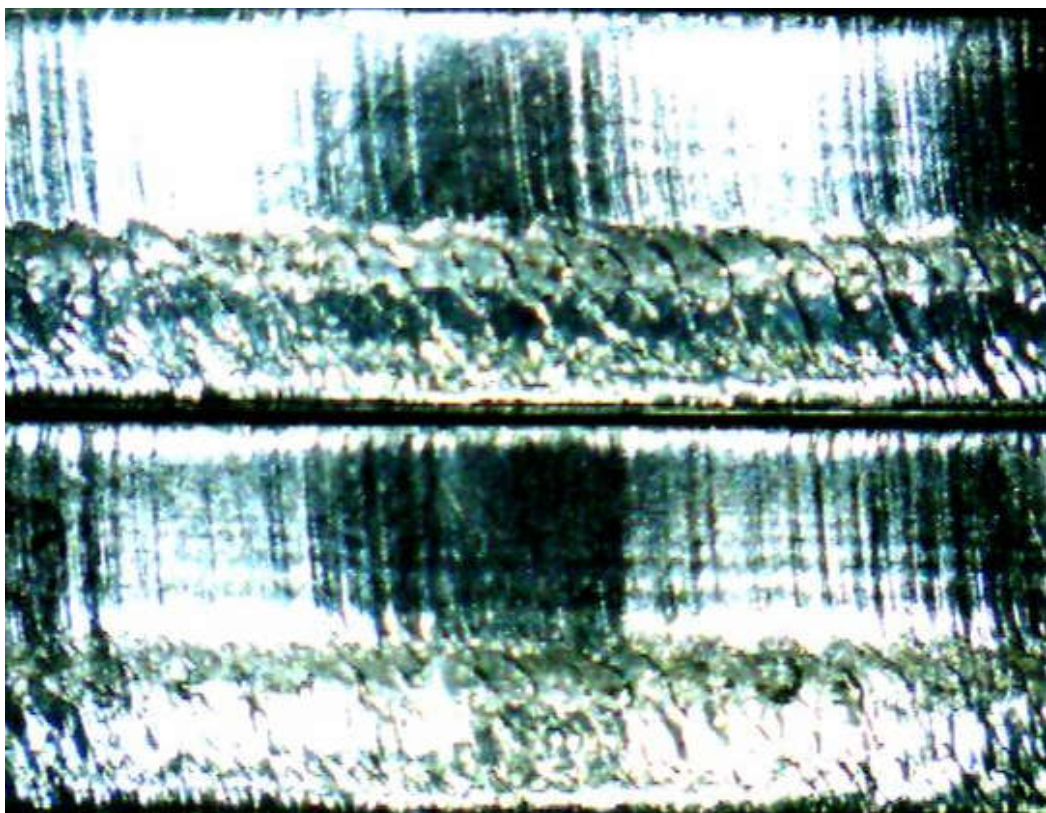
*Obr. 38. Vstup laseru v náběhu s viditelným poškozením povrchu*



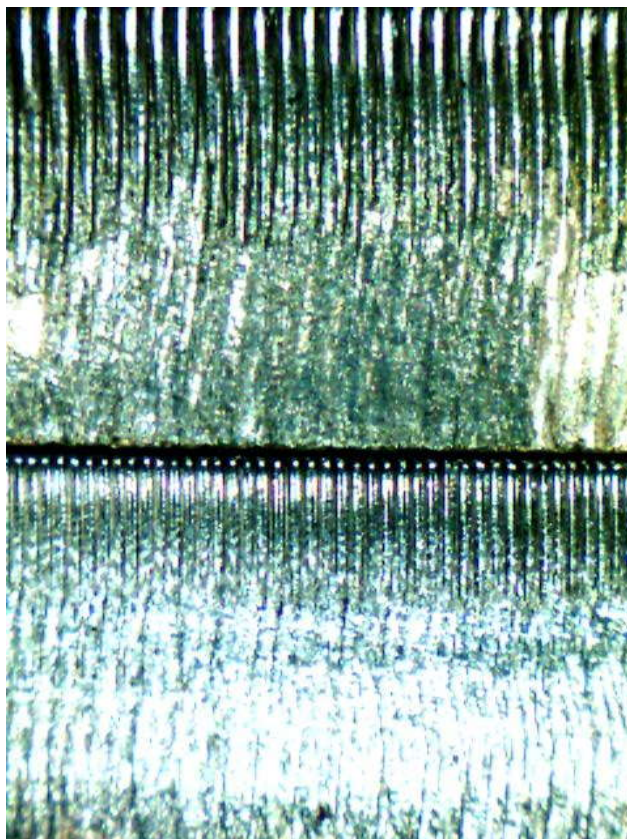
*Obr. 39. Výstup laseru z materiálu v místě náběhu s viditelným odstříkem roztaveného materiálu*



*Obr. 40. Srovnání dvou vzorků (Vzorek 1)*



*Obr. 41. Srovnání dvou vzorků (Vzorek 2)*



*Obr. 42. Srovnání dvou vzorků (Vzorek 3)*

## ZÁVĚR

Měření drsnosti bylo na vzorcích provedeno přístrojem Mitotuyo surfest SJ-301. Každý ze vzorků byl změřen ve dvou místech po obvodu ve více hladinách pro přesnější výsledek měření.

Z odečtených a zprůměrněných hodnot byly vytvořeny grafy, které posloužily pro odečtení hodnot profilu drsnosti rozložené na řezné ploše.

Dále pomocí digitálního mikrometru ProScope HR jsem si vytvořil snímky na kterých jsem si zobrazil viditelné stopy po laserovém řezání. Rýhování, které za sebou zanechal laser prořezávající se materiálem, rozstřík odtaveného materiálu na spodní straně, nebo poškození povrchu ve vstupu laseru do materiálu v náběhové dráze.

U vzorku 1 bylo zjištěno, že směrem od vrchní strany, tedy od vstupu laserového paprsku, drsnost směrem k výstupu paprsku z materiálu klesá.

U vzorku 2 bylo zjištěno, že směrem od vrchní strany drsnost směrem k výstupu paprsku z materiálu stoupá.

U vzorku 3 bylo zjištěno, že směrem od vrchní strany drsnost klesá až do místa výstupu paprsku z materiálu, kde drsnost naopak narůstá.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] MORÁVEK, M. *Nekonvenční metody obrábění* : 2.vyd.. ZČU Plzeň, 1999. 102 p.
- [2] NOVOTNÝ, J. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů* : 1.vyd.. SNTL Praha, 1980. 216 p.
- [3] NEDBAL, R. *Strojírenská technologie : pracovní sešit pro 3.ročník SPŠ, Zlín* 104 p.
- [4] MAŇKOVÁ, I. *Progresivní technologie* : 1.vyd. Viena Košice, 2000. 275 p.
- [5] Historie laseru [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupný z WWW:  
<[www.laserart.wbs.cz/Historie\\_laseru.html](http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html)>
- [6] Plyny pro řezání laserem [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupný z WWW:  
<[www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind\\_laser2](http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_laser2)>
- [7] Lasery, laserové technologie a stroje s laserem [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW: <[www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem](http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem)>
- [8] Nekonvenční metody obrábění [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW:  
<[www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil](http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil)>
- [9] Laserové zařízení při řezání [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z  
<[www.esab.com.cn/global/en/news/images/901311\\_Lasercutting.jpg](http://www.esab.com.cn/global/en/news/images/901311_Lasercutting.jpg)>
- [10] CP SERIES OF CO2 LASERS [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW:  
<[www.prima-na.com/pages/20\\_cp.cfm](http://www.prima-na.com/pages/20_cp.cfm)>
- [11] ROFIN DC series [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW:  
<[www.rofin.com/index.php?id=161&L=1](http://www.rofin.com/index.php?id=161&L=1)>
- [12] Přístroj pro měření drsnosti povrchu Surfrest SJ [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW: <[www.mbcaltibr.cz/prodej/produkt/735-pristroj-na-mereni-drsnosti-povrchu-surfrest-sj-301/](http://www.mbcaltibr.cz/prodej/produkt/735-pristroj-na-mereni-drsnosti-povrchu-surfrest-sj-301/)>
- [13] Mitutoyo surfrest SJ-301 [online]. [cit. 2010-05-28]. Dostupné z WWW:  
<[www.meiyar.com/liangju/SJ301.jpg](http://www.meiyar.com/liangju/SJ301.jpg)>

[14] Mikroskop ProScope s velkou rozlišovací schopností [online]. [cit. 2010-05-28].

Dostupné z WWW:

<[http://www.technikaatrh.cz/index.php?sec=rubrika&id\\_rubrika=41&start=21](http://www.technikaatrh.cz/index.php?sec=rubrika&id_rubrika=41&start=21)>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
NMO	Nekonvenční metody obrábění
VKP	Vysokotlaký kapalinový paprsek
$E_0, E_1$	Energetické hladiny
H	Planckova konstanta
N	Frekvence
JIT	Just in time
HAZ	(Heat-affected zone) Tepelně ovlivněná oblast
Ra, Rz	Parametry drsnosti povrchu
STN, DIN, ISO	Technické normy
F, Fa, Fp	Síly
X	Oblast přetvoření
$T_t$	Moment sil
E	Hodnota zatlačení břitu do materiálu
$\chi$	Úhel hlavního ostří
S	Tloušťka materiálu
$\lambda$	Úhel mezi noži
A,p	Ramena
$M_{1,\dots,5}$	Hladina měření
$V_{1,2,3}$	Vzorek

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Anodomechanické řezání [1]</i> .....	13
<i>Obr. 2. Schéma řezání kapalinovým paprskem [1]</i> .....	14
<i>Obr. 3. Schéma řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí [1]</i> .....	15
<i>Obr. 4. Přechod elektronu [1]</i> .....	18
<i>Obr. 5. Princip laseru [1]</i> .....	18
<i>Obr. 6. Schéma zařízení pro obrábění laserem [8]</i> .....	19
<i>Obr. 7. Konstrukce CO2 laseru [7]</i> .....	20
<i>Obr. 8. Konstrukce polovodičového laseru [7]</i> .....	21
<i>Obr. 9. Konstrukce Nd:YAG laseru [7]</i> .....	21
<i>Obr. 10. Schéma laserové řezací hlavy [4]</i> .....	23
<i>Obr. 11. Laserové zařízení při řezání [9]</i> .....	24
<i>Obr. 12. Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem [4]</i> .....	29
<i>Obr. 13. Model tvoření rýhy v zóně tavného řezání laserem [4]</i> .....	30
<i>Obr. 14. Účinek rychlosti posuvu na drsnost povrchu pro různé hloubky [4]</i> .....	31
<i>Obr. 15. Vliv výšky materiálu na drsnost povrchu pro různé tlaky příd. plynu [4]</i> .....	31
<i>Obr. 16. Vztah mezi kvalitou řezu a průtokem přídavného plynu [4]</i> .....	32
<i>Obr. 17. Princip stříhání bez přidržovače [2]</i> .....	34
<i>Obr. 18. Rozložení tlaků v okolí střížné roviny [2]</i> .....	35
<i>Obr. 19. Střížná plocha [2]</i> .....	36
<i>Obr. 20. Silová působení [2]</i> .....	36
<i>Obr. 21. Schéma napjatosti při přesném vystřihování [2]</i> .....	40
<i>Obr. 22. Vystřihování se zaoblenými střížnými hranami [2]</i> .....	41
<i>Obr. 23. Vystřihování se zkoseným přidržovačem [2]</i> .....	42
<i>Obr. 24. Makrostruktura přesně stříhané součásti [2]</i> .....	42
<i>Obr. 25. Přesné vystřihování [2]</i> .....	43
<i>Obr. 26. Kvalita střížné plochy</i> .....	43
<i>Obr. 27. Synchrono CP 4000 [10]</i> .....	48
<i>Obr. 28. Rofin DCO20 [11]</i> .....	49
<i>Obr. 29. Mitutoyo SJ-301 [13]</i> .....	50
<i>Obr. 30. Rozložení měřených poloh</i> .....	51
<i>Obr. 31. Schéma procesu měření</i> .....	52



---

<i>Obr. 32. Schéma měření .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 33. Graf drsnosti profilu řezné plochy s fotkou řezné plochy vzorku 1 .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 34. Graf drsnosti profilu řezné plochy s fotkou řezné plochy vzorku 2 .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 35. Graf drsnosti profilu řezné plochy s fotkou řezné plochy vzorku 3 .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 36. Graf pro Ra v závislosti na řezném výkonu .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 37. Graf pro Ra v závislosti na řezné rychlosti .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38. Vstup laseru v náběhu s viditelným poškozením povrchu.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39. Výstup laseru z materiálu v místě náběhu s viditelným odstříkem roztaveného materiálu .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 40. Srovnání dvou vzorků (Vzorek 1) .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 41. Srovnání dvou vzorků (Vzorek 2) .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 42. Srovnání dvou vzorků (Vzorek 3) .....</i>	<i>59</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1. Doporučené parametry pro řezání CO<sub>2</sub> laserem [4]</i> .....	25
<i>Tab. 2. Vhodné úhly [2]</i> .....	38