



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA MOŽNOSTÍ LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ

THE ANALYSIS OF POSSIBILITY LASER CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VOJTĚCH PLEVKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vojtěch Plevka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza možností laserového řezání

v anglickém jazyce:

The analysis of possibility laser cutting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor možností laserové technologie z hlediska přesnosti a jakosti povrchu ve srovnání s klasickými metodami dělení materiálu.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Obecné možnosti laserové technologie.

Přesnost pálení při laserové technologii řezání.

Přesnost dělení materiálu při klasickém způsobu.

Technické porovnání a vyhodnocení vzorků.

Doporučení pro praktickou realizaci z hlediska dosažených výsledků vyhodnocení.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

BARCAL, Jaroslav, Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

CARISTAN, Charles L. Laser cutting guide for manufacturing. 1th ed. Michigan: SME, 2004, p. 447, ISBN 978-0-87263-686-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 24.10.2012




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá použitím laserů ve strojírenství, zejména technologií dělení materiálu laserem. Ta je srovnávána za pomoci kontrolních vzorků s technologií vysekávání a stříhání. Srovnávány jsou parametry struktury povrchu, rozměrová přesnost a vzhled dělicí plochy. Na základě výsledků bylo vytvořeno doporučení pro praktickou realizaci.

Klíčová slova

laser, řezání, stříhání, vysekávání, plech

ABSTRACT

Master's thesis deals with application of lasers in manufacturing, mainly with the technology of cutting material. This technology is compared with the technology of punching and cutting sheet metal, with the aid of control specimens. The parameters of surface structure, dimension accuracy and appearance of cutting surfaces are compared. By consensus of results the recommendation for practical realization was created.

Key words

laser, cutting, punching, sheet metal

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PLEVKA, Vojtěch. *Analýza možností laserového řezání*. Brno 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 82 s. 14 příloh. Ing. Karel Osička, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Analýza možností laserového řezání** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21. 5. 2013

Datum



Bc. Vojtěch Plevka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Karlu Osičkovi Ph.D. za připomínky a rady důležité pro vypracování této diplomové práce, celé své rodině a přátelům za soustavnou pomoc po celou dobu studia, firmám Technologické centrum a.s., Pulco a.s., Trumpf s.r.o. a všem zaměstnancům těchto firem, kteří se podíleli na výrobě zkušebních vzorků, případně poskytli cenné technické informace.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD.....	9
1 DĚLENÍ MATERIÁLU	10
1.1 Vzorky	10
1.2 Výrobní stroje	10
2 OBECNÉ MOŽNOSTI LASEROVÉ TECHNOLOGIE	12
2.1 Historie laseru	12
2.2 Základní pojmy	13
2.3 Funkční princip laseru	14
2.4 Vlastnosti laserového záření	16
3 TYPY LASERŮ	17
3.1 Pevnolátkové lasery	17
3.2 Plynové lasery	19
3.3 Kapalinové lasery	21
3.4 Polovodičové lasery	21
3.5 Přehled nejpoužívanějších typů laserů	22
4 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE LASERŮ	24
4.1 Vrtání laserem	24
4.2 Svařování laserem	25
4.3 Laserové povlakování	25
4.4 Laserové popisování	26
4.5 Laserová dekorace skla	27
4.6 Gravírování laserem	28
4.7 Tepelné zpracování laserem	28
4.8 Soustružení laserem	29
5 ŘEZÁNÍ LASEREM	30
5.1 Typy laserů používané pro laserové řezání	31
5.2 Rozdělení intenzity v průřezu paprsku	32
5.3 Provozní režimy	33
5.5 Stroje pro laserový řez	36
5.6 Plyny používané pro řezání laserem	38

5.7	Materiály vhodné pro laserové řezání	40
5.8	Řezání a vyřezávání trubek laserem.....	40
5.9	Faktory ovlivňující řez laserem.....	45
6	KVALITA A TEORETICKÁ PŘESNOST DĚLENÍ MATERIÁLU.....	48
6.1	Řezání laserem	48
6.2	Vysekávání a stříhání.....	53
7	STRUKTURA POVRCHU	56
7.1	Názvy geometrických parametrů.....	56
7.2	Výškové parametry – výstupky a prohlubně.....	56
7.3	Výškové parametry – průměrné hodnoty souřadnic.....	57
7.4	Křivky a odpovídající parametry	58
8	VÝROBA A MĚŘENÍ VZORKŮ.....	59
8.1	Vzorky a jejich materiál	59
8.2	Měření parametrů R_a , R_z a $R_{mr}(c)$	59
8.3	Měření rozměrové přesnosti	61
8.4	Fotodokumentace vzorků	62
9	TECHNICKÉ POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ.....	63
9.1	Struktura povrchu.....	63
9.2	Rozměrová přesnost.....	68
9.3	Fotodokumentace dělicích ploch vzorků	72
9.4	Základní ekonomické zhodnocení.....	73
10	DOPORUČENÍ PRO PRAKTICKOU REALIZACI	75
11	DISKUZE	77
	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82

ÚVOD

Laserové přístroje od svého oficiálního vzniku v roce 1960 zaznamenaly velmi prudký rozvoj. Zhruba od 90. let 20. století došlo k jejich masivnímu nasazení ve všech možných odvětvích lidského působení. Jedná se zejména o strojírenství, elektrotechniku, stavitelství, lékařství a komunikační technologie.

Díky laserům (obr. 1) je dnes možné provádět úkony, které by byly ještě v nedávné minulosti zcela nerealizovatelné. Od přesného dělení materiálu, svařování, vytváření datových stop, velmi rychlých přenosů informací, vyměřování polohy při stavbách, až po velmi náročné operace v lékařství, které jsou pro pacienta téměř neinvazivní.



Obr. 1 Laserový paprsek [1].

Tato práce se, kromě úvodního přiblížení současných druhů laserů a jejich použití ve strojírenství, zabývá vybranou strojírenskou aplikací. Touto aplikací je řezání materiálu laserem (obr. 2). Ta je v práci srovnávána, za pomoci zkušebních vzorků, s dalšími způsoby dělení materiálu, běžně používanými ve strojírenství. Stříháním na tabulových nůžkách a dělením na vysekávacím stroji.



Obr. 2 Řezání materiálu laserem [2].

1 DĚLENÍ MATERIÁLU

Práce porovnává tři vybrané možnosti dělení materiálu ve formě plechu běžně používané ve strojírenství. Ze zadání plyne, že stěžejní z nich je dělení materiálu laserem.

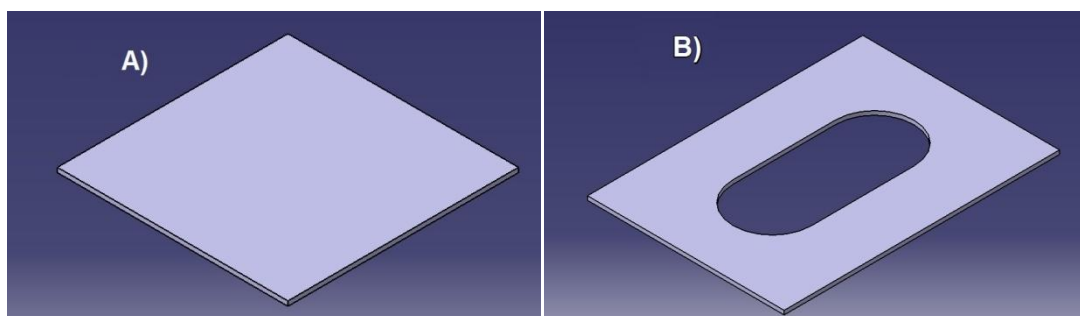
Po zvážení možných způsobů dělení materiálu, hodících se pro účel dělení plechů, bylo nakonec zvoleno stříhání materiálu na tabulových nůžkách a dělení materiálu na vysekávacím stroji. Druhá ze jmenovaných metod donedávna patřila k nekonvenčním metodám dělení materiálu. V současné době se však již jedná o běžně používanou metodu.

Pro srovnání jmenovaných metod byly navrženy dva typy vzorků. Jeden slouží k porovnání laseru s tabulovými nůžkami a druhý k porovnání laseru s vysekávacím strojem.

1.1 Vzorky

Vzorky byly vytvořeny z plechu oceli 1.0330 (konstrukční ocel tvářená za studena).

Technologická náročnost vzorků není velká, jedná se o základní geometrické tvary. Vzorek A (obr. 1.1) má tvar čtverce a slouží pro srovnání laseru s tabulovými nůžkami. Vzorek B (obr. 1.1) má tvar obdélníku s otvorem složeným z obdélníku a dvou půlkruhů a slouží pro srovnání laseru s vysekávacím strojem. Jednotlivé výrobní výkresy vzorků se nachází v příloze.



Obr. 1.1 3D modely vzorků A a B z programu CATIA V5R19.

1.2 Výrobní stroje

Stroje byly zvoleny tak, aby byly v rámci možností co nejmodernější. Všechny pracují na CNC bázi a jejich stáří není více jak 8 let.

Tab. 1.1 Výrobní stroje.

Řezací CO₂ laser	Bystronic – Byspeed 5 200
Hydraulické tabulové nůžky	Durma – CNC HGM 4 013
Vysekávací stroj	Trumpf – TruPunch 5 000

CO₂ laser (Obr. 1.2) je výrobkem švýcarské firmy Bystronic, tato firma patří v současnosti k hlavním evropským výrobcům dělicí a ohýbací techniky. Výroba vzorků byla uskutečněna na stroji vlastněném společností Technologické centrum a.s., sídlící na adrese Kulkova 14, 614 00 Brno.



Obr. 1.2 CO₂ laser Bystronic Byspeed 5 200 [3].

Hydraulické tabulové nůžky (obr. 1.3) jsou výrobkem turecké firmy Durmazlar (DURMA).



Obr. 1.3 Hydraulické tabulové nůžky Durma CNC HGM 4 013 [4].

Vysekávací stroj (obr. 1.4) je výrobkem německé firmy Trumpf, ta je jedním z největších světových výrobců strojírenské a jiné techniky. K výrobě vzorků byly použity stroje (tabulové nůžky, vysekávací stroj) vlastněné společností Pulco a.s., sídlící na adrese Heršpická 758/13, 656 92 Brno.



Obr. 1.4 Vysekávací stroj Trumpf TruPunch 5 000 [5].

2 OBECNÉ MOŽNOSTI LASEROVÉ TECHNOLOGIE

Pojem **LASER** je zkratkou anglického názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mision of **R**adiation, což by šlo do českého jazyka přeložit jako „zesílení světla stimulovanou emisí záření“.

Laser je generátorem a následně zesilovačem koherentního (vnitřně uspořádaného), monochromatického (o stejné vlnové délce a frekvenci) optického záření s velmi nízkou rozbíhavostí svazku a vysokou hustotou přenášeného výkonu. [6]

2.1 Historie laseru

Stimulovaná emise (princip vzniku laserového paprsku), byla teoreticky předpovězena A. Einsteinem v roce 1917. V roce 1940 byla poprvé použita k zesilování světla W. A. Fabrikantem. Roku 1954 byly vytvořeny základy laserového generátoru N. G. Basovem a A. M. Prochorovem. První pevnolátkový laser s rubínovým krystalem byl sestaven roku 1960 T. H. Maimanem. V roce 1961 byl uveden do provozu plynový laser (CO_2) A. Javanem, W. R. Bennetem a D. R. Herriotem. Roku 1962 byl vyvinut polovodičový laser.

Ani tehdejší Československo nezůstalo ve vývoji laseru pozadu, v letech 1962 a 1963 byly v Brně na pracovištích Československé akademie věd a Vojenského výzkumného ústavu uvedeny do provozu tři různé typy laserů (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Ing. František Petrů, vedoucí vývoje plynových laserů [8].

Od prvních strojů v 60. letech 20. století došlo do dnešní doby u laseru k velkému vývoji. Existují lasery různých velikostí, výkonů, konstrukcí, typů aktivního prostředí, zdrojů energie, atd. Tato rozmanitost předurčuje jejich využití v nejrůznějších oblastech. [6,7,9]

2.2 Základní pojmy

Laserový paprsek je optické vlnění s vlnami o stejné vlnové délce, patří do skupiny elektromagnetického záření. Na rozdíl od běžného světelného záření, kde se světlo šíří všemi směry, má různou frekvenci a vlnovou délku (celé barevné spektrum), se v laseru podařilo poprvé vytvořit podmínky, kdy ve vhodném aktivním prostředí za pomoci stimulujícího elektromagnetického záření dojde k potlačení spontánní emise na úkor emise vynucené.

Foton

- Nejmenší částice světla. Energie fotonu je dána vlnovou délkou příslušného elektromagnetického záření. Čím je vlnová délka záření kratší, tím je větší energie fotonu. [6,10]

Kvantová soustava

- Je označení pro systém, jehož chování a interakce je popisována zákony kvantové mechaniky. Jedná se o systémy molekul, atomů, ionty, elektronů atd. [6,10]

Základní stav

- Je stav kvantové soustavy s nejnižší energií. Pokud na soustavu nepůsobí vnější vlivy, je vysoká pravděpodobnost, že se nachází v tomto stavu. [6,10]

Excitovaný stav

- Je takový stav kvantové soustavy, kdy je její energie vyšší než v základním stavu. Energie soustavy může nabývat různé hodnoty z množiny povolených stavů. Tento stav není trvalý a soustava po určité době přechází do stavu s nižší energií (deexcituje se). [6,10]

Excitace

- Je děj, při kterém se kvantová soustava dostává do stavu s vyšší energií. Aby k tomuto ději došlo, musí soustava přijmout přesné množství excitační energie. [6,10]

Absorpce

- Je pohlcení fotonu při interakci s kvantovou soustavou. Foton zaniká a jeho energie je využita k excitaci soustavy. Tato energie fotonu je soustavou pohlcena bez zbytku. [6,10]

Spontánní emise

- Je děj opačný absorpci, nastává v případě uvolnění energie kvantovou soustavou ve formě fotonu. Výsledná energie fotonu se přímo rovná rozdílu energií na počátku a konci deexcitace soustavy. Emitovaný foton má kromě energie také další vlastnosti, např. směr šíření. Jsou zcela náhodné a z hlediska laserového záření je lze považovat za šum. [6,10]

Stimulovaná emise

- Je proces vyzáření fotonu excitovanou soustavou, který vyvolává interakce soustavy s fotony stimulujícího záření z vnějšího zdroje. Nutná podmínka pro tento děj je, aby se energie stimulujícího fotonu rovnala energii některého z přechodů excitované soustavy. Podstatné je, že vlastnosti stimulujícího a emitovaného fotonu jsou totožné. Na tomto procesu je založeno zesilování světla v laserech. [6,10]

Aktivní prostředí

- Je systém kvantových soustav schopných přejít po přívodu excitační energie do excitovaného stavu a setrvat v něm dostatečně dlouhou dobu. Aktivní prostředí laseru mohou představovat samostatné molekuly, atomy či ionty, periodicky uspořádané skupiny atomů (polovodiče a krystalické izolanty), nebo náhodně uspořádané skupiny atomů (kapaliny a pevné amorfnní látky). [6,10]

Buzení

- Je způsob, jakým se do aktivního prostředí dodává excitační energie. Druh buzení závisí na použitém aktivním prostředí. Může být uskutečněno optickým zářením (výbojka, laserová dioda), elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, expanzí plynu atd. Zdroje buzení mohou pracovat kontinuálně i pulzně. [6,10]

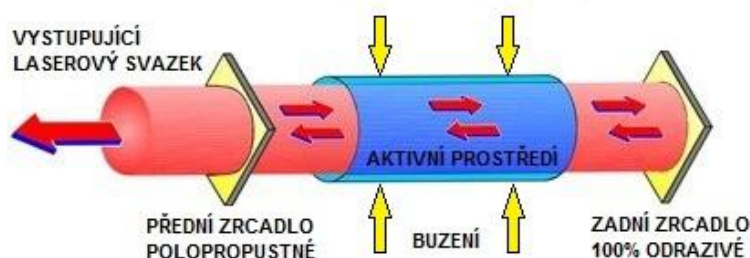
Rezonátor

- Je soustava minimálně dvou zrcadel zajišťujících interakci záření a aktivního prostředí. Jedno z těchto zrcadel má obvykle vysokou míru odrazivosti. Druhé zrcadlo má odrazivost podmíněnou způsobem výstupu energie z rezonátoru. [6,10]

2.3 Funkční princip laseru

Přestože existuje velké množství různých typů laserových generátorů, každý má v sobě obsažen tři základní části (obr. 2.2):

- aktivní prostředí,
- zdroj buzení (čerpání),
- rezonátor.



Obr. 2.2 Obecné schéma laseru [11].

Základní význam pro funkci laseru má proces stimulované emise (obr. 2.3), který může vzniknout při interakci excitovaného kvantového systému s elektromagnetickým zářením (fotonem), jehož frekvence ν odpovídá energetickému rozdílu $E_2 - E_1$ mezi excitovaným a níže položeným stavem systému. Přitom dochází k přechodu systému do stavu s nižší energií a současně je excitační energie uvolněna emitací fotonu o energii E .

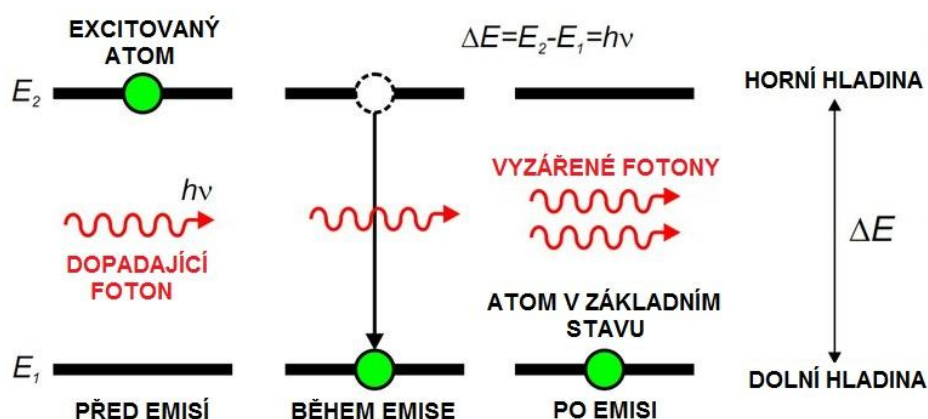
Vztah pro výpočet energie emitovaného fotonu [6]:

$$E = h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad [J] \quad (2.1)$$

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

ν ... frekvence elektromagnetického záření.

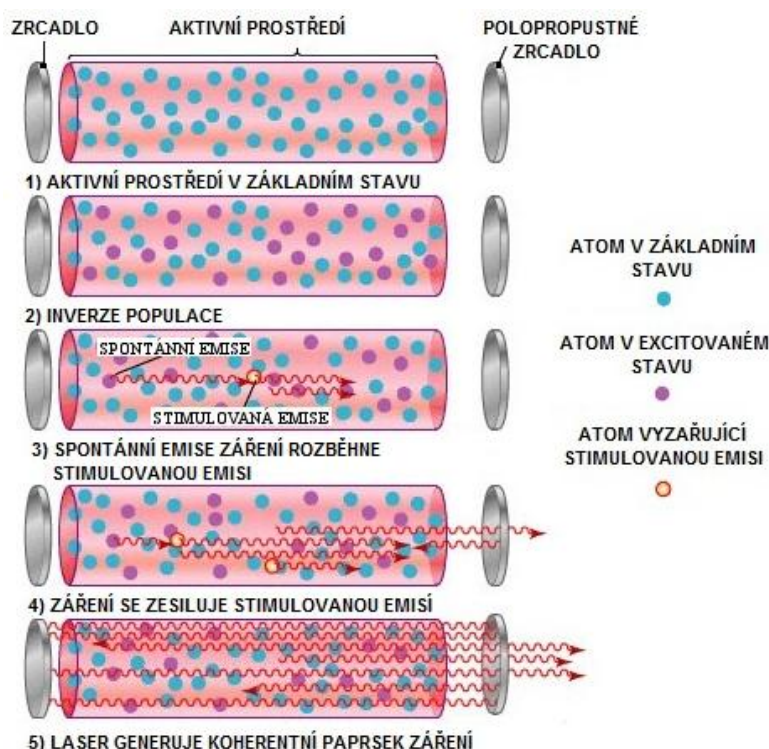
Podstatné je, že vlastnosti emitovaného fotonu jsou stejné jako u fotonu, který emisi vyvolal. Toto je hlavní podstatou zesilování záření.



Obr. 2.3 Princip stimulované emise [11].

Obecný princip laseru (obr. 2.4) je následující. Zdroj budící energie zajišťuje, aby v aktivním prostředí byl dostatek kvantových soustav v excitovaném stavu. Poté, co některá ze soustav aktivního prostředí přejde náhodně spontánní emisí na nižší hladinu, uvolněné kvantum bude stimulovat i další kvantové soustavy k přechodu na nižší energetickou hladinu a emisi fotonů. Část fotonů se může soustavami opět absorbovat. Pokud však bude v aktivním prostředí velké množství soustav v excitovaném stavu (inverze populace hladin), bude se záření řetězovou reakcí zesilovat. Spontánní emise se stane zanedbatelnou vzhledem ke stimulované a generované záření nabude jednotné povahy (koherentní a monochromatické).

Aby se zajistila směrovost laserového záření, utváří se aktivní prostředí do tvaru dlouhého válce, které je umístěno uvnitř rezonátoru. Rezonátor zajišťuje selektivní zpětnou vazbu systému, jen rezonující fotony se mohou zesilovat. Jeho vlastnosti lze nastavit tak, aby vyhovovaly parametrům požadovaného paprsku. Po dostatečném zesílení je paprsek vyveden ven z rezonátoru. [6,10,11]



Obr. 2.4 Obecný princip laseru [11].

2.4 Vlastnosti laserového záření

a) Koherentnost

Všechny fotony kmitají synchronně. Vlnění má stejnou fázovou polohu. Díky čemuž vzniká soudržný laserový paprsek. [6,10,12]

b) Usměrněnost

Fotony se v prostoru nešíří chaoticky, ale vždy jen v úzkém svazku a stejném směru. Fokusací na malou plošku lze dosáhnout extrémně vysoké hustoty výkonu, díky tomu je možné obrábění materiálu. [6,10,12]

c) Monochromaticnost

Laser emituje vlnění se zanedbatelnými fázovými nestabilitami, je časově koherentní. S touto vlastností je svázána vysoká monochromaticnost frekvence záření. Frekvence kmitání viditelného světla je řádově 10^{15} Hz, kdežto u laseru se pohybuje od 10^8 do 10^9 Hz. Stabilizací lze kolísání frekvence redukovat o několik řádů. [6,10,12]

d) Vysoký generovaný výkon

Laser umožňuje generovat extrémně krátké světelné impulzy. Při použití pulzního laseru lze v úzké oblasti vlnových délek generovat výkon v řádu od 10^{-10} do 10^{-13} W. [6,10,12]

3 TYPY LASERŮ

Existuje mnoho různých skupin laserů, jejich základní princip je stejný, liší se však konstrukcí a realizací jednotlivých částí. Dělení laserů do skupin probíhá podle několika kritérií.

a) Podle aktivního prostředí se lasery dělí na:

- pevnolátkové,
- kapalinové,
- plynové,
- plazmové,
- polovodičové,
- s volnými elektrony.

b) Podle režimu generace:

- kontinuální,
- pulzní.

c) Podle způsobu čerpání:

- opticky,
- elektrickým výbojem,
- chemickou reakcí,
- elektronovým svazkem, atd.

d) Podle frekvenční oblasti:

- submilimetrové,
- infračervené,
- viditelné,
- ultrafialové,
- rentgenové.

Lasery lze dělit podle mnoha dalších kritérií, ovšem nejpoužívanější a nejuniverzálnější je prvně uvedené rozdělení podle aktivního prostředí. [6]

3.1 Pevnolátkové lasery

Do této skupiny lze v podstatě zařadit všechny typy laserů, jež mají aktivní prostředí v pevném stavu. V praxi se takto označují opticky čerpané pevnolátkové iontové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří matrice krystalické, nebo amorfnní látky (sklo, keramika) dopovaná ionty.

Pevnolátkové lasery jsou schopny pracovat flexibilně ve všech možných režimech. Generované vlnové délky se nacházejí ve viditelné a infračervené oblasti spektra. Lasery jsou robustní, stabilní a méně náročné na údržbu a provozní podmínky, než ostatní typy. [6]

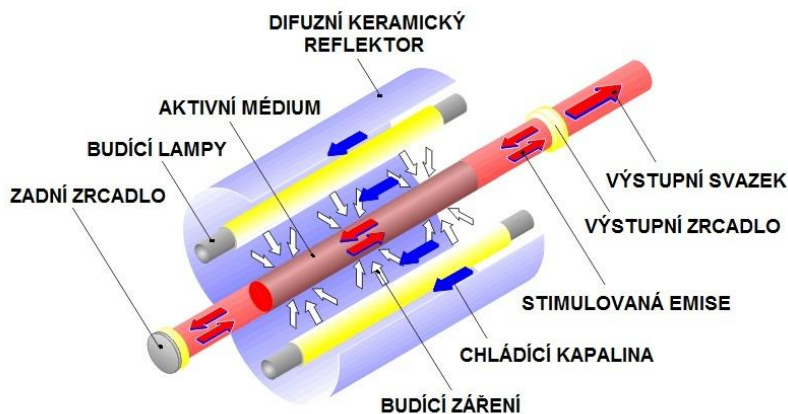
Vybrané typy pevnolátkových laserů:

Rubínový laser

Aktivním prostředím je rubínový krystal generující záření o vlnové délce $0,694\text{ }\mu\text{m}$. Pracuje převážně v pulzním režimu. Jedná se o první vyrobený typ pevnolátkového laseru vůbec. Je používán pro vrtání tvrdých materiálů, v medicíně, holografii a v laserové lokalizaci družic. V současné době je většinou nahrazován Nd:YAG laserem.

Nd:YAG laser

Je v současné době nejpoužívanějším a nejlépe technicky zvládnutým typem pevnolátkového laseru (obr. 3.1). Aktivním prostředím je krystal yttrium aluminium granát dopovaný ionty neodymu. Tento laser pracuje v pulzním i kontinuálním režimu. Dosahuje výkonu řádově ($10^2 - 10^3$) W. Generuje záření o vlnové délce $1,06\text{ }\mu\text{m}$. K buzení se používají budící výbojky (lampy), nebo laserové diody. Ty jsou spolu s krystalem chlazeny deionizovanou vodou. Tvar rezonátoru je volen tak, aby většina světla dopadala na krystal. Dutina je vakuově pokovená mědí nebo zlatem ke zvýšení odrazivosti.



Obr. 3.1 Nd:YAG laser [11].

Jeho využití je velmi široké. Používá se pro řezání, vrtání, svařování, žíhání a značkování materiálu. Dále v medicíně (chirurgie, oční mikrochirurgie), vědě (spektroskopie), biologii a vojenských aplikacích (radarová technika). [6,9,10,12]

Nd:YLF laser

Aktivním prostředím je krystal lithium yttrium fluorid dopovaný ionty neodymu, který generuje záření vlnové délky $1,053\text{ }\mu\text{m}$. [6]

Er:YAG laser

Aktivním prostředím je krystal yttrium aluminium granát dopovaný ionty erbia. Generuje záření o vlnových délkách 1,56 a 2,94 μm . Používá se v chirurgii, stomatologii a v laserových dálkoměrech. [6,9,10,12]

3.2 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je tvořeno atomy (He – Ne laser), ionty (Ar laser), molekulami (CO_2 laser), nebo jejich směsmi v plynné fázi. Jsou schopné generovat záření v rozsáhlém spektru vlnových délek. Pracují převážně v kontinuálním režimu, ovšem existují i výkonná pulzní zařízení.

Pro buzení se používá široká škála fyzikálních a fyzikálně – chemických dějů. K nejpoužívanějším patří buzení pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, příčné buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků, buzení elektronovým svazkem, chemickou reakcí, či expanzí horkého plynu. Optické buzení se takřka nepoužívá.

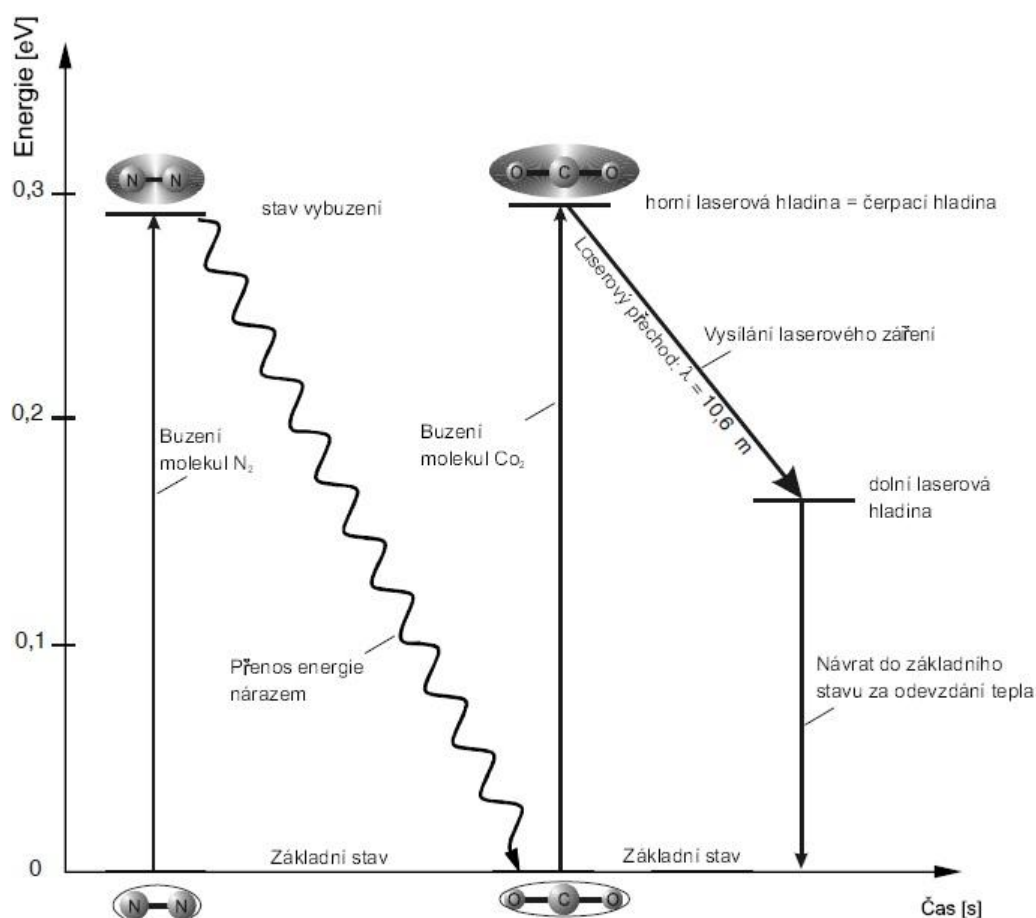
Velkou výhodou plynových laserů je jejich vysoká účinnost, pohybující se v desítkách procent. Mají velmi homogenní laserový svazek s nízkou rozbíhavostí, dosahující až teoretické meze. Hlavní nevýhodou je malý výkon získaný z jednotky objemu aktivního prostředí. Prvně vyrobeným plynovým laserem byl atomární He – Ne laser. V současné době je jedním z nejrozšířenějších plynových laserů CO_2 laser. [6]

Vybrané typy plynových laserů:**He – Ne laser**

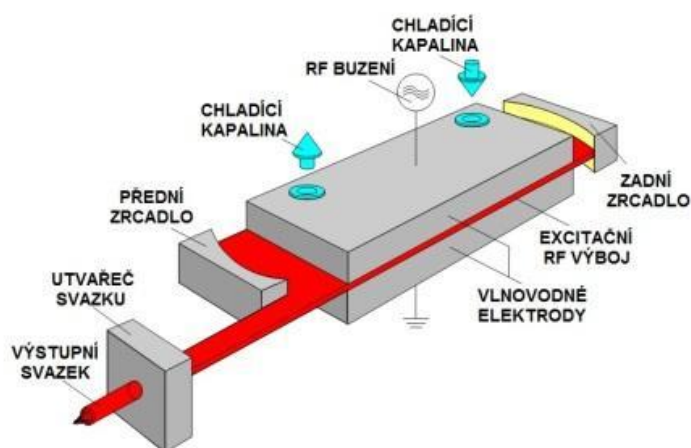
Aktivní prostředí tvoří atomy Neonu vybuzené elektrickým výbojem. Laser vyzařuje záření o vlnové délce 1,15; 3,39 a 0,633 μm . Používá se ve spektrografii, geodézii a holografii. [6]

 CO_2 laser

Aktivní prostředí tvoří molekuly Oxidu uhličitého (CO_2), Dusíku, Vodíku a Helia, buzené elektrickým výbojem (DC – stejnosměrný proud o vysokém napětí, elektrody jsou umístěny uvnitř rezonátoru), nebo radiofrekvenčně (RF – střídavý proud o vysoké frekvenci, elektrody jsou umístěny vně rezonátoru). Dělí se na lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a průtočné (vysoké výkony). Generované záření má vlnovou délku 10,6 μm .

Obr. 3.2 Buzení CO₂ laseru [12].

Laser je plněn plyny CO₂, N₂ a He v poměru 1:2:5. Primárně jsou vybudeny molekuly dusíku el. výbojem na vyšší energetickou hladinu. Svou energií vybudí molekuly oxidu uhličitého na čerpací hladinu a dochází tak ke vzniku laserového záření. Zbytková energie se změní v teplo, které je odváděno chlazeným héliem (obr. 3.2).

Obr. 3.3 CO₂ laser [11].

Největší nevýhodou CO₂ laserů (obr. 3.3) je, že záření vlnové délky 10,6 μm nelze na rozdíl od délek kolem 1 μm přenášet za pomoci optických vláken. Je přenášeno pomocí zrcadel, z čehož plyne větší náročnost optické cesty a vyšší náklady na její údržbu.

Jedná se o jeden z nejúčinnějších a nejpoužívanějších laserů. Používá se pro řezání, svařování, vrtání, gravírování, nanášení povlaků a kalení. [6,9,11,12]

Excimerový laser

Aktivním prostředím jsou excimery. Excimer je nestabilní molekula, která existuje jen po přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení vybuzeného atomu s atomem v základním stavu. Buzení se provádí elektrickým výbojem, nebo svazkem rychlých elektronů. Používají se v selektivní laserové fotochemii, pro vrtání, gravírování, v medicíně a biologickém výzkumu. [6,9,11,12]

3.3 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou kromě několika výjimek opticky buzené roztoky organických barviv. Jejich široké fluorescenční spektrum umožňuje spojitě přeladovat generovanou vlnovou délku záření. Za pomoci několika druhů barviv a s využitím nelineární optiky lze prakticky pokrýt pásmo vlnových délek od (0,3 – 1,5) μm.

Typickým představitelem těchto laserů je rhodaminový laser. Velkou nevýhodou těchto laserů je toxicita a nepřilíš dlouhá životnost aktivního prostředí. To se účinkem tepla a světla rozkládá. Také díky tomu dochází k jejich nahrazování přeladitelnými pevnolátkovými lasery. [6,9,12]

3.4 Polovodičové lasery

Můžeme se setkat také s označením laserová dioda. Světelná emise vzniká v tenké povrchové vrstvě na přechodu mezi polovodiči P a N. Atomy jsou schopny absorbovat energii z elektrického proudu procházejícího diodou a přejít tak do vyšších energetických hladin. Při sestupu na původní hladinu energii vyzáří v podobě světla a tepla. Použitelnost se odvíjí od kvality diody, materiálu polovodičů a přesné tloušťky přechodové vrstvy (musí být velmi tenká, aby bylo dosaženo monochromatického záření). Paprsek lze modulovat změnou budícího elektrického proudu.

Lasery se vyznačují velkou účinností a pracují jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. Dosahují vysokých výkonů při kompaktních rozměrech. Hlavní uplatnění mají v telekomunikacích a výpočetní technice, ovšem v současné době se také často používají k čerpání pevnolátkových laserů. [6,12]

Vybrané typy polovodičových laserů:

Polovodičový laser buzený svazkem elektronů

Aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičů. Tímto blokem procházejí rychlé elektrony a iniciují přechod z valenčního do vodivostního pásu. Do této skupiny

patří např. GaAs, CdS a CdSe polovodičový laser. Generované záření má vlnovou délku (0,808 – 0,940) μm a výstupní výkon je 30 W – 8 kW. [6]

Injekční polovodičové lasery

Aktivní prostředí je složeno z polovodičů typu P a N tvořících P – N přechod. Buzení je uskutečněno elektrickým polem působícím na tento přechod. Rezonátor tvoří vybroušené strany polovodičového materiálu. [6,12]

3.5 Přehled nepoužívanějších typů laserů

Tab. 3.1 Přehled nepoužívanějších typů laserů [12].

Typ laseru	Laserově aktivní materiál	Vlnová délka [μm]	Aplikace/oblasti použití
Plynový laser	Dusík (N_2)	0,3371	Optický čerpací zdroj pro kapalino- vé lasery.
	Excimer ArF KrF XeCl XeF	0,1931 0,2484 0,308 0,351	Optický čerpací zdroj pro kapalino- vé lasery. Obrábění plastu, skla a keramiky. Spektroskopie. Medicína. Měřicí technika.
	He – Ne	0,6328	Měřicí technika. Holografie. Přesné seřizování.
	Argon (Ar^+)	0,3511 – 0,5287	Optický čerpací zdroj pro kapalino- vé lasery. Měřicí technika. Holografie. Spektroskopie. Medicína.
	Krypton (Kr^+)	0,324 – 0,858	Optický čerpací zdroj pro kapalino- vé lasery. Spektroskopie. Medicína. Fotolitografie.
	Oxid uhličitý (CO_2)	10,6	Obrábění materiálů. Spektroskopie. Medicína.
Pevnolátkový laser	Rubín ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)	0,694	Medicína. Letecké laserové skenování. Obrábění materiálů. (První technicky realizovaný laser)
	Nd:sklo	1,062	Obrábění materiálů. Plazmový výzkum. Fotochemie.

	Nd:YAG	1,063 1,064	Obrábění materiálů. Medicína.
	Alexandrit	0,755	Medicína.
Diodový laser	GaAlAs/GaAs	0,635 – 0,910	Optický čerpací zdroj pro Nd:YAG lasery. Optická sdělovací technika. Audiotechnika. Laserové tiskárny. Měřicí technika. Medicína. Obrábění materiálů.
	InGaAsP/InP	1,3	
	InGaAlAs	1,5	
Kapalinový laser	Organická barviva v silně zředěném roztoku	0,31 – 1,28	

4 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE LASERŮ

Laser má v průmyslu, díky svým vlastnostem, široké uplatnění. Zejména při procesech dělení, svařování, tepelných úpravách a značení materiálů. Tyto aplikace budou dále přiblíženy v této kapitole.

Tab. 4.1 vybrané průmyslové aplikace laserů.

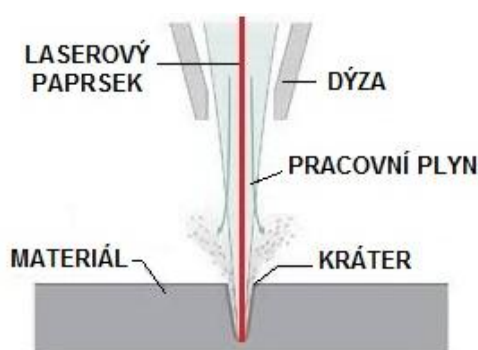
VYBRANÉ PRŮMYSLOVÉ APLIKACE LASERŮ	
VRTÁNÍ	ŘEZÁNÍ
SVAŘOVÁNÍ	POPISOVÁNÍ
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	DEKORACE SKLA
GRAVÍROVÁNÍ	POVLAKOVÁNÍ
SOUSTRUŽENÍ	FRÉZOVÁNÍ

4.1 Vrtání laserem

Je založeno na odstraňování materiálu odpařováním. Teplo pro tento děj je dodáno fokusovaným laserovým paprskem o vysokém výkonu (obr. 4.1). Po dopadu tohoto paprsku na povrch materiálu vzniká kráter, který se dále prohlubuje.

Intenzita záření optického svazku pro vrtání je vyšší, než u jiných aplikací. Používá se tedy pulzních laserů, nejčastěji Nd:YAG laserů.

Výhodou je možnost vytváření přesných, malých děr o průměru 0,1 mm a to i v místech kde by to bylo jinou metodou zcela nemožné. Takto lze díry vrtat také do nekovových materiálů. [9,12,17]



Obr. 4.1 Schéma vrtání materiálu laserem [12].

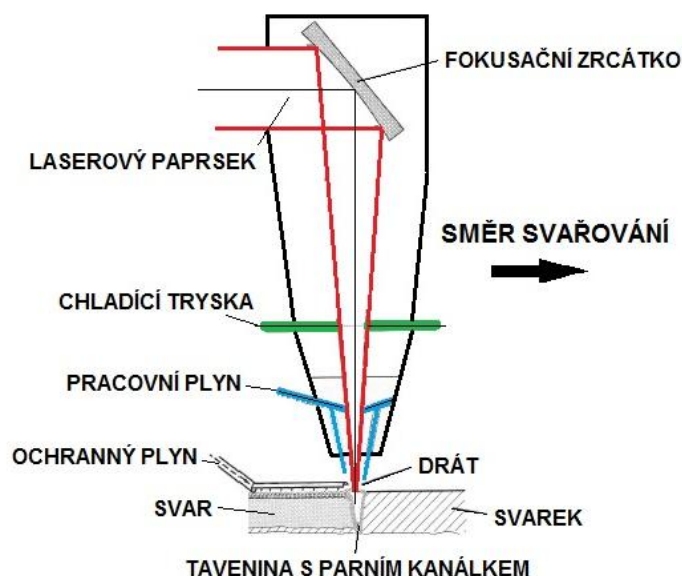
Existují tři druhy vrtání laserem:

- jednotlivými impulzy nebo nárazové,
- trepanační,
- spirálové.

4.2 Svařování laserem

Zamířením fokusovaného paprsku na styk dvou ploch může dojít k jejich svaření. Charakter svarů vytvořených laserem je podobný charakteru svarů vytvořených elektronovým paprskem, s tím rozdílem, že u laseru není potřeba pro svařování vakua. V porovnání s laserovým vrtáním a řezáním vyžaduje svařování menší intenzitu svazku, avšak delší dobu trvání impulsu.

Takto vytvořený svar vyniká svou kvalitou a pevností. Může být buď široký a plochý, nebo úzký a hluboký v závislosti na zvolené technologii svařování. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) je u laserového svařování velmi malá.



Obr. 4.2 Schéma svařování materiálu laserem [12].

Laserem lze kromě běžně používaných materiálů (konstrukční ocel, korozi-vzdorná ocel, neželezné kovy) svařovat materiály zcela nespo-rodé (kov s plastem, kov s keramikou) a to i v místech, která nejsou přístupná pro běžnou technologii. Součásti se mohou značně lišit svými tloušťkami a rozměry, lze např. navařovat velmi tenké fólie na podklad o velké tloušťce, nebo tenké drátky k tlustostěnným obrobkům. Svařují se tímto způsobem např. také pouzdra kardiostimulátorů.

Ke svařování (obr. 4.2) se nejvíce používají CO_2 a Nd:YAG lasery. Další používa-nou skupinou jsou diodové lasery pro svařování plastů. V posledních letech však dochází k postupnému prosazování laserů vláknových (aktivní prostředí se nachází přímo ve vodícím vlákně). [9,12,17]

4.3 Laserové povlakování

Moderní postupy pro povrchovou ochranu materiálů, využívají laserového naná-šení materiálu s cílem zvýšení odolnosti proti korozi a opotřebení. Je možné nanášet různé práškové přídavné materiály (kovy, plasty, keramika) na potřebnou plochu. Plocha může být tvarově velmi složitá.

Při nanášení dochází k natavení povlaku a rovněž povrchu základního materiálu. Vznikne metalurgická vazba mezi povlakem a základním materiálem, díky které dojde k dokonalému přilnutí povlaku. Takto vytvořený povlak může dosahovat tloušťky až 1 mm. Pro povlakování (obr. 4.3) jsou používány CO₂ lasery s výkonem 5 kW a rychlost nanášení se pohybuje kolem (20 – 100) cm²·min⁻¹. Tímto způsobem je nanášena např. vrstva titanu na dřívky necementovaných kloubních náhrad (dochází ke srůstu kosti se dřívkem). [9,12,17]



Obr. 4.3 Laserové povlakování [13].

4.4 Laserové popisování

Princip je založen na místním odpaření materiálu nebo na změně barvy jeho povrchu. Laser vytváří na povrchu materiálu vysoce přesný, mechanicky odolný, kontrastní a jiným způsobem nevytvořitelný popis (obr. 4.4).

Vše probíhá v řízené operaci bez použití chemických přísad, barev, nebo mechanických zásahů do struktury popisovaného materiálu. Výška znaků se obvykle pohybuje v rozmezí od zlomků milimetru po jednotky milimetrů. Hloubka odpařené vrstvy je v řádech mikrometrů. V současné době se také vyrábí materiály se speciální vrstvou určenou přímo pro laserový popis.

Je možné označovat kalené i nekalené oceli a litiny, titan, mosaz, bronz, hliník a jeho slitiny, slinuté karbidy, zlato, keramiku, drahé kameny, plasty, dřevo, sklo, pryž, kůži, papír, atd. Popisovaný povrch může být různě upravený, rovinný, nebo různě tvarově složitý a lze popisovat i na nepřístupných místech. [9,12,17]

Existují dvě základní metody popisování:

- popis přes masku,
- popis vychylováním paprsku.

Popis přes masku

Celý text popisu je vyříznut v masce, ta je vyráběna z mosazi, bronzu, nebo ušlechtilé oceli. Laserový parsek osvítí po řádcích, nebo najednou masku, čímž je vyříznutý text přenesen na výrobek.

Používají se k tomuto účelu CO₂, Nd:YAG a excimerové lasery. Výhodou této metody je jednoduchý popisovací systém a vysoká rychlost popisování (může být až 3 000 znaků za minutu). Metoda je vhodná především pro velké série výrobků. [17]

Popis vychylováním paprsku

Paprsek vycházející z laseru je vychylován dvěma navzájem kolmými zrcadly, jejichž pohyb je řízen počítačem. Používají se CO₂ lasery o výkonu (8 – 20) W, nebo Nd:YAG lasery o výkonu (50 – 100) W. Velikost popisovaného pole je u CO₂ laserů 60 x 60 mm s rychlostí popisu 1 mm·s⁻¹. U laserů Nd:YAG má popisované pole velikost až 260 x 260 mm a rychlost popisu je až 4 m·s⁻¹.

Pro přenos laserového paprsku lze u této metody využít vláknovou optiku, díky čemuž je umožněno popisování i na málo přístupných místech. Je dosahováno vysoké kvality popisu a změna jeho zadání je velmi operativní (stačí pouze změnit program, místo výroby nové masky). [9,17]



Obr. 4.4 Laserové popisování [14].

4.5 Laserová dekorace skla

Jedná se o modifikaci řezání laserem, kdy v místě dopadu paprsku na povrch skla dochází k částečnému odpaření skloviny a k jejímu povrchovému popraskání. Na takto vzniklých trhlinách dochází k rozptylu světla, čímž je docíleno zářivého vzhledu. Využívá se CO₂ a Nd:YAG laserů. V současné době se provádí vytváření efektních 3D objektů ve skle za pomoci pulzního Nd:YAG laseru o výkonu pulzu až 1 MW (obr. 4.5). [9,17]



Obr. 4.5 Laserová 3D dekorace skla [15].

4.6 Gravírování laserem

Změnou parametrů laserů lze místo popisování v hloubce několika mikrometrů laserově gravírovat ve větší hloubce. Laserovým gravírováním se vytvářejí jednoduché i velmi složité reliéfy do různých druhů materiálů.

Podstatou je odpařování materiálu v místě působení paprsku. Pro kovové materiály a keramiku se používají Nd:YAG lasery. Pro dřevo a pryž CO₂ lasery. [9,12,17]

4.7 Tepelné zpracování laserem

Tepelné zpracování materiálu laserem se vyznačuje velmi krátkou dobou ohřevu spolu s malým objemem ohřátého materiálu.

Metody tepelného zpracování jsou založeny na následujících principech:

- **ohřev materiálu** – žhání, kalení a popouštění,
- **tavení povrchového materiálu součástí** – tepelné zpevnění s natavením a amorfizace povrchu,
- **odpařování materiálu** – rázové zpevnění založené na principu vypařování materiálu.

Nejvíce používanou laserovou aplikací tepelného zpracování materiálu je kalení.

[9,17]

Kalení laserem

Dochází k zakalení jen tenké povrchové vrstvy bez prohřátí a změn v jádře materiálu, které tak neztratí svou houževnatost. Pro laserové kalení se používají kontinuální CO₂ lasery o výkonu v řádu kilowattů.

Svazek se pohybuje po povrchu materiálu rychlostí desítek milimetrů za sekundu a materiál za místem ozáření velmi rychle chladne (několik milisekund). Takto je vytvořena dokonale zakalená vrstva o tloušťce několik desítek μm pod povrch, která má jemnozrnnou martenzitickou strukturu.

Zajímavou vlastností takto vytvořené vrstvy je její zvýšená korozivzdornost. Pro kalení menších ploch se používá impulzních laserů. Jediným impulzem je potom možno kalit ostří nástrojů z rychlořezné oceli. Takto kalené nástroje se vyznačují v některých případech až o 40% vyšší životností, než nástroje kalené běžnými technologiemi. Díly tryskových motorů mají, po ošetření laserovým paprskem, až 5x delší životnost.

Kalení laserem (obr. 4.6) je používáno u extrémně namáhaných součástí (klikové a vačkové hřídele, boky ozubených kol, stěny válců spalovacích motorů). Přínosná je také zanedbatelná deformace materiálu ohřevem, čímž dochází k odstranění nutnosti jeho dalšího opracování. [9,12,17]



Obr. 4.6 Kalení trnu laserem [16].

4.8 Soustružení laserem

K soustružení obrobků laserem se využívá tří metod:

a) Obrábění s předehřevem

Princip spočívá v nasměrování laserového paprsku na plochu obrobku těsně před břit rezného nástroje, čímž dojde díky ohřevu ke snížení pevnosti a tvrdosti obráběné plochy. [17]

b) Odtavování materiálu z povrchu obrobku

Je založeno na intenzivním přívodu tepla na obráběný povrch, ten se otáčí proti směru paprsku laseru. Paprsek materiál odtavuje a za pomoci asistenčního plynu je materiál odváděn mimo obrobek. [17]

c) Odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky

Jedná se o dva nezávislé laserové paprsky, které jsou nakloněny pod určitým úhlem (obr. 4.7). [17]

Používají se Nd:YAG a CO₂ lasery o výkonu 0,1 až 2,5 kW.



Obr. 4.7 Ořezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky [17].

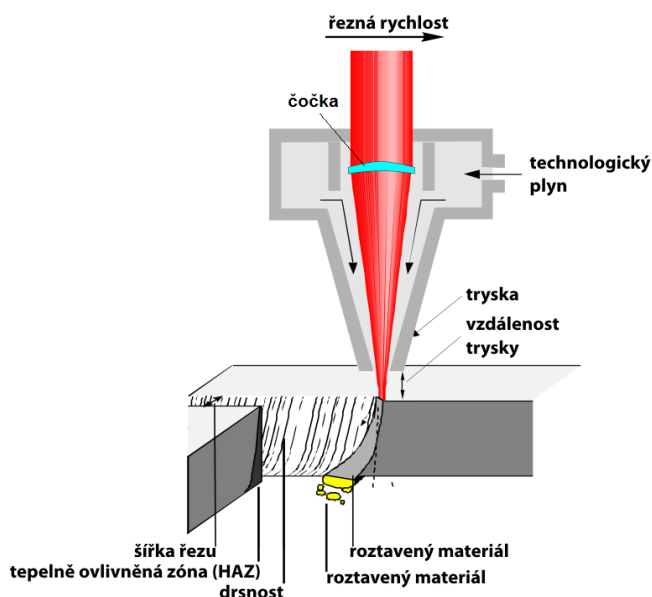
5 ŘEZÁNÍ LASEREM

K řezání byly lasery poprvé použity v 70. letech 20. století. Konkrétně se tehdy jednalo o CO₂ lasery o výkonu (200 – 500) W. Velkého průlomu v prosazování laserů při řezání bylo dosaženo až se zdokonalením řídicího systému paprsku.

V současné době se používají pro řezání lasery o výkonu (2 – 8) kW, pro svařování až 20 kW. Nejvýkonnější řezací laser v České republice má výkon 6 kW. Největšími světovými výrobci laserové a jiné techniky jsou firmy Trumpf (Německo) a Amada (Japonsko).

Popis principu řezání laserem

Při dopadu laserového paprsku na obrobek se materiál v příslušném bodě zahřeje tak silně, že se roztaví nebo úplně vypaří. Jakmile paprsek pronikne obrobkem zcela, nastává proces řezání. Paprsek se pohybuje podél kontury řezaného dílu a průběžně natavuje jeho materiál, ten je pak u většiny metod řezání (obr 5.1) vyfukován proudem plynu pryč z místa řezu. Proud řezného plynu vychází z trysky spolu s laserovým paprskem. Mezi řezaným dílem a zbylým materiálem vzniká úzká řezná spára. Nelze řezat více materiálů zároveň položených na sebe (týká se plechů), neboť by došlo k jejich svaření. [12]



Obr. 5.1 Schéma řezání materiálu laserem [19].

Zapichování

Paprsek musí nejprve materiálem na některém místě bodově proniknout, než je možné začít s řezáním kontury. Tomuto bodovému průniku se říká zápich. Zapichování lze provádět rychle s plným laserovým výkonem, nebo pomalu přes výkonovou rampu.

Při vytváření zápichu v rampovém provozu se výkon laseru pozvolna zvyšuje, poté se ustálí na konstantní hodnotě až do chvíle dokončení zápichu a následně dochází k jeho pomalému snižování. Při zapichování lze použít řezného plynu, výběr závisí na požadované kvalitě a řezaném materiálu. Zpravidla se používají plyny O₂, N₂, Ar a vzduch. [12]

5.1 Typy laserů používané pro laserové řezání

Pro laserové řezání materiálu jsou v současné době nejpoužívanější dva následující typy laserů:

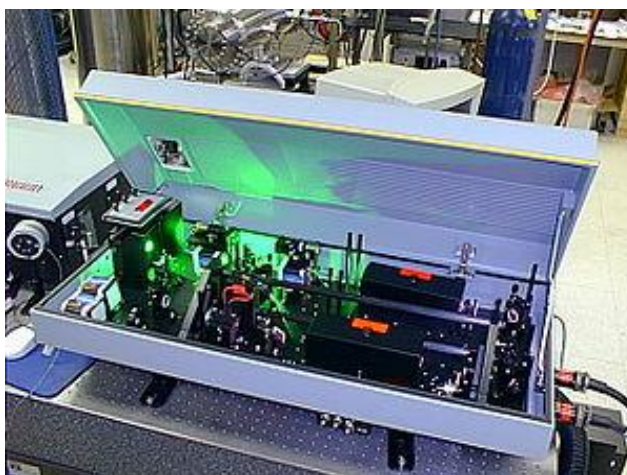
- pevnolátkový – Nd:YAG laser,
- plynový – CO₂ laser.

Nd:YAG laser

Jedná se o běžně používané typy laserů s pracovní vlnovou délkou 1,06 μm . Pracují stejně jako CO₂ v kontinuálním i pulzním režimu. Používají se pro řezání, svařování, vrtání a popisování materiálu. Charakteristickými znaky Nd:YAG laserů jsou:

- vysoká kvalita paprsku,
- volitelný provozní režim,
- možnost přizpůsobení výše a průběhu výkonů,
- rovnoměrné rozdělení paprsku a vysoká stálost módu,
- procesní bezpečnost (stálost výkonu).
- možnost vedení laserového paprsku pomocí optických vláken.

Nd:YAG lasery buzené výbojkami se vyznačují malou účinností, což úzce souvisí s dosahovanými výkony a rozměry konstrukce. Velkého zlepšení v této oblasti bylo dosaženo po postupné náhradě výbojek laserovými diodami. Díky tomuto pokroku již dnes existují výkonné Nd:YAG lasery kompaktních konstrukcí (obr. 5.2). [6,12]

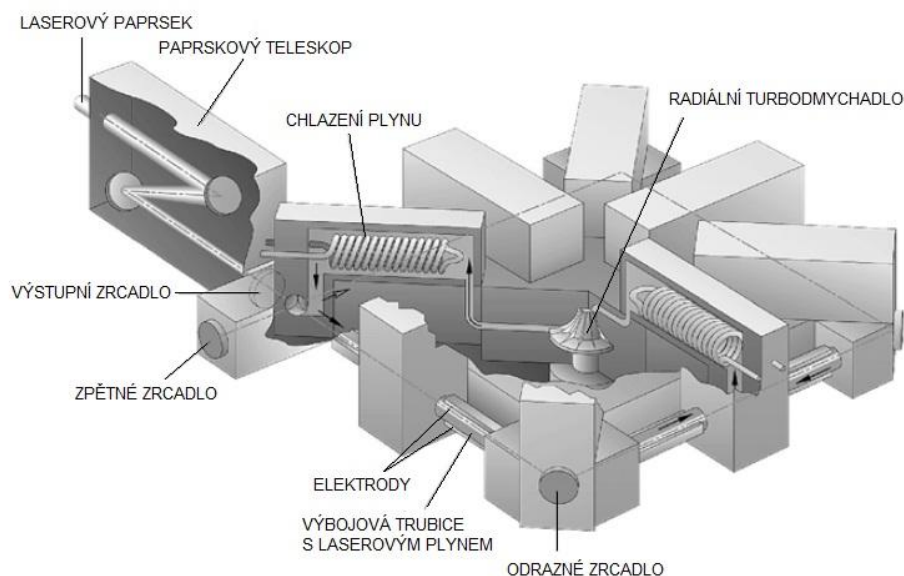


Obr. 5.2 Nd:YAG laser [20].

CO₂ laser

CO₂ lasery se osvědčily jako spolehlivé zdroje laserového paprsku a staly se tak jedněmi z nejpoužívanějších laserů. Většina se používá k řezání a svařování materiálu. Pracovní vlnová délka těchto laserů je 10,6 μm , což se nachází v infračervené oblasti záření. Charakteristickými znaky CO₂ laserů jsou:

- velký rozsah výkonu (10 W – 20 kW),
- vysoká kvalita paprsku,
- volitelný provozní režim,
- procesní bezpečnost (stálost výkonu),
- možnost přizpůsobení výše a průběhu výkonů,
- rovnoměrné rozdělení paprsku a vysoká stálost módu,
- nižší spotřeba energie díky vyšší účinnosti (cca 30%),
- kompaktní konstrukce (obr. 5.3). [6,12]



Obr. 5.3 Konstrukce CO₂ laseru [12].

5.2 Rozdělení intenzity v průřezu paprsku

Laserový paprsek má v průřezu i podélném řezu vzhledem ke své ose charakteristické rozdělení intenzity (hustota energie na cm^2), které se označuje jako mód (TEM – transversální elektromagnetický mód). [12]

Základní mód TEM₀₀

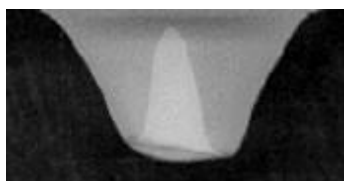
Jinak se také nazývá Gaussův mód (obr. 5.4), neboť rozložení intenzity zhruba odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení. Intenzita paprsku je tedy nejvyšší v ose paprsku a směrem od ní rovnoměrně klesá. Laserový paprsek s tímto módem má nejmenší divergenci. Používá se např. u CO₂ laserů o výkonu (700 – 3 500) W, určených pro řezání materiálu. [12,18]



Obr. 5.4 TEM_{00} , nástřel do kvádru plexiskla [12].

Kruhový mód TEM_{01}

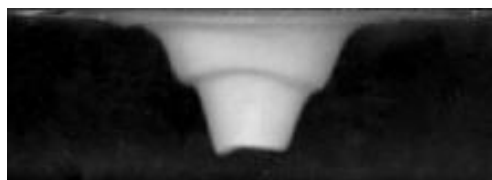
Na ose paprsku je intenzita nulová, směrem od ní rovnoměrně narůstá do maxima a pak opět klesá (obr. 5.5). V praxi se ukázalo, že rozdělení intenzity odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení šířenému ve svém maximu. K šíření tedy dochází překrýváním módů TEM_{00} a TEM_{01} . Používá se pro řezání a vrtání u laserů o výkonu (3 000 – 7 000) W. [12]



Obr. 5.5 TEM_{01} , nástřel do kvádru plexiskla [12].

Multimód

Je mód vyššího řádu (TEM_{02-04}), který je vytvořen překrytím více forem módů (obr. 5.6). Vyskytuje se u laserů o výkonu (8 000 – 20 000) W. CO_2 lasery se s tímto módem používají zejména pro svařování a úpravu povrchů. [12]



Obr. 5.6 Multimód, nástřel do kvádru plexiskla [12].

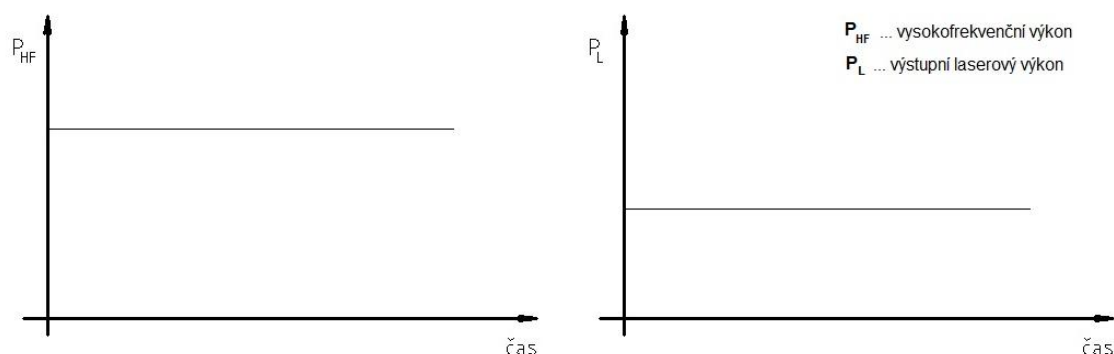
5.3 Provozní režimy

Existují tři druhy používaných provozních režimů:

- spojitý (CW),
- impulzní,
- rampový.

Spojitý provoz

Ve spojitém provozu dochází k nepřetržité tvorbě laserového paprsku za konstantního přívodu energie. Vycházející paprsek má konstantní výkon (obr. 5.7). [12]

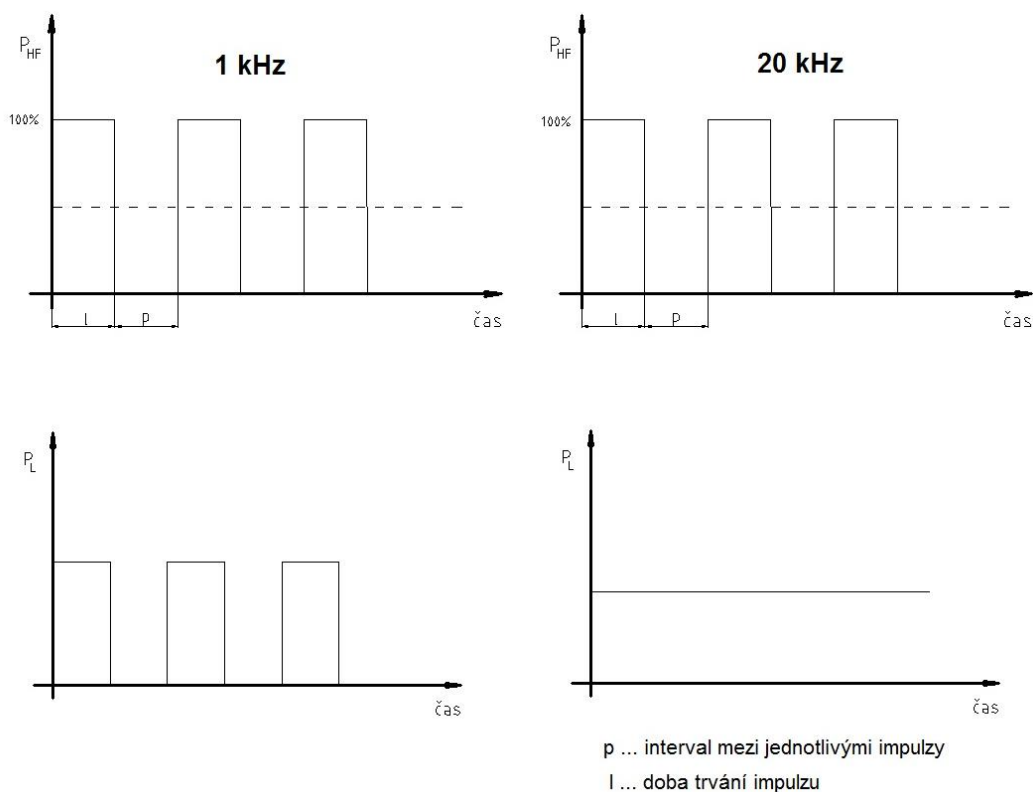


Obr. 5.7 Spojitý provoz laseru [12].

Impulzní provoz

V impulzním provozu dochází k intervalům při buzení aktivního média, což vytváří impulzy laserového paprsku. Výkon laseru tedy cykluje od minima do maxima a zpět. Střední výstupní výkon laseru je regulován poměrem mezi dobou trvání impulsu a dobou prodlevy.

Laserový plyn (plynové lasery) má schopnost uchování energie po určitý časový interval. Pokud tedy budicí frekvence dosahuje vysokých hodnot (20 kHz), dochází k překlenutí prodlev zbytkovou energií plynu a laser dodává konstantní výkon. Při nízké hodnotě budicí frekvence (1 kHz) zbytková energie plynu tyto prodlevy nepokryje a laser dodává výkon ve formě impulzů (obr. 5.8).

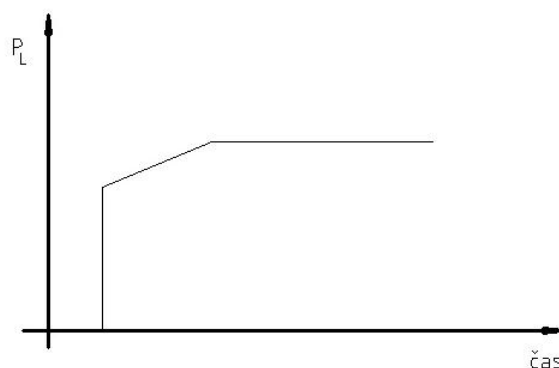


Obr. 5.8 Impulzní provoz laseru [12].

Tímto způsobem se řídí výstupní laserové výkony, aby byly optimální pro danou aplikaci. Například řezání čipů, malých kontur, ostrých rohů, malých můstků, jejichž šířka je menší než tloušťka plechu, apod. [12]

Rampový provoz

Při tomto druhu provozu se laserový výkon plynule zvyšuje v závislosti na naprogramovaném časovém intervalu (obr. 5.9). Tento provoz se používá především pro zapichování. [12]



Obr. 5.9 Rampový provoz laseru [12].

5.4 Metody řezání

V současné době existují tři nepoužívanější metody laserového řezání materiálu. Jedná se o následující:

- tavné řezání,
- oxidační řezání,
- sublimační řezání.

Tavné řezání

Řezaný materiál se lokálně nataví a vzniklá tavenina se od základního materiálu odděluje proudem plynu (N_2 , Ar, okrajově vzduch), ten je pod tlakem přiváděn do místa řezu, ale na vlastním řezání se nepodílí. Ve srovnání s oxidačním řezáním lze docílit nižších rezných rychlostí. Maximální rezná rychlost stoupá lineárně s výkonem laseru a zároveň se zhruba lineárně snižuje s tloušťkou řezaného materiálu.

Tato metoda řezání je vhodná především k vytváření řezů kovových materiálů, které nejsou znečištěny oxidy. Výsledkem řezání je kovově lesklá rezná plocha. Používá se pro řezání korozivzdorných ocelí, hliníku, mosazi, mědi a pozinkovaný plechů. [6,12,18]

Oxidační řezání

Tato metoda se od předchozí liší pouze v plynu, který slouží pro oddělení materiálu, zde je použit kyslík. Vzájemným účinkem kyslíku s roztaveným povrchem vzniká exotermická reakce, která má za následek další ohřívání materiálu. Mimo toto teplo je do materiálu vnášeno další teplo od laserového paprsku, díky čemuž je

ve výsledku možno dosahovat velmi vysokých rychlostí řezu. Řezná spára je však širší a kvalita řezu horší než u předchozí metody, zároveň na povrchu řezné plochy vzniká oxidická vrstva, kterou je poté ve většině případů potřeba odstranit.

Metoda není vhodná pro zhotovování ostrých tvarů, malých otvorů, tvarově složitých kontur. V těchto případech je žádoucí využít pulzní provoz laseru, kdy dochází k ochlazení materiálu mezi jednotlivými pulzy a nenastává exotermická reakce. Dalšího zlepšení kvality řezu lze dosáhnout přesnou regulací výkonu laseru dle tloušťky daného materiálu, řezná rychlost je však v tomto případě omezena nastaveným výkonem laseru. [6,12,18]

Sublimační řezání

Jedná se o metodu, u které dochází k odpařování materiálu z místa řezu. V dnešní době jde o málo používanou metodu. Pro minimalizaci TCO je nutná velká hustota energie v laserovém paprsku. Zároveň musí být důkladně kontrolována tloušťka řezaného materiálu, ta nesmí přesáhnout průměr laserového paprsku. Jinak by došlo ke kondenzaci par řezaného materiálu a následného znovusvaření řezu. Toto omezení platí u materiálů, u nichž vzniká tekutá fáze. U materiálů které se netaví (dřevo, keramika), faktor řezané tloušťky neplatí. Metoda vyžaduje pečlivé nastavení optiky. [6,12]

5.5 Stroje pro laserový řez

Existují různé druhy strojů pro laserové řezání, ty umožňují řezy plechů, 3D obrobků, trubek, profilů atd.

Některé z těchto strojů mohou pracovat v režimu remote cutting, kdy se tryska nachází ve větší výšce nad obrobkem (0,5 – 0,75) m a dochází tak k vyřezávání celých naprogramovaných ploch.

Výkon v současnosti používaných řezacích laserů se pohybuje mezi (2 – 8) kW. Drtivá většina nově vyráběných složitějších strojů (od 2D výš) má standardně zabudovanou adaptivní optiku. Ta slouží ke kompenzaci polohy ohniska v závislosti na vzdálenosti řezací hlavy od zdroje paprsku (k tomu účelu slouží čočky ohýbané tlakem vody). Řezací lasery jsou rovněž vybaveny kapacitními čidly k udržování konstantní řezné vzdálenosti. [12]

1D laserové stroje

Dají se použít pouze pro rovné řezy podél jedné osy. Používají se pro řezání materiálu na délku (trubky, profily, pásy). [12]

2D laserové stroje

Konstrukce stroje umožňuje pohyb v osách X, Y a částečně Z. V současnosti se u těchto strojů většinou používá létající optika (pohybuje se řezací hlava, stůl s obrobkem se nepohybuje). Používají se pro rovinné řezání plechů (obr. 5.10). [12]



Obr. 5.10 2D řezání laserem [21].

3D laserové stroje

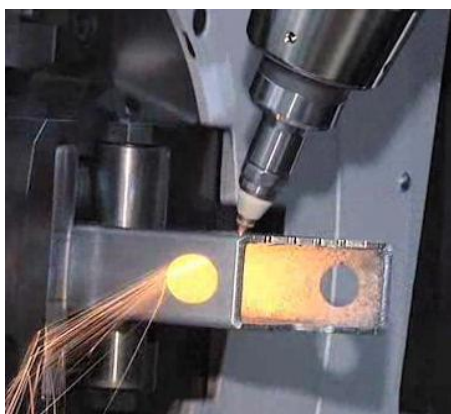
Konstrukce umožňuje pohyb v 5 osách (X, Y, Z a zároveň rotaci a naklápění). U některých strojů se v osách X a Y pohybuje stůl s obrobkem. Používají se pro řezání kontur do 3D obrobků (obr. 5.11). [12]



Obr. 5.11 3D řezání laserem [22].

Řezačky trubek

Pohyb je umožněn ve 2–5 osách, dochází k pohybu obrobku. Používají se pro vyřezávání kontur do trubek a profilů (obr. 5.12). [12]



Obr. 5.12 Řezání trubek [23].

Řezací roboty

Roboty (obr. 5.13) jsou v současné době alternativou ke 2D a 3D strojům. Kombinace robotů s CO₂ lasery byla dlouhou dobu nemožná, neboť není možné použít pro přenos paprsku optických vláken jako je tomu u Nd:YAG laserů. Tento problém nyní řeší difúzně chlazené lasery, které jsou rozměrově kompaktní a lehké. Umisťují se přímo na rameno robotu a paprsek je veden soustavou zrcátek až k řezací hlavě. Nevýhodou robotů je jejich menší přesnost. [12]



Obr. 5.13 Řezací robot [24].

5.6 Plyny používané pro řezání laserem

Pro řezání laserem se v současnosti používá čtyř řezných plynů, kterými jsou kyslík, dusík, argon a vzduch.

Kyslík (O₂)

Řezání kyslíkem probíhá se standardním tlakem (≤ 6 bar), nebo zvýšeným tlakem (> 6 bar).

U řezání standardním tlakem, musí být dynamický tlak na místě připojení ke stroji minimálně 8 bar (při spotřebě plynu 10 m³/h, trysce Ø 1,7 mm a tlaku řezného plynu 6 bar).

Při vysokotlakém řezání musí být dynamický tlak v místě připojení stroje 15 bar (při spotřebě plynu 20 m³/h, trysce Ø 1,7 mm a tlaku řezného plynu 12 bar). Používá se pro řezání konstrukčních ocelí. [12,25]

Tab. 5.1 čistota řezného plynu [25].

Řezný plyn	Čistota	
Kyslík (O ₂)	3.5	99,95 obj. %

Dusík (N₂)

Hlavními nečistotami dusíku jsou kyslík a vzdušná vlhkost. Při vysokotlakém řezání musí být dynamický tlak v místě připojení stroje 27 bar (při spotřebě plynu 90 m³/h, trysce Ø 2,7 a tlaku řezného plynu 20 bar).

Tab. 5.2 čistota řezného plynu [25].

Řezný plyn	Čistota	
Dusík (N ₂)	5.0 (4.6)	99,999 (99,996) obj. %

Při použití dusíku nižší čistoty může dojít při vysokotlakém řezání k zabarvení hran řezu vlivem znečištění plynu kyslíkem od 100 ppm. Ve výjimečných případech se užívá N₂ s čistotou 4.6 nebo jinou, pokud nejsou překročeny následující hodnoty:

- O₂ ≤ 100 ppm,
- H₂O ≤ 5 ppm,
- C_nH_m ≤ 1 ppm,
- pevné částice do 0,3 μm ≤ 100 ppm.

Používá se pro řezání korozivzdorných ocelí, hliníku a jeho slitin. [12,25]

Argon (Ar)

Bývá díky své vyšší pořizovací ceně používán pro řezání méně než dusík. Jeho hlavními nečistotami jsou opět kyslík a vzdušná vlhkost.

Tab. 5.3 čistota řezného plynu [25].

Řezný plyn	Čistota	
Argon (Ar)	4.8	99,998 obj. %

Používá se převážně pro titanové slitiny. [12,25]

Vzduch

K řezání tenkých plechů lze použít také stlačený vzduch, kdy k vyfukování taveniny z řezné spáry postačí vzduch o tlaku (5 – 6) bar. Jelikož je vzduch složen převážně z dusíku, používá se pro tavné řezání. Maximální tloušťka řezaného materiálu závisí na výstupním tlaku vzduchu a výkonu laseru (s laserem o výkonu 5 kW a tlakem 6 bar lze řezat plech tl. 2 mm). Nejlepších výsledků se dosahuje u hliníku a jeho slitin. Při řezání tenkých plechu s použitím vzduchu lze dosáhnout vyšších rychlostí, než u řezání s použitím kyslíku.

Vzduch se musí stlačovat, vysoušet a zbavovat olejů, díky čemuž nedochází při jeho použití k zásadní úspoře nákladů. [12,25]

5.7 Materiály vhodné pro laserové řezání

V praxi se řezou ploché obrobky, trubky a profily všech možných tvarů a průřezů z různých materiálů. Případně dochází k vyřezávání kontur do 3D obrobků.

Laserem se řezou se především kovové materiály a to zejména následující:

- nástrojové oceli,
- konstrukční oceli,
- korozivzdorné oceli,
- hliník a jeho slitiny.

U nekovových materiálů je použití omezené. Zde se jedná o lepenku, dřevo, kůži, keramiku a plasty (plexisklo, polyetylen, polyamid, polyuretan, atd.). [12]

5.8 Řezání a vyřezávání trubek laserem

Laserem lze řezat trubky různých průřezů.

Tab. 5.4 Standardní průřezy trubek [12].

Kulatá trubka	
Čtvercová trubka	
Obdélníková trubka	
Kulatá oválná trubka	
Plochooválná trubka	

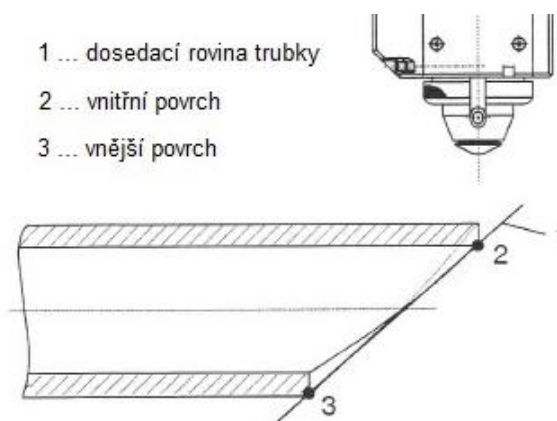
Tab. 5.5 Nestandardní průřezy trubek [12].

Elipsovitá trubka	
Polooválná trubka	
D – trubka	
Trojhranná trubka	
Osmihranná trubka	

Možnosti obrábění trubek na 2D a 3D strojích

Aby bylo možné spojení dílů (desek a nařezaných trubek), musí k sobě tyto díly těsně přiléhat.

Při 2D řezání trubek se laserový paprsek pohybuje kolmo k povrchu trubky, aby nedocházelo ke změně tloušťky materiálu. Řez je veden v horizontální rovině, zatímco trubka se otáčí kolem své osy. Ideální linie řezu se dosahuje pouze při přechodu paprsku z vnějšího na vnitřní povrch a naopak (obr. 5.14). Takto lze vytvořit pouze hranu, která přiléhá jednou vnějším a jednou vnitřním povrchem, to je postačující pro konvenční svařování s přídavným drátem.



Obr. 5.14 2D řezání trubek [12].

Pro vytvoření ideálně přiléhající řezné hrany, která bude přiléhat vnějším i vnitřním povrchem po celém obvodu, musí laserový paprsek svírat s trubicí úhel zářezu (obr. 5.15). Toho lze docílit pouze za použití 3D stroje. Takto uřezanou trubku je možno spojit s přípojným dílem laserovým svařováním.



Obr. 5.15 3D řezání trubek [12].

3D řezání trubek však má svá technologická omezení. Pokud je úhel nastavení paprsku vůči trubce příliš velký, dochází k následujícím problémům:

- **změna tloušťky materiálu,**

Je nutno stále přizpůsobovat parametry řezání, čehož lze docílit dvěma způsoby. Přepínáním mezi několika technologickými tabulkami laseru (parametry jedné tabulky platí pro jednu tloušťku materiálu), nebo volbou takových parametrů řezání, které umožňují pouze nízké rychlosti.

- **odchýlení řezného plynu,**

Řezný plyn se částečně odchyluje od povrchu trubky, tudíž neproudí výhradně do řezné spáry. Při řezání kyslíkem to může způsobit výraznější vypálení řezných hran a tvorbu otřepů. Při řezání dusíkem se rovněž mohou tvořit otřepy, protože dochází k horšímu vyfukování taveniny z řezné spáry.

- **rozdílná řezná vzdálenost,**

Kapacitní regulace vzdálenosti zjišťuje příliš velké kapacity mezi tryskou a povrchem trubky. To vede k chybám ve vzdálenosti a změně polohy ohniska, což opět zhoršuje kvalitu řezných hran.

- **pokles řezné rychlosti.**

Při vytváření šikmých řezů se často extrémně snižuje řezná rychlost. [12]

Řezání kontur

Při řezání zakřivených ploch u trubek (obr. 5.16) se tahy křivek vypisují v NC textu jako polygonové tahy. Ty se skládají z několika rovných dílčích kusů (inkrementů), přičemž velikost inkrementu závisí na zakřivení a zvolené odchylce kontury. Rychlost řezání těchto kontur lze zvýšit, pokud jsou přechody mezi jednotlivými inkrementy co nejvíce tangenciální. Toho se dosáhne zmenšením jednotlivých inkrementů.



Obr. 5.16 Řezání kontur [21].

Malé kontury u trubek lze řezat i 2D, přičemž se trubka kolem osy neotáčí. [12]

Regulace vzdálenosti trysky

Do řezací hlavy moderních strojů je integrovaná jednotka pro regulaci konstantní vzdálenosti trysky od materiálu.

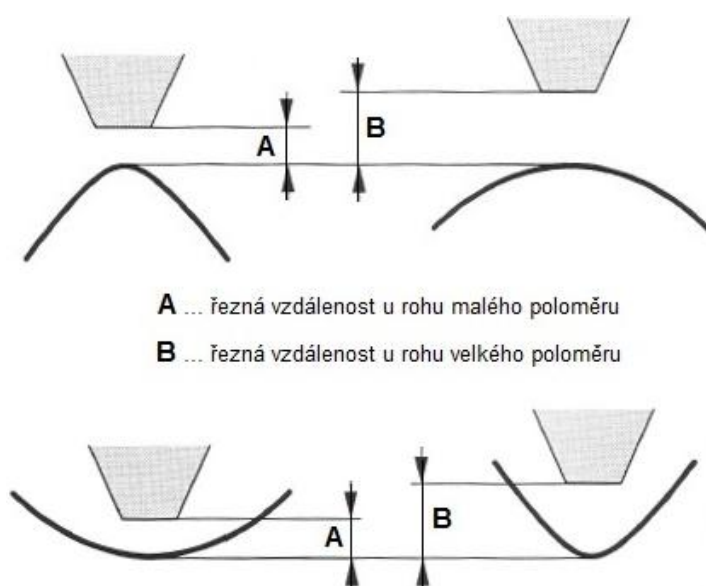
Regulace zjišťuje vzdálenost mezi tryskou a povrchem materiálu kapacitně. Kdy dochází k vyhodnocování aktuální kapacity mezi tryskou a povrchem materiálu v poloměru 20 mm od jejího středu. Se změnou vzdálenosti trysky od povrchu se kapacita mění. Na začátku řezání se nastaví požadovaná řezná vzdálenost, které je přidělena určitá kapacita, tato kapacita je udržována po celou dobu řezání.

Při obrábění kulatých trubek se musí řezná vzdálenost korigovat. To je dáno zkracováním vzdálenosti mezi tryskou a povrchem trubky při zadané kapacitě. [12]

Řezání rohů u vícehranných trubek

V závislosti na velikosti poloměru zaoblení rohů a rozměrech stran trubky se při řezání trubky koriguje řezná vzdálenost a omezuje posuv.

Charakteristika pro regulaci vzdálenosti se u vícehranných trubek zaznamenává uprostřed největší rovinné plochy. Pokud dochází k řezu přímo v oblasti této plochy, shoduje se naprogramovaná hodnota se skutečnou vzdáleností. Při přechodu do oblasti zaoblení se skutečná řezná vzdálenost snižuje (obr. 5.17). K extrémnímu snížení skutečné vzdálenosti dochází, pokud tryska najíždí na poloměr zaoblení rohu pod úhlem 45° . U malých poloměrů pak bez provedení korekce dochází ke kolizi trysky s trubkou.



Obr. 5.17 Řezná vzdálenost u vnějších a vnitřních poloměrů rohů [12].

Po řezání vnitřních poloměrů platí stejné pravidlo, jako pro řezání poloměrů vnějších (obr. 5.17).

Rychlost posuvu u rohů vícehranné trubky závisí na následujících faktorech:

- zrychlení kruhové osy,
Je dáno konstrukcí daného stroje pro řezání trubek.
- poloměr zaoblení rohu,
Čím je poloměr zaoblení menší, tím je menší maximální rychlost posuvu.
- poloměr obvodové kružnice.
Čím je poloměr obvodové kružnice trubky větší, tím je menší maximální rychlost posuvu. [12]

Ovlivňování protilehlé strany řezu

Oproti řezání 2D obrobků, mají trubky vždy proti řezané straně i stranu protilehlou. Což může vést zejména u tenkostěnných trubek malého průměru k následujícím problémům:

- postříkání vnitřních stěn trubky taveninou,
- proříznutí protilehlé strany trubky,
- velký přívod tepla a s tím spojené přehřátí materiálu.

Řešení tohoto problému existují následující:

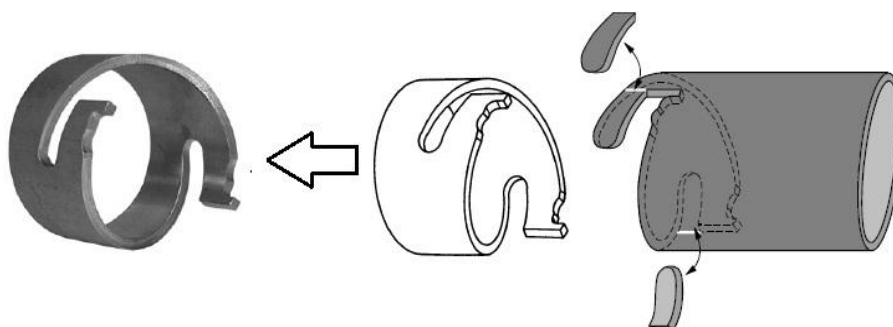
- clona proti rozstříku,
Během řezání se zavede do trubky a slouží k odvodu strusky a absorpci přebytečného laserového záření.
- zapichování s redukováným výkonem,
- řezání s redukováným výkonem. [12]

Odřezávání jednotlivých trubkových dílů

Při řezání trubek vznikají díly tak, že vždy obrobený konec trubky odřeže od zbytku. Při tomto procesu mohou v závislosti na tvaru dílu nastat následující problémy:

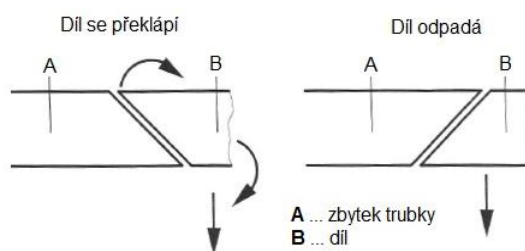
- díl se zachytí ve zbytku trubky, nebo v odpadních kusech,
- díl se naklopí a narazí do trysky řezací hlavy.

K těmto problémům dochází hlavně u dílů, které se od zbytku odřezávají pomocí náročné kontury. Snadno se pak zachytí ve zbytku trubky, či odpadních dílech. Typickým dílem tohoto typu je bajonetový uzávěr (obr. 5.18), zde je nutno naprogramovat oddělovací řezy v odpadním dílu.



Obr. 5.18 Bajonetový uzávěr a jeho oddělování [12].

Pokud je kontura na odřezávaném konci extrémně šikmá, dochází překlápění dílů a jejich narážení do trysky řezací hlavy. Tomu lze zabránit zavedením clony proti rozstříku, nebo naprogramováním konce kontury na kratší straně dílu (obr. 5.19). [12]



Obr. 5.19 Odpadávání dílů podle konce kontury [12].

5.9 Faktory ovlivňující řez laserem

Existuje mnoho faktorů ovlivňujících řezání laserem, zde jsou uvedeny některé hlavní z nich vybrané.

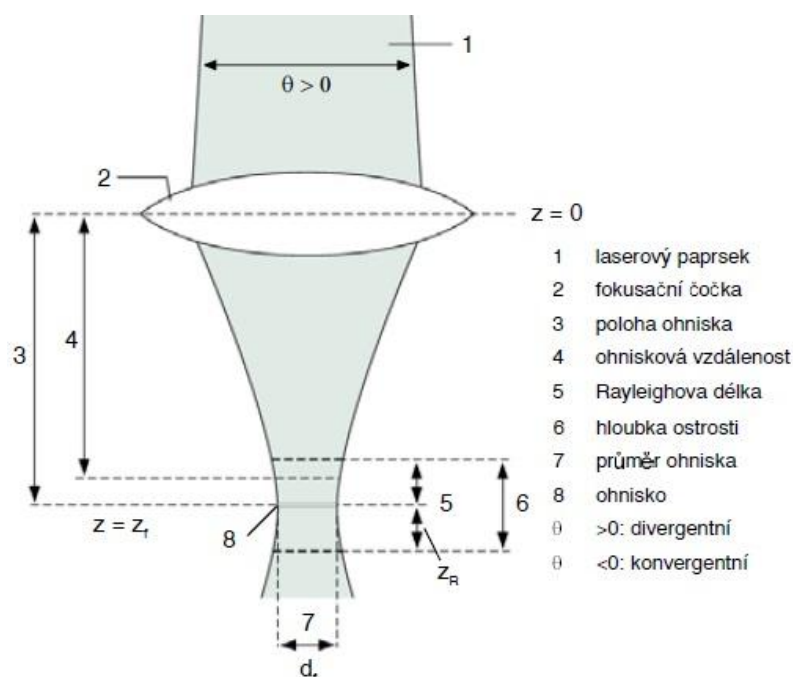
Poloha ohniska a jeho průměr

Ideální ohnisko neexistuje (bod), vždy se vyskytuje ve formě kruhu určitého průměru. Pro řezání laserem se používají čtyři vzdálenosti ohniska od řezaného materiálu v závislosti na jeho tloušťce. K udržování ohniska v určené vzdálenosti slouží adaptivní optika laseru.

V ohnisku dochází (obr. 5.20) k největšímu zvýšení hustoty výkonu laseru, který umožňuje řezání materiálu.

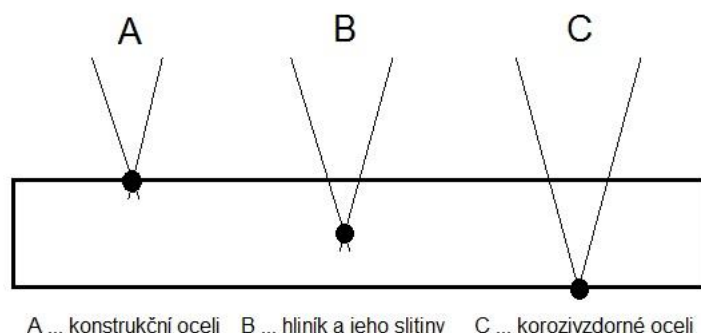
Tab. 5.6 Vzdálenosti ohnisek podle tloušťky řezaného materiálu.

3,75"	max. 2 mm
5,0"	max. 3 mm
7,5"	3 – 20 mm
9,0"	8 – 25 mm



Obr. 5.20 Parametry řezací optiky [12].

Se zmenšující se ohniskovou vzdáleností se paprsek více zaostřuje, zmenšuje se průměr ohniska a Rayleighova délka. Poloha ohniska se rovněž mění v závislosti na druhu řezaného materiálu (obr. 5.21). [12]



Obr. 5.21 Polohy ohnisek na materiálu.

Výkon laserového paprsku

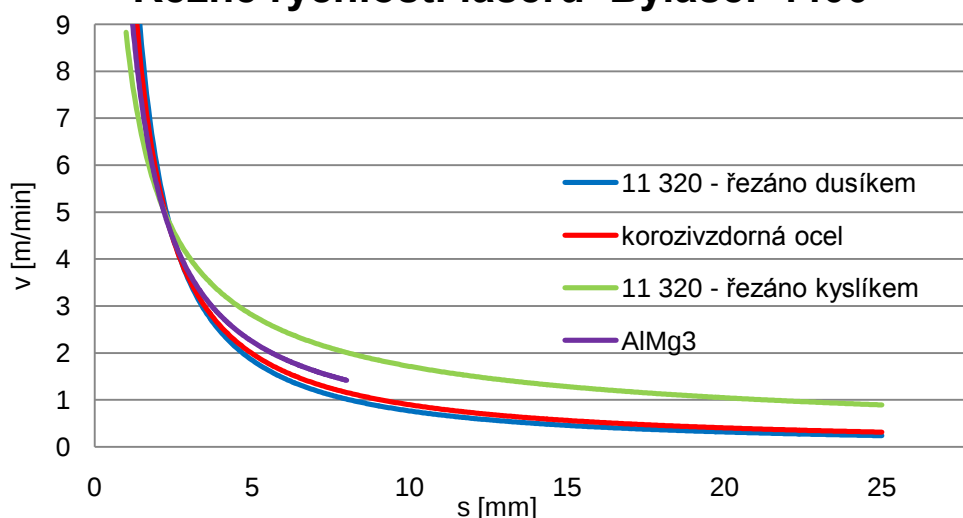
Výkon laserového paprsku musí být přizpůsoben technologii, druhu materiálu a jeho tloušťce. Maximální tloušťka řezaného materiálu závisí na jeho druhu a maximálním výkonu laseru (max. 8 000 W). [12]

Řezná rychlost

Musí být přizpůsobena druhu, tloušťce a kvalitě řezaného materiálu. Nedodržení optimálních parametrů řezné rychlosti vede k tvorbě otřepů, zápalům a horší jakosti řezné plochy. Pokud se řeže příliš rychle, hrozí možnost, že nedojde k plnému oddělení materiálu.

Čím větším výkonem laser disponuje, tím může být řezná rychlost vyšší. S narůstající tloušťkou materiálu se rychlost snižuje (obr. 5.22). Maximální rychlosti se rovněž liší u jednotlivých metod řezání, nejvyšších rychlostí se dosahuje při oxidačním řezání. [12]

Řezné rychlosti laseru Bylaser 4400



Obr. 5.22 Závislost řezných rychlostí laseru na tloušťce materiálu [26].

Výstupní tlak plynu

Tlak plynu se musí přizpůsobit tloušťce řezaného materiálu. Při řezání s použitím kyslíku se tlak nerovnoměrně snižuje s rostoucí tloušťkou materiálu. Při použití dusíku se většinou řeže za vysokých tlaků (vysokotlaké řezání). [12]

Tab. 5.7 Příklad výstupních tlaků plynů O₂/N₂ [12].

	O ₂	N ₂
	Tryska 1,2 mm	Tryska 2,3 mm
1 – 3 mm	4 bar	20 bar
5 – 30 mm	0,3 bar	20 bar

Tab. 5.8 Používané tlaky a trysky.

Plyn	Používané tlaky	Používané Ø trysek
N ₂	12 – 25 bar	1,7 – 3,0 mm
O ₂	0,6 – 5,6 bar	0,8 – 2,0 mm

Vlastnosti povrchu obrobku

Materiály s hladkými, lesklými povrchy, vedou k většímu odrazu laserového paprsku a tudíž k částečné ztrátě jeho výkonu. Do této skupiny patří kovové materiály, z nich zejména měď a její slitiny, u které dochází k odrazu až 70% výkonu laserového paprsku.

Dalšími faktory ovlivňujícími kvalitu řezu jsou přítomnosti:

- zoxidovaných povrchů,
- vrstev laků a barev,
- vrstev plastů,
- zbytky větších vrstev olejů.

Dobře se dají řezat oceli válcované, mořené a otrýskané. Plechy s ochrannou folií lze bez problémů řezat, pokud je použita jednostranně a je určena pro laserové řezání.

Laserové řezání velmi citlivě reaguje na kvalitu řezaného materiálu, zejména konstrukčních ocelí, kdy výslednou kvalitu řezu ovlivňují tyto parametry:

- chemické složení (vyšší obsah Si je škodlivý),
- způsob výroby (válcování za tepla/studena),
- vady materiálu (vměstky, dutiny).

V současné době se dodávají plechy z těchto materiálů určené přímo pro řezání laserem. Jednou z firem vyrábějících tyto plechy je firma Ruukki, která je nabízí pod označením Ruukki Laser. [12]

6 KVALITA A TEORETICKÁ PŘESNOST DĚLENÍ MATERIÁLU

Tato práce se zabývá následujícími metodami dělení materiálu:

- řezání laserem.
- vysekávání na vysekávacím stroji,
- stříhání na tabulových nůžkách.

6.1 Řezání laserem

Obecně se hodnocení kvality laserového řezu řídí normou DIN EN ISO 9013. V této práci je použito hodnocení řezu používané firmou TRUMPF, které je od této normy zčásti odchýlné. Rozměrová přesnost obrobku je určena druhem řezaného materiálu a z pohledu stroje také normou VDI/DGQ 3441(norma pro přesnost polohování CNC strojů).

Při hodnocení řezu jsou aplikována následující kritéria:

- tvorba otřepů,
- velikost řezné spáry,
- výmoly na povrchu obrobku,
- doběh drážek n ,
- průměrná největší výška profilu,
- tolerance pravoúhlosti a sklonu u . [12]

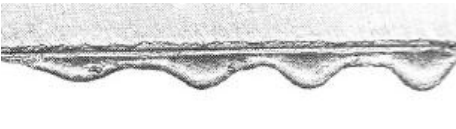
Tvorba otřepů

Existují dva druhy otřepů, jedná se o:

- silně přilnavý otřep, který nelze bez následného obrábění materiálu odstranit,
- přilnavou strusku, kterou lze lehce odstranit bez následného obrábění.

Tvorba otřepů se posuzuje vizuálně a popisuje se slovně. [12]

Tab. 6.1 Druhy otřepů [12].

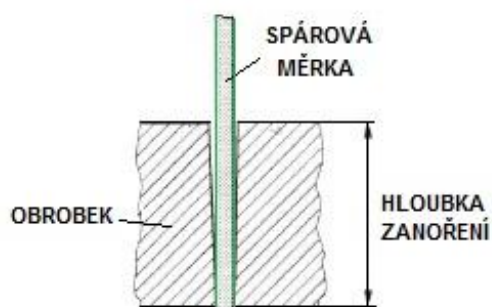
DRUH OTŘEPU	POPIS	PŘÍKLAD
PERLOVITÝ OTŘEP	Perlovitý nebo kapkovitý otřep s kovově lesklým povrchem, je silně přilnavý. Příklad: Konstrukční ocel, tl. 15 mm. Poloha ohniska +5	
HRUDKOVITÝ OTŘEP	Jemný, hrudkovitý otřep, je méně přilnavý. Příklad: Konstrukční ocel, tl. 15 mm. Poloha ohniska -1	
OSTRÝ OTŘEP	Roztřepený, hrubý a ostrohranný otřep, je zčásti silně přilnavý. Spodní strana řezu je zdrsňená. Příklad: Ušlechtilá ocel, tl. 8 mm. Poloha ohniska -4	
	Jemný, ostrohranný a roztřepený otřep, přilnutý ke spodní straně. Příklad: Ušlechtilá ocel, tl. 8 mm. Poloha ohniska -11	

Velikost řezné spáry

Při řezání laserem vzniká řezná spára, která se zpravidla od horní ke spodní hraně obrobku zužuje. Závisí zejména na následujících faktorech:

- průměru ohniska,
- materiálu,
- vlnové délce,
- technologii řezání.

K měření řezné spáry se používá spárových měrek (obr 6.1), kdy se zjišťuje hloubka zanoření měrky s. U materiálů s tloušťkou nad 3 mm se k přesnému změření vyřízne obdélník, u kterého se pomocí posuvného měřítka změří délka hrany. Z rozdílu vůči naprogramované délce hrany vyplývá šířka řezné spáry.



Obr. 6.1 Měření velikosti řezné spáry [12].

Velikost řezné spáry je u CO₂ laserů zpravidla užší, než u pevnolátkových laserů. [12]

Tab. 6.2 Přibližné velikosti řezných spár pro CO₂ lasery TruLaser [12].

MATERIÁL	TLOUŠŤKA PLECHU [mm]	ŘEZNÁ SPÁRA [mm]
Konstrukční ocel 1.0120	1 – 3	0,15
	4 – 6	0,2 – 0,3
	7 – 15	0,35 – 0,4
	16 – 20	0,5
Korozivzdorná ocel 1.4301 Vysokotlaké řezání N ₂ .	1 – 3	0,15
	4 – 8	0,2
	10 – 12	0,5
Hliníkové slitiny AlMg ₃ , AlMgSi ₁ Vysokotlaké řezání N ₂ .	1 – 3	0,15
	4 – 8	0,2 – 0,3

Výmoly na povrchu obrobku

Výmoly (obr. 6.2) jsou ty části obrobku, kde je při řezání stržen materiál nepravidelné šířky, hloubky a tvaru, což narušuje jinak ucelenou plochu řezu.

Při posuzování kvality řezu se u výmolů vizuálně hodnotí jejich charakteristika, která se pak slovně hodnotí. Stržení, která vzniknou v důsledku změny směru paprsku, se uvádějí zvlášť. [12]



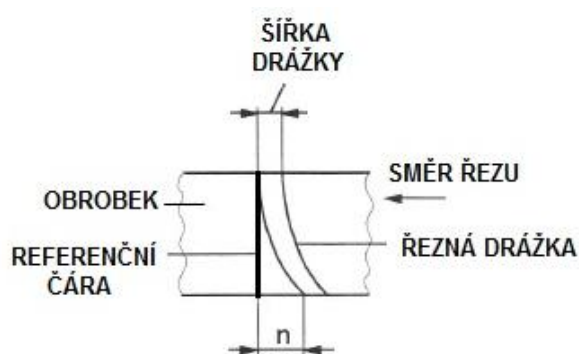
Obr. 6.2 Výmoly na povrchu obrobku [12].

Doběh drážek n

Při laserovém řezání se na řezné hraně vytváří typický drážkovitý vzor (obr. 6.3). Při nízké rychlosti je doběh drážek téměř shodný se směrem laserového paprsku. Čím více se rychlost zvyšuje, tím více dochází k jejich zalomení proti směru řezání.

Doběhem drážek n se označuje největší vzdálenost mezi dvěma řeznými drážkami, které se vyskytují ve směru řezání.

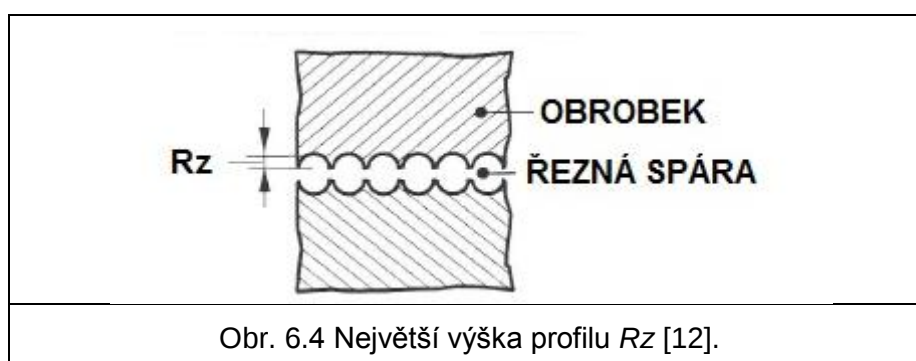
Doběh drážek se posuzuje vizuálně, kdy posouzení probíhá na základě fotografie, nebo vzorku řezu pomocí lupy nebo stereomikroskopu. Jedna určená čára slouží jako referenční čára pro posouzení. [12]



Obr. 6.3 Doběh drážek n [12].

Průměrná největší výška profilu

Jedná se o aritmetický průměr R_z (obr. 6.4) z jednotlivých reprezentativních měřených úseků. Bližší význam parametru R_z bude vysvětlen v následující kapitole.



Obr. 6.4 Největší výška profilu R_z [12].

Měření se provádí např. přístrojem pro dotykové měření dle ISO 3274 a probíhá podle ISO 4288 ve stálé vzdálenosti od okraje ve směru řezání.

Místo měření R_z materiálu závisí na tloušťce a druhu materiálu. Vzdálenost se uvádí od horní hrany materiálu (řezu).

Tab. 6.3 Vzdálenost měření R_z od horní hrany v závislosti na materiálu [12].

TLOUŠŤKA MATERIÁLU [mm]	VZDÁL. MĚŘENÍ [mm] KONSTRUKČNÍ OCEL	VZDÁL. MĚŘENÍ [mm] UŠLECHTILÁ OCEL	VZDÁL. MĚŘENÍ [mm] HLINÍK
2	0,5	0,5	0,5
2	1	1	1
3	2	1	2
4	2,6	2,6	2,6
5	3,3	1,6	3,3
6	4	4	4
8	5,3	7	5,3
10	1	9	–
12	1	11	–
15	1	–	–
20	1	–	–

Maximum R_z se u konstrukčních ocelí s tloušťkou plechu menší než 8mm pohybuje od spodní hranice plechu směrem k horní hranici plechu. U ušlechtilé oceli a hliníku toto pravidlo neplatí. [12]

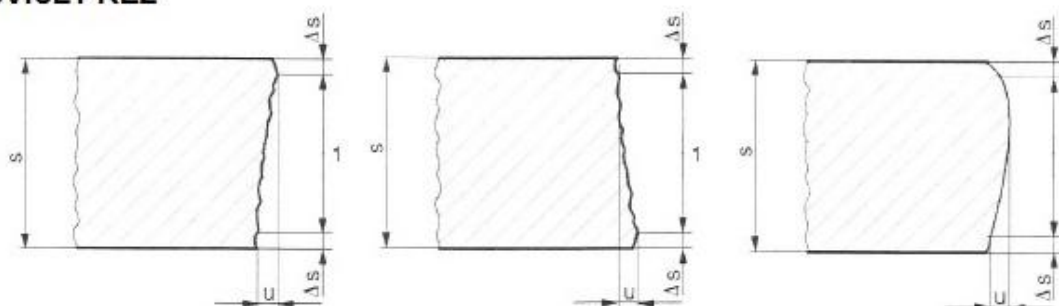
Tab. 6.4 Maximální dosahované hodnoty R_z v závislosti na materiálu [12].

TLOUŠŤKA MATERIÁLU [mm]	R_z max. [μm] KONSTRUKČNÍ OCEL	R_z max. [μm] UŠLECHTILÁ OCEL	R_z max. [μm] HLINÍK
1	9	6	18
1,5	8	–	13
2	15	10	17
2,5	7	–	14
3	17	10	22
4	5	10	20
5	6	10	19
6	6	13	14
8	7	19	46
10	28	43	–
12	23	38	–
15	28	–	–
20	28	–	–

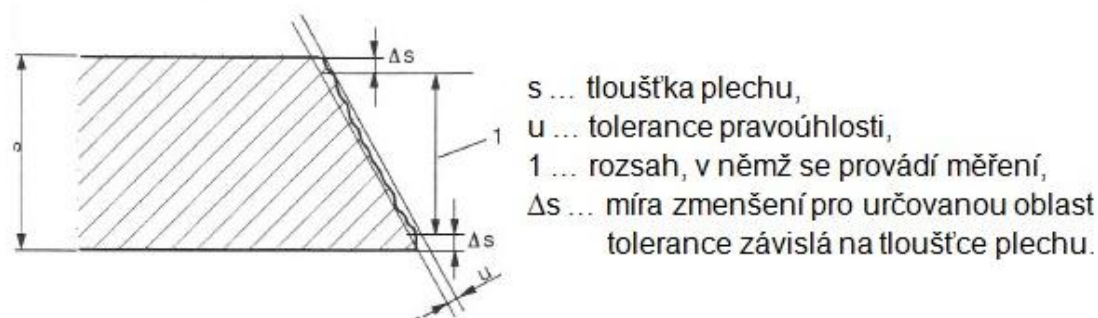
Tolerance pravoúhlosti a sklonu u

Tímto pojmem se označuje vzdálenost dvou rovnoběžných přímek, mezi kterými se musí nacházet profil plochy řezu pod teoreticky správným úhlem (u svislých řezů 90°). V toleranci pravoúhlosti a sklonu je obsažena úchylnost přímosti a rovinnosti (obr. 6.5). [12]

SVISLÝ ŘEZ



ZKOSENÝ ŘEZ



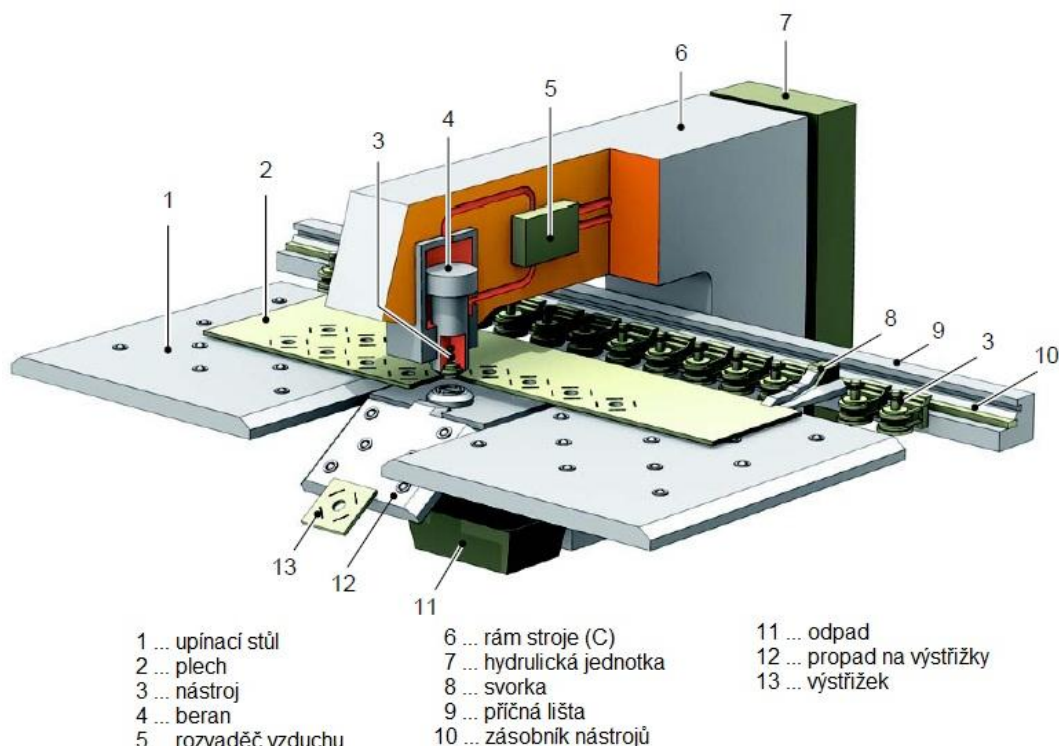
Obr. 6.5 Tolerance pravoúhlosti u sklonu u [12].

Tab. 6.5 Maximální dosahované hodnoty u v závislosti na materiálu [12].

VZOREC PRO HORNÍ MEZ u V ZÁVISLOSTI NA TLOUŠŤCE PLECHU s	
KONSTRUKČNÍ OCEL (řezání plamenem)	$u = 0,05 + 0,01 s$
UŠLECHTILÁ OCEL (tavné řezání)	$u = 0,005 + 0,033 s$
HLINÍK (tavné řezání)	$u = 0,03 + 0,035 s$

6.2 Vysekávání a stříhání

Vysekávání a stříhání na nůžkách je založeno na principu ustřižení materiálu, kdy oblast stříhu zaujímá cca 1/3 dělené plochy a u zbylých 2/3 dochází k utržení materiálu. Zásadní rozdíl spočívá v provedení stříhu, kdy délka nástroje u tabulových nůžek dosahuje řádově metrů a stříh je proveden pouze v jedné ose. Kdežto u vysekávacích strojů (obr. 6.6) mohou mít nástroje rozměry od milimetrů po desítky centimetrů a stříh probíhá v rovině v závislosti na tvaru a natočení nástroje.



Obr. 6.6 Vysekávací stroj [27].

Rozměrová přesnost je obvykle vyšší u vysekávacích strojů, kde dochází k jedinému zapolohování materiálu. U tabulových nůžek bylo nutno u vyráběných vzorků plech otáčet a opakovaně polohovat (v případě výroby pásů není nutno, pokud jsou nůžky vybaveny podavačem).

Na rozdíl od laseru při stříhání či vysekávání nejsou překážkou ostré rohy na kontuře obrobku. Ty u laseru činí jisté obtíže, a pokud je to možné, dochází k jejich nahrazení rádiusem.

Dosahovaná jakost střížné plochy závisí na kondici a kvalitě střížného nástroje a dále na druhu a tloušťce stříhaného materiálu. Obecně platí, že nejtlustší plechy, které se v praxi stříhají, mají tloušťku 8 mm. Uspokojivých výsledků kvality výstřižků se dosahuje do tloušťky plechu (3 – 4) mm. Při větších tloušťkách dochází k nadměrnému opotřebenosti nástroje a stroje, rovněž jakost střížné plochy a přesnost výstřižku se poté rychle zhoršuje.

Při vysekávání dochází u kontury k tvorbě výstupků (zubů), zapříčiněných novým najetím nástroje do materiálu (nástroj ve většině případů netvoří celou délku, tvar stříhu najednou). [27]

Tab. 6.6 Porovnání vysekávání (stříhání) a řezání laserem [27].

	VYSEKÁVÁNÍ (STŘÍHÁNÍ)	ŘEZÁNÍ LASEREM
Tloušťka materiálu		
Konstrukční ocel	do 8 mm	do 30 mm
Korozivzdorná ocel	do 8 mm	do 25 mm
Hliník	do 8 mm	do 15 mm
Plasty	podle křehkosti a stability materiálu	možné, problémy s toxicitou vytvořených plynů
Hrany		
Vtisk (zub)	závisí na nástroji a materiálu	–
Drsnost	nízká	velmi nízká
Kolmost	závisí na poměru stříh/utržení	0,1 mm na mat. tloušťky 10 mm
Tepelně ovlivněná oblast	–	0,1 – 0,2 mm
Otřep	závisí na nástroji, materiálu a mazivu	obvykle se nevyskytuje
Následné opracování	obvykle není potřeba, záleží na budoucím použití dílu	obvykle není potřeba
Dokončování	snadné	po oxidačním řezání je potřeba v některých případech očistit materiál od oxidů (záleží na budoucím použití dílu)
Kontury a tvary		
Min. šířka kontury	tloušťka materiálu	0,5 – 1x tloušťka mat.
Min. délka kontury	tloušťka materiálu	0,4 – 1x tloušťka mat.
Torze materiálu	možná při velké koncentraci děr	malá, závisí na použitém mat.
Tváření děleného mat.	možné	–
Značení mat.	možné	možné

Některé parametry uvedené ve sloupci vysekávání (stříhání) platí pouze pro vysekávání materiálu.

7 STRUKTURA POVRCHU

Strukturou povrchu a jejími parametry se blíže zabývá norma ČSN EN ISO 4287 Geometrické požadavky na výrobky – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu.

V kapitole jsou uvedeny výňatky skupin parametrů z této normy, z nichž některé byly posuzovány v rámci praktické části práce.

7.1 Názvy geometrických parametrů

- **P** – parametr, parametr vypočítaný ze základního profilu.
- **R** – parametr, parametr vypočítaný z profilu drsnosti.
- **W** – parametr, parametr vypočítaný z profilu vlnitosti. [28]

7.2 Výškové parametry – výstupky a prohlubně

- **Největší výška výstupku profilu;** P_p , R_p , W_p je výška nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (obr. 7.1). [28]
- **Největší hloubka prohlubně profilu;** P_v , R_v , W_v je hloubka nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (obr. 7.1). [28]
- **Největší výška profilu;** P_z , R_z , W_z je součet výšky nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (obr. 7.1). [28]

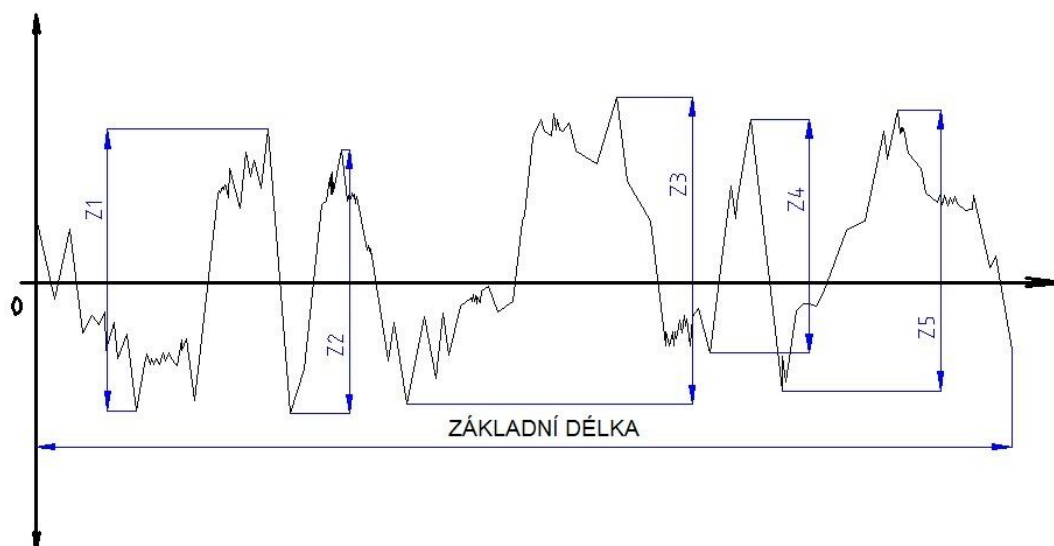


Obr. 7.1 Parametry R_p , R_v , R_z [28].

- **Průměrná výška profilu;** P_c , R_c , W_c je průměrná hodnota výšek sousedních výstupků a prohlubní profilu Z_t v rozsahu základní délky (obr. 7.2). [28]

Průměrná výška profilu [28]:

$$Pc, Rc, Wc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (7.1)$$



Obr. 7.2 průměrná výška profilu [28].

- **Celková výška profilu;** Pt , Rt , Wt je součet výšky nejvyššího výstupku a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. Ve standardním případě $Pz = Pt$. [28]

7.3 Výškové parametry – průměrné hodnoty souřadnic

- **Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu;** Pa , Ra , Wa je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. [28]

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [28]:

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (7.2)$$

- **Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu;** Pq , Rq , Wq je kvadratický průměr souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. [28]

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu [28]:

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (7.3)$$

- **Šikmost posuzovaného profilu;** Psk, Rsk, Wsk je podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Pq, Rq , nebo Wq v rozsahu základní délky. [27]

Šikmost posuzovaného profilu [28]:

$$Psk, Rsk, Wsk = \frac{1}{Pq, Rq, Wq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (7.4)$$

- **Špičatost posuzovaného profilu;** Pku, Rku, Wku je podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Pq, Rq , nebo Wq v rozsahu základní délky. [28]

Špičatost posuzovaného profilu [28]:

$$Pku, Rku, Wku = \frac{1}{Pq, Rq, Wq^2} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (7.5)$$

7.4 Křivky a odpovídající parametry

- **Materiálový poměr profilu (nosný podíl);** je poměr délky materiálu elementů MI profilu na dané úrovni k vyhodnocované délce. [28]

Materiálový poměr profilu [28]:

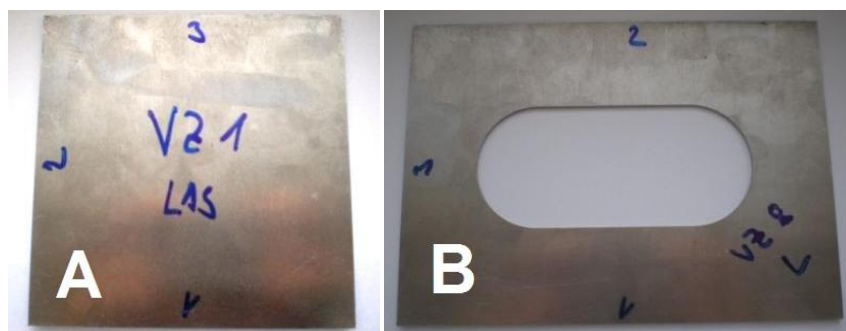
$$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c) = \frac{MI(c)}{ln} \quad (7.6)$$

8 VÝROBA A MĚŘENÍ VZORKŮ

Praktická část práce se zabývá porovnáním vzorků vyřezaných plynovým CO₂ laserem s vystříženými na tabulových nůžkách a vysekávacím stroji.

Pro porovnání s laserem byla zvolena technologie stříhání, protože výstřížky z tenkých plechů jsou velmi přesné a mají dobrou jakost střížné plochy. Stroje použité pro výrobu jsou spolu s modely vzorků uvedeny v 1. kapitole.

Na vzorcích (obr. 8.1) bylo následně provedeno měření výškových parametrů struktury povrchu R_a a R_z a materiálového poměru povrchu $R_{mr}(c)$. Dále byla měřena rozměrová přesnost vzorků a vyfotografována jejich střížná, nebo řezná plocha.



Obr. 8.1 Vyrobené vzorky A a B.

8.1 Vzorky a jejich materiál

Byly navrženy dva typy vzorků. Jeden pro porovnání tabulových nůžek s CO₂ laserem a druhý pro jeho porovnání s vysekávacím strojem viz 1. kapitola.

Vzorky byly vyráběny z tabule plechu tloušťky 2 mm nelegované, jakostní, hlubokotažné oceli 1.0330 (11 321 dle ČSN), válcovaný zastudena (lehce převálcovaný). Takto upravený plech se nejlépe hodí k řezání laserem, neboť je díky válcování za studena „uklidněný“ a nedochází k jeho kroucení a vyboulování vlivem tepla vneseného laserem.

Tab. 8.1 Chemické složení oceli 1.0330 [29].

C	Si	Mn	P	S
max. 0,12 %	–	max. 0,60 %	max. 0,045 %	max. 0,045 %

Obsah křemíku je v materiálu určeném pro řezání laserem škodlivý.

8.2 Měření parametrů R_a , R_z a $R_{mr}(c)$

Měření těchto parametrů probíhalo v laboratoři Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství, za pomoci digitálního profiloměru s indukčním snímačem (obr. 8.2).

Použité přístroje a pomůcky:

- digitální profiloměr Taylor Hobson, Form Talysurf 50 Intra,
- standardní raménko indukčního snímače s diamantovým hrotem,

- svěrák pod vrtačku s prizmou,
- broušené ocelové hranoly,
- leštěná žulová deska,
- stolní PC.

Podmínky měření:

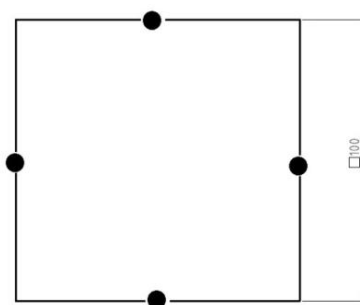
- teplota 18°C,
- tlak vzduchu 1 008 hPa,
- vzdušná vlhkost 45 %.



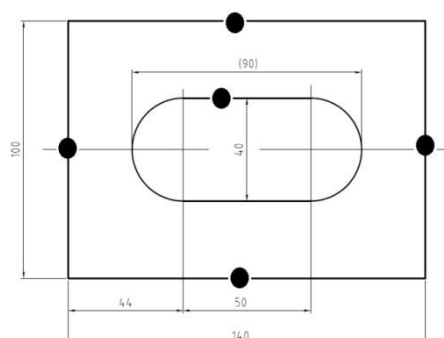
Obr. 8.2 Měřicí pracoviště.

Po prvotním zkušebním měření drsnosti byla stanovena u všech vyrobených vzorků základní délka drsnosti $l_r = 0,8$ mm a vyhodnocovaná délka drsnosti $l_n = 4,1$ mm.

Zkušební vzorky byly měřeny vždy jednou na třech různých stranách (obr. 8.3, 8.4). Měření bylo provedeno i u drážky vybraných vzorků, kdy byla drsnost změřena na dvou místech drážky, vzorek bylo nutno pro tento účel částečně znehodnotit, aby byl dosažen přístup pro raménko snímače.



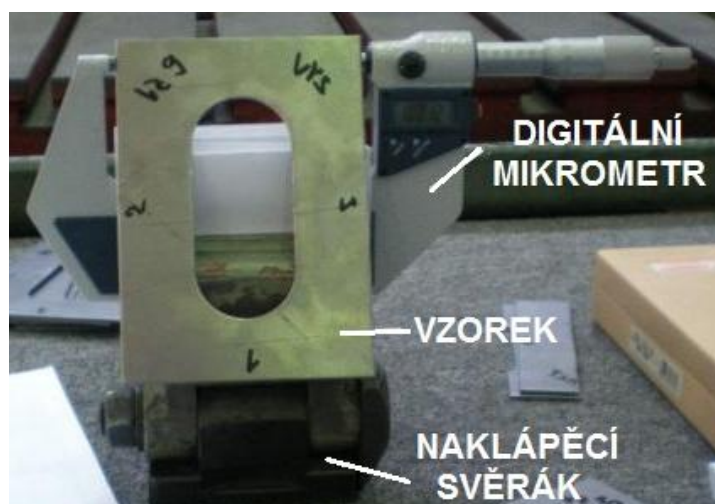
Obr. 8.3 Místa měřených úseků u vzorku A.



Obr. 8.4 Místa měřených úseků u vzorku B.

8.3 Měření rozměrové přesnosti

Měření rozměrové přesnosti probíhalo v dílnách Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství, za pomoci digitálního třmenového mikrometru (obr. 8.5).



Obr. 8.5 Měřící pracoviště.

Použité přístroje a pomůcky:

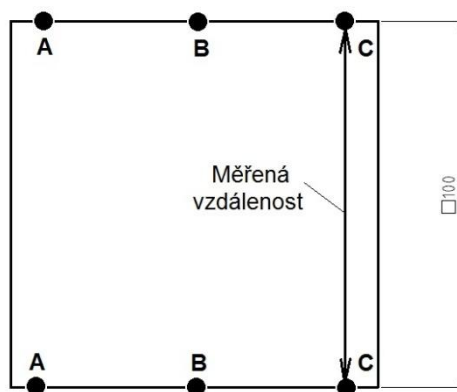
- digitální třmenový mikrometr Mitutoyo 75 – 100 mm; přesnost 0,001 mm,
- naklápěcí svěrák.

Podmínky měření:

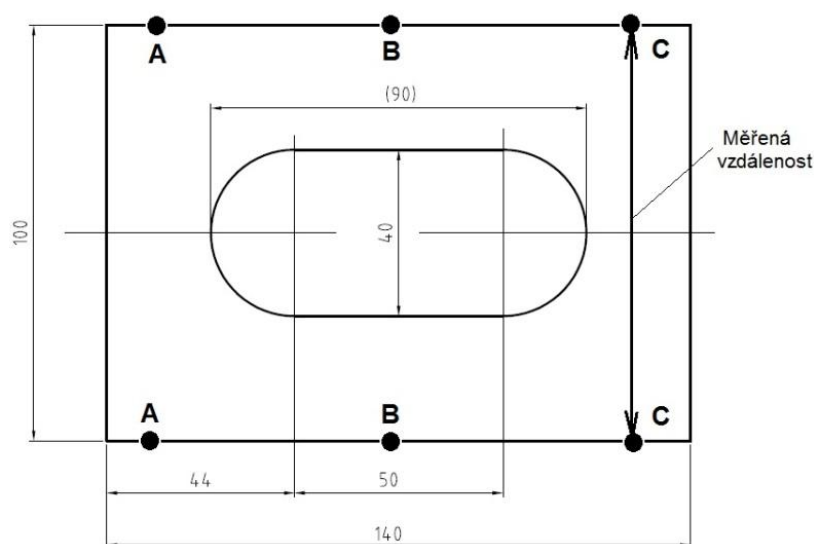
- teplota 15°C,
- tlak vzduchu 1 006 hPa,
- vzdušná vlhkost 40 %.

Všechny vzorky (vyjma znehodnocených z předchozího měření) byly změřeny ve třech bodech strany o jmenovitém rozměru 100 mm (Obr. 8.6, 8.7).

U obdélníkových vzorků je to kratší strana, u čtvercových nebyly strany určující, neboť všechny dosahují délky 100 mm.



Obr. 8.6 Schéma měření vzorku A.



Obr. 8.7 Schéma měření vzorku B.

8.4 Fotodokumentace vzorků

Fotodokumentace vzorků proběhla v laboratoři Ústavu materiálových věd a inženýrství Fakulty strojního inženýrství, za pomoci stereolupy.

Použité přístroje a pomůcky:

- binokulární lupa s PC výstupem obrazu,
- stolní PC,
- fixační hmota.

Pro možnost fotodokumentace řezných a střížných hran u některých vzorků, musely být vybrané vzorky opět znehodnoceny zkrácením jejich délky, aby je bylo možno vyfotografovat. Použito bylo zvětšení 1,5 a pak 4,5 pro větší detail plochy.

9 TECHNICKÉ POROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ

Tato kapitola obsahuje výsledky jednotlivých provedených měření, uvedených v předešlé kapitole a fotodokumentaci pořízenou za pomoci binokulární lupy. Nakonec bylo provedeno základní ekonomické zhodnocení metod.

Pro měření bylo vždy použito deset vzorků každého druhu, aby bylo dosaženo reprezentativních výsledků. V praxi by se jednalo o náhodný výběr, v tomto případě šlo o přesně vyrobené množství jednotlivých vzorků. Pro statistické vyhodnocení bylo použito Studentova rozdělení, neboť se nejlépe hodí pro malé soubory do 60 ks.

9.1 Struktura povrchu

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány. Ze tří naměřených hodnot u každého vzorku byl nejprve vypočítán aritmetický průměr a z tohoto průměru pak celkový odhad střední hodnoty celého souboru.

Aritmetický průměr [30]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9.1)$$

n ... Počet vzorků,

x ... jednotlivá hodnota souboru.

Odhad střední hodnoty byl použit pro výpočet odhadu směrodatné odchylky.

Směrodatná odchylka [30]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9.2)$$

Odhad směrodatné odchylky byl použit pro výpočet mezí konfidenčního a tolerančního intervalu souboru.

Horní mez konfidenčního intervalu [31]:

$$m_h = \bar{x} + t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (9.3)$$

$t_{1-\frac{\alpha}{2}; n-1}$... Kvantil Studentova t rozdělení pro $n-1$ stupňů volnosti (použit

$q_{0,95} = 1,833$ ze statistických tabulek na základě údajů o souboru).

Horní mez tolerančního intervalu [31]:

$$L_s = \bar{x} + k_1 \cdot s \quad (9.4)$$

k_1 ... Součinitel pro jednostranný interval souboru normálního rozdělení (použito $k_1 = 2,91$ ze statistických tabulek na základě údajů o souboru).

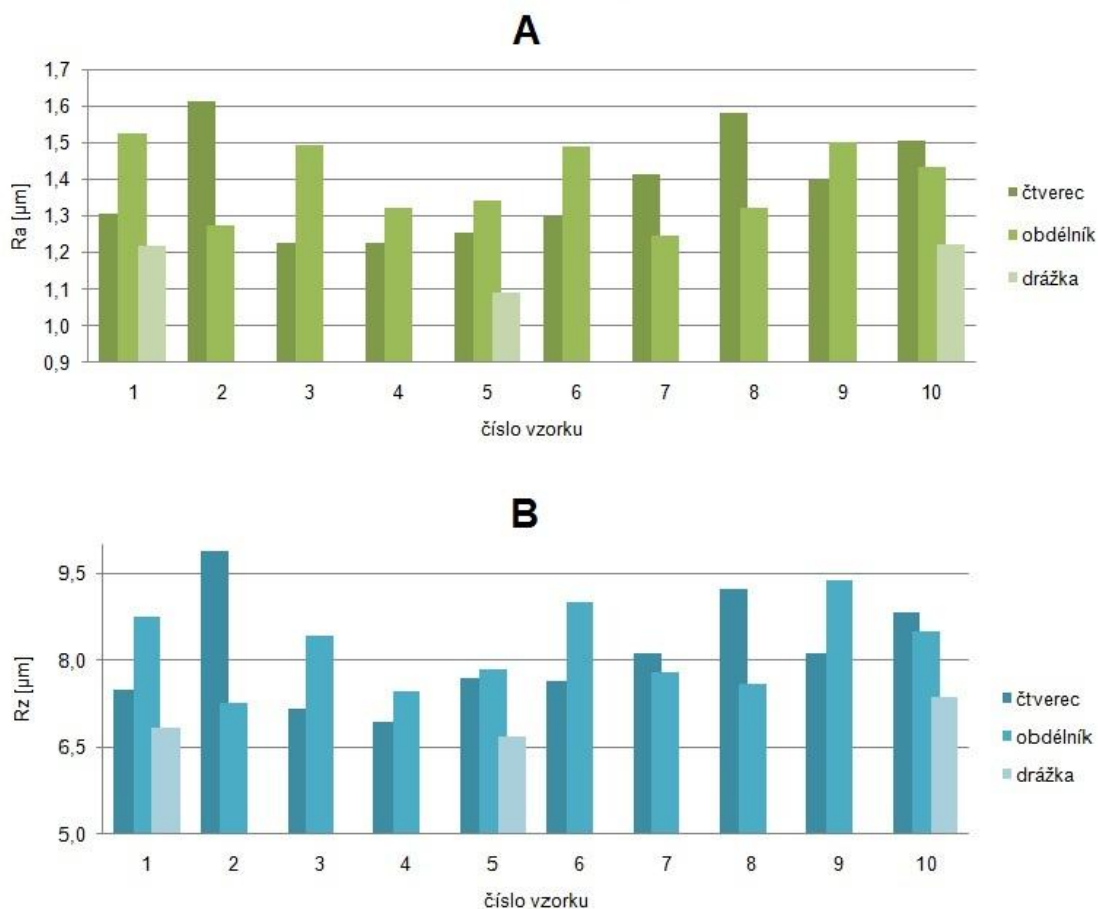
Hodnoty byly statisticky zpracovány za použití MS Excel a výsledky jsou prezentovány ve formě tabulek výsledků a grafů.

LASER

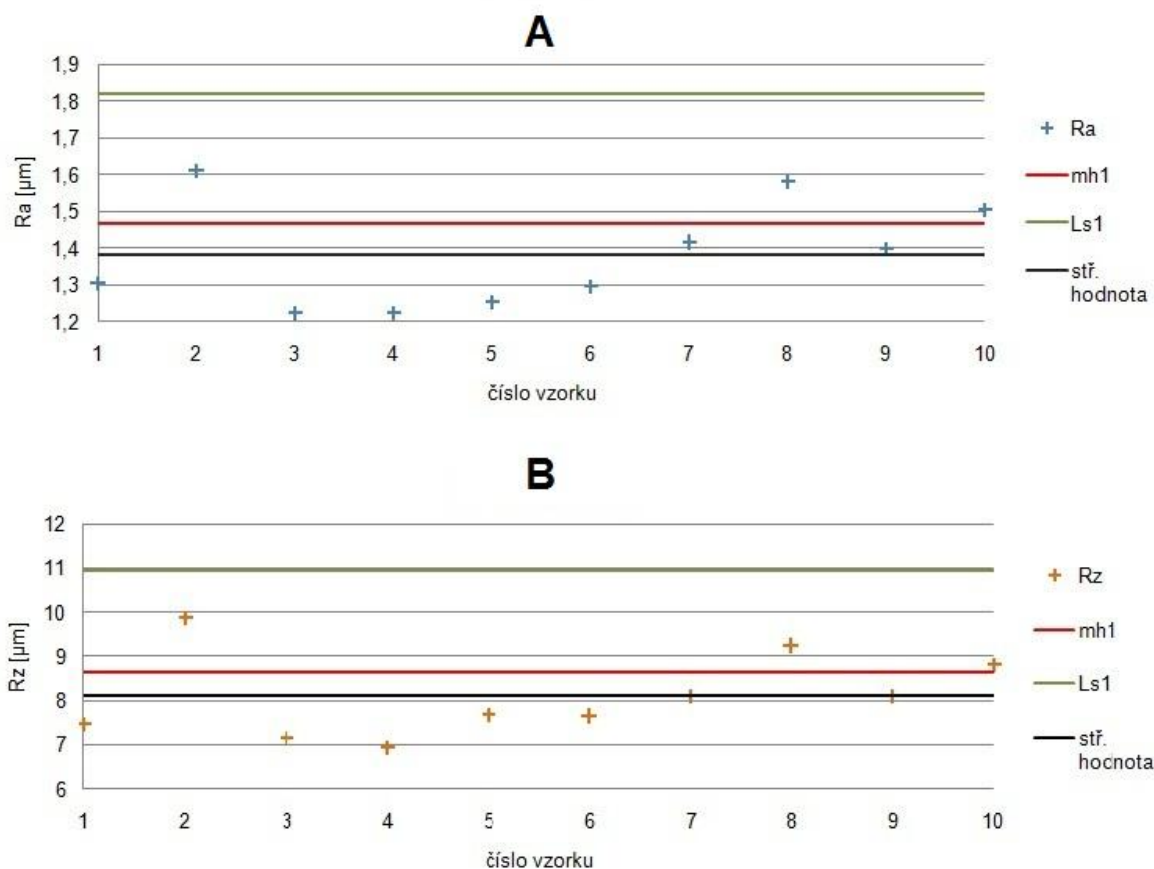
Pro dělení materiálu laserem byly zjištěny hodnoty uvedené v tabulce, z nich byly vytvořeny grafy (obr. 9.1, 9.2).

Tab. 9.1 Hodnoty struktury povrchu u laseru.

LASER - ČTVEREC											
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/Ra
Ra	1,3062	1,6130	1,2254	1,2257	1,2540	1,2975	1,4149	1,5819	1,3989	1,5053	1,3823
Rz	7,4911	9,8837	7,1516	6,9435	7,6906	7,6459	8,1152	9,2288	8,1218	8,8246	/Rz
Ra-mh1	1,4661	Ra-Ls1	1,8030	Rz-mh1	8,6549	Rz-Ls1	10,8467	Rmr	49,57 %	[μm]	8,1097
LASER - OBDÉLNÍK											
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/Ra
Ra	1,5241	1,2755	1,4935	1,3207	1,3408	1,4902	1,2445	1,3221	1,5025	1,4337	1,3947
Rz	8,7486	7,2501	8,4172	7,4574	7,8326	8,9924	7,7795	7,5891	9,3746	8,506	/Rz
Ra-mh1	1,4556	Ra-Ls1	1,7003	Rz-mh1	8,6086	Rz-Ls1	10,2725	Rmr	50,43 %	[μm]	8,1948
LASER DRÁŽKA											
vzorek	1	5	10								
Ra	1,2178	1,0883	1,2239	1,1766							
Rz	6,8379	6,6706	7,3652	/Rz							
Ra-mh1	1,2210	Ra-Ls1	1,3995	6,9579							
Rz-mh1	7,1680	Rz-Ls1	8,0127	[μm]							



Obr. 9.1 Hodnoty parametrů A) Ra a B) Rz u jednotlivých vzorků.



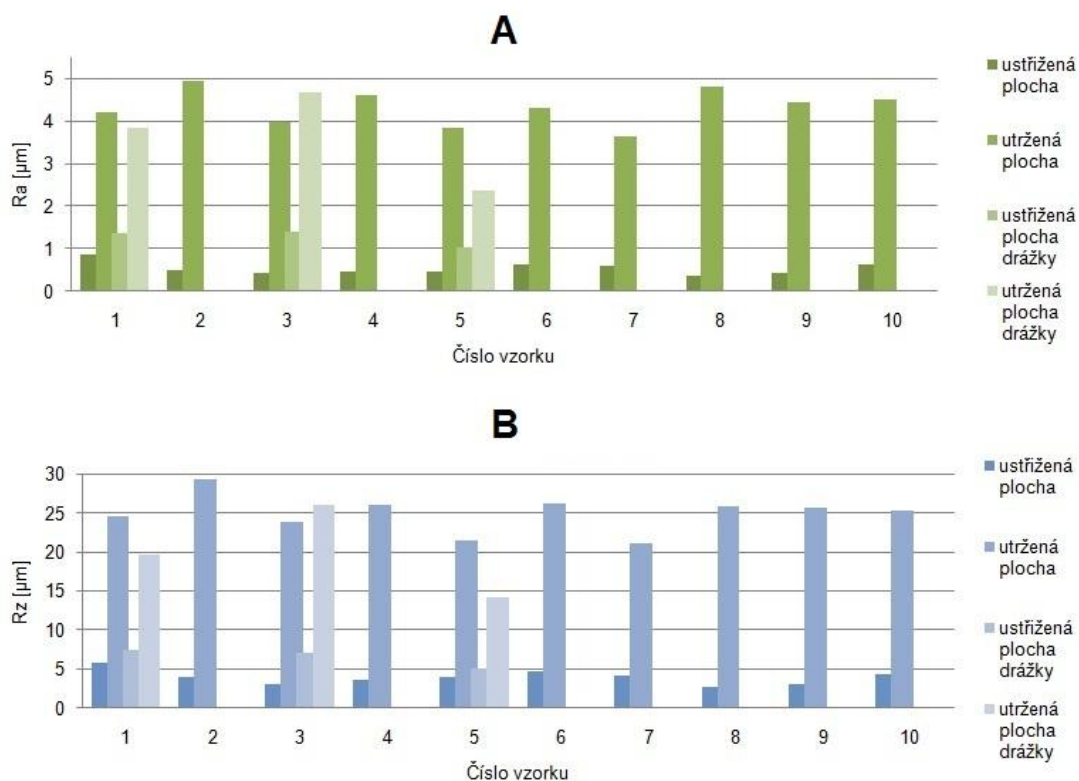
Obr. 9.2 Konfidenční a toleranční intervaly parametrů A) R_a a B) R_z u čtvercových vzorků.

VYSEKÁVACÍ STROJ

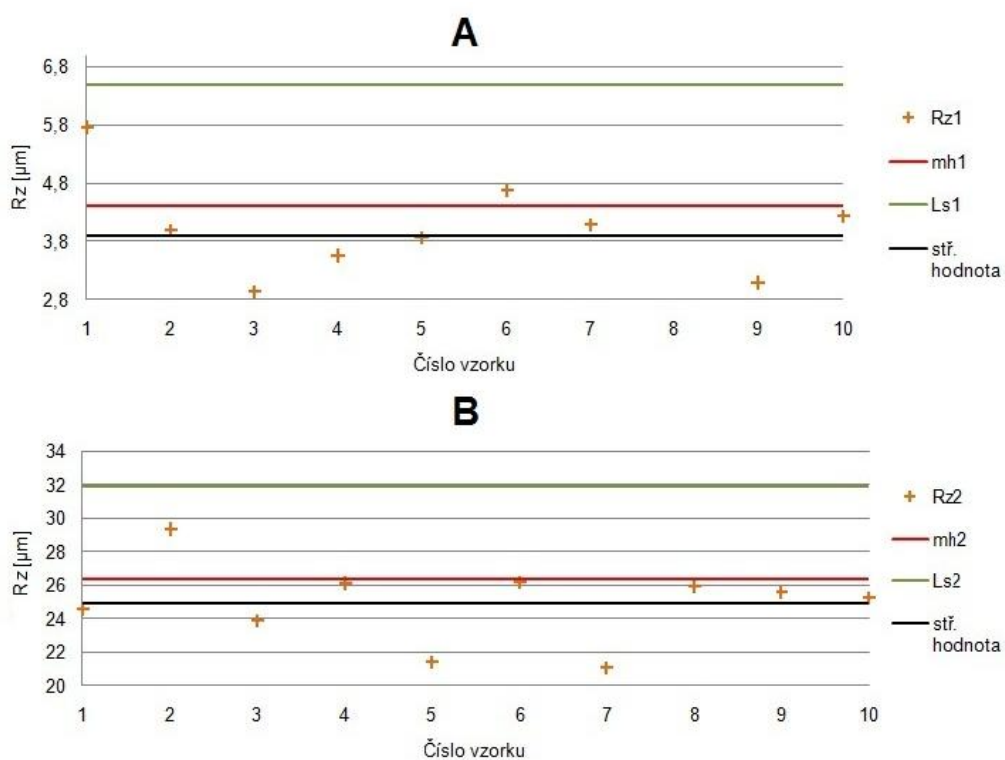
Pro dělení materiálu vysekávacím strojem byly zjištěny hodnoty uvedené v tabulce, z nich byly vytvořeny grafy (obr. 9.3, 9.4).

Tab. 9.2 Hodnoty struktury povrchu u vysekávacího stroje.

VYSEKÁVACÍ STROJ 1 (ustřižená plocha)											
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/Ra
Ra	0,8533	0,4918	0,4267	0,4460	0,4614	0,6324	0,5926	0,3702	0,4268	0,6316	0,5333
Rz	5,7519	3,9974	2,9503	3,5406	3,8704	4,6779	4,1005	2,7521	3,0800	4,2422	/Rz
Ra-mh1	0,6173	Ra-Ls1	0,9552	Rz-mh1	4,4156	Rz-Ls1	6,5033	Rmr	54,38 %	[μm]	3,8963
VYSEKÁVACÍ STROJ 2 (utržená plocha)											
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/Ra
Ra	4,2116	4,9550	3,9801	4,6012	3,8224	4,3172	3,6493	4,8089	4,4522	4,5018	4,3300
Rz	24,5827	29,3149	23,9155	26,0609	21,4146	26,2163	21,0943	25,8977	25,6214	25,2895	/Rz
Ra-mh2	4,5740	Ra-Ls2	5,5553	Rz-mh2	26,3331	Rz-Ls2	31,9304	Rmr	49,99 %	[μm]	24,9408
V. STROJ DRÁŽKA 1					V. STROJ DRÁŽKA 2						
vzorek	1	3	5	/Ra	vzorek	1	3	5	/Ra		
Ra	1,3680	1,3778	1,0183	1,2547	Ra	3,8494	4,6804	2,3796	3,6365		
Rz	7,3303	7,1308	5,1028	/Rz	Rz	19,5659	26,1065	14,1720	/Rz		
Ra-mh1	1,3734	Ra-Ls1	1,8506	6,5213	Ra-mh2	4,3118	Ra-Ls2	7,0269	19,948		
Rz-mh1	7,2357	Rz-Ls1	10,1079	[μm]	Rz-mh2	23,4123	Rz-Ls2	37,3399	[μm]		



Obr. 9.3 Hodnoty parametrů A) Ra a B) Rz u jednotlivých vzorků.



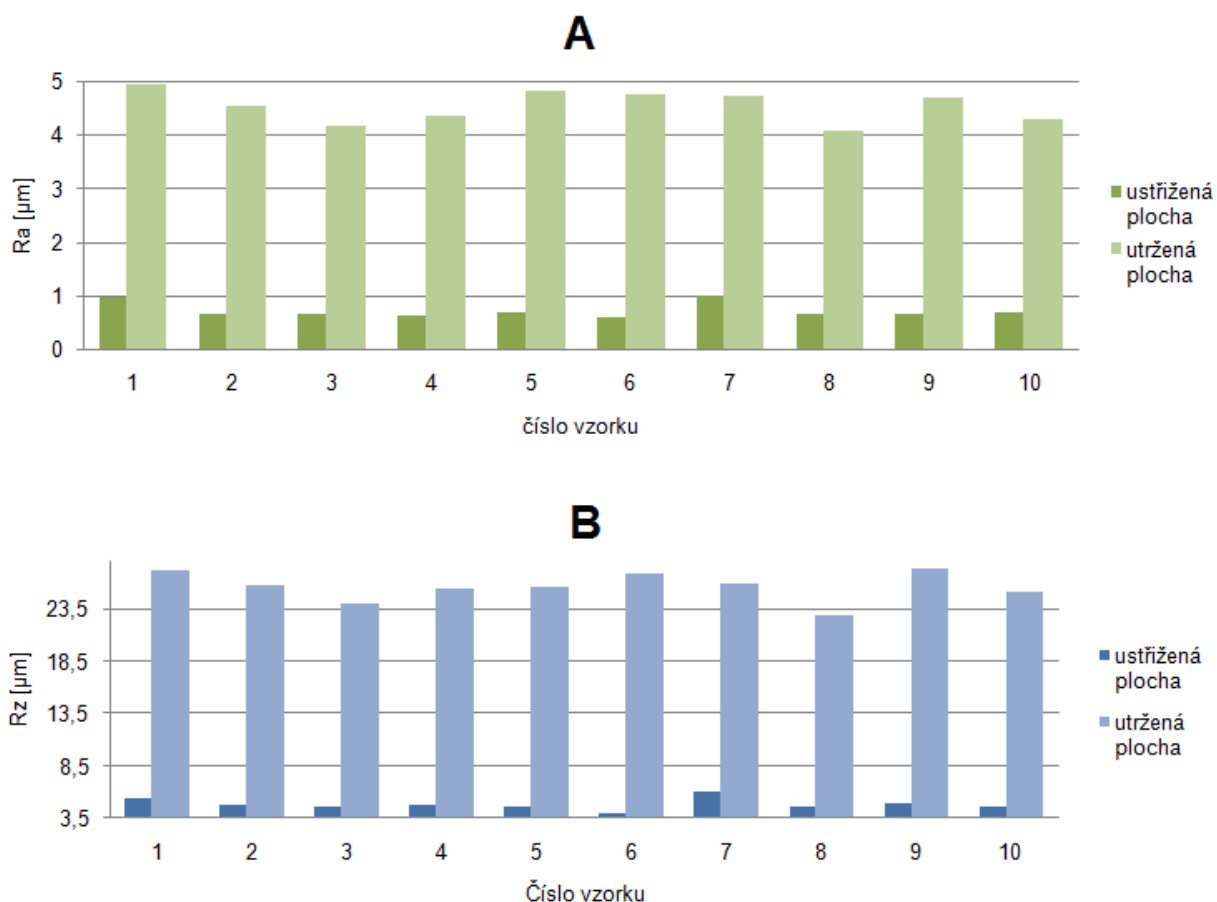
Obr. 9.4 Konfidenční a toleranční intervaly parametrů Rz pro A) ustřiženou a B) utrženou plochu.

TABULOVÉ NŮŽKY

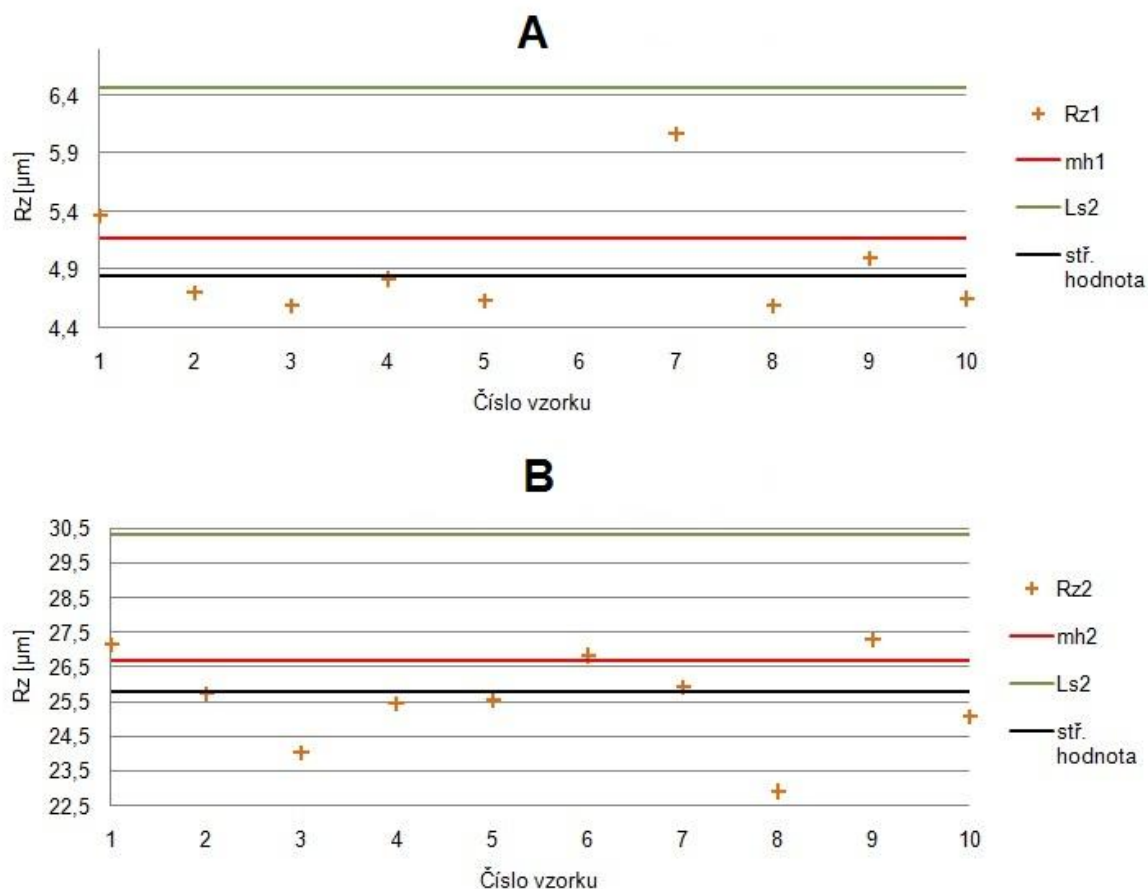
Pro dělení materiálu tabulovými nůžkami byly zjištěny hodnoty uvedené v tabulce, z nich byly vytvořeny grafy (obr. 9.5, 9.6).

Tab. 9.3 Hodnoty struktury povrchu u tabulových nůžek.

NŮŽKY 1 (ustřižená plocha)											
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/Ra
Ra	0,9621	0,6509	0,6648	0,6199	0,6925	0,6086	1,0093	0,6614	0,6621	0,6873	0,7219
Rz	5,3712	4,7112	4,5929	4,8145	4,6412	3,9683	6,0735	4,5964	5,0035	4,6418	/Rz
Ra-mh1	0,8041	Ra-Ls1	1,1347	Rz-mh1	5,1651	Rz-Ls1	6,4665	Rmr	50,26 %	[μm]	4,8414
NŮŽKY 2 (utržená plocha)											
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	/Ra
Ra	4,9447	4,5494	4,1622	4,3520	4,8082	4,7496	4,7321	4,0724	4,6855	4,2890	4,5345
Rz	27,1738	25,7490	24,0619	25,4735	25,5706	26,8161	25,9413	22,8855	27,3174	25,0800	/Rz
Ra-mh2	4,7070	Ra-Ls2	5,4006	Rz-mh2	26,7075	Rz-Ls2	30,3282	Rmr	49,14 %	[μm]	25,8069



Obr. 9.5 Hodnoty parametrů A) Ra a B) Rz u jednotlivých vzorků.



Obr. 9.6 Konfidenční a toleranční intervaly parametrů Rz pro A) ustřiženou a B) utrženou plochu.

9.2 Rozměrová přesnost

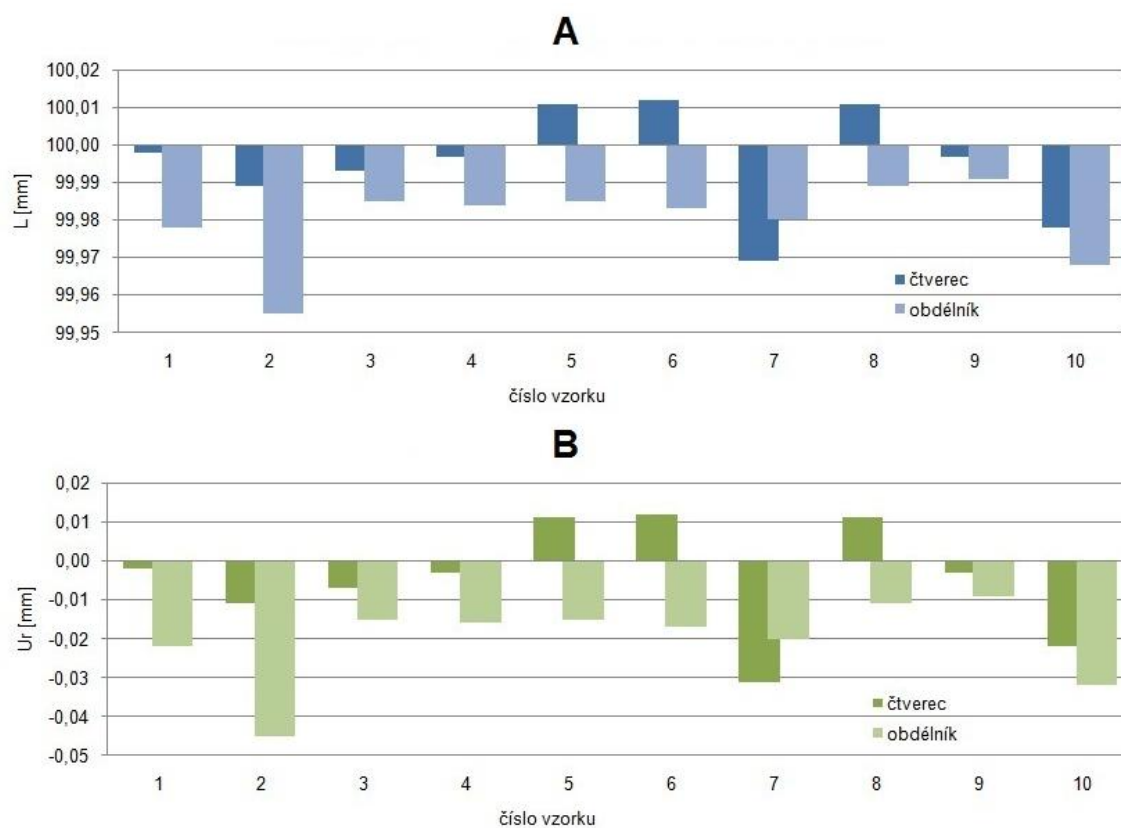
Naměřené hodnoty rozměrů byly statisticky zpracovány stejným způsobem jako struktura povrchu. Rozdíl je pouze v intervalu hodnot, který dosahuje jak plusových, tak minusových hodnot vzhledem ke jmenovitému rozměru 100 mm. Byly tedy statisticky určeny jak horní, tak dolní meze intervalu.

LASER

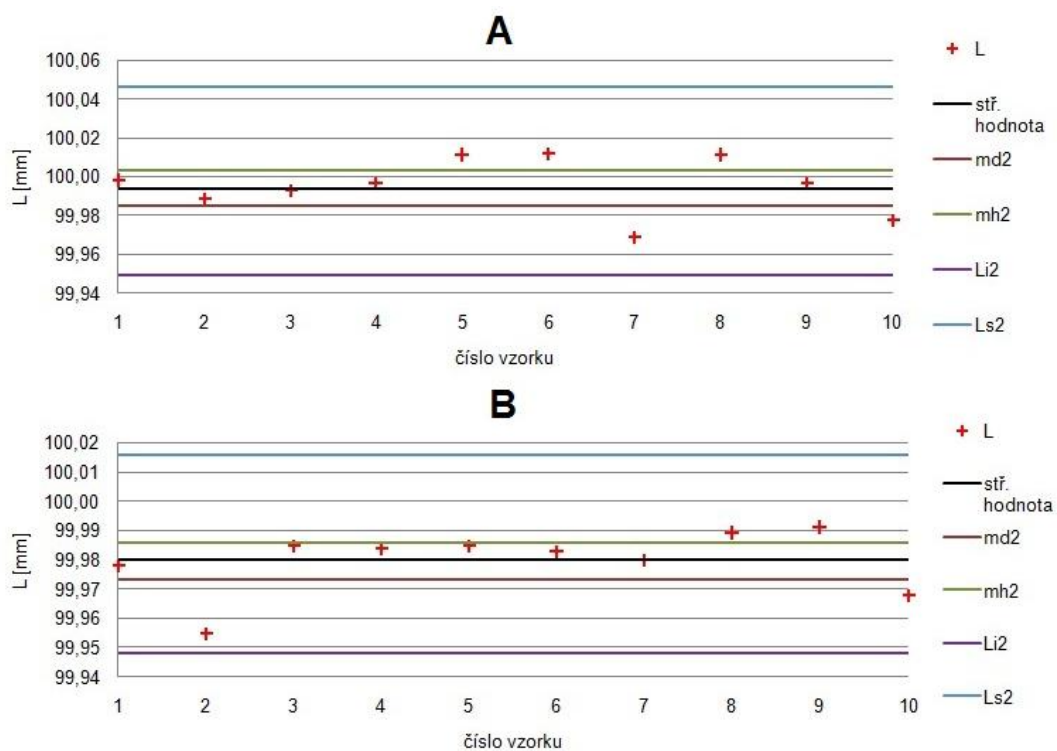
Pro dělení materiálu laserem byly zjištěny hodnoty uvedené v tabulce, z nich byly vytvořeny grafy (obr. 9.7, 9.8).

Tab. 9.4 Hodnoty rozměrové přesnosti u laseru.

LASER										
ČTVEREC										
č. vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
/L	99,998	99,989	99,993	99,997	100,011	100,012	99,969	100,011	99,997	99,978
/Ur	99,994	md2	99,985	mh2	100,003	Li2	99,949	Ls2	100,046	[μm]
LASER										
OBDÉLNÍK										
č. vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
/L	99,978	99,955	99,985	99,984	99,985	99,983	99,980	99,989	99,991	99,968
/Ur	99,980	md2	99,973	mh2	99,986	Li2	99,948	Ls2	100,016	[μm]



Obr. 9.7 A) rozměrová přesnost a B) úchytky rozměrů vzorků.



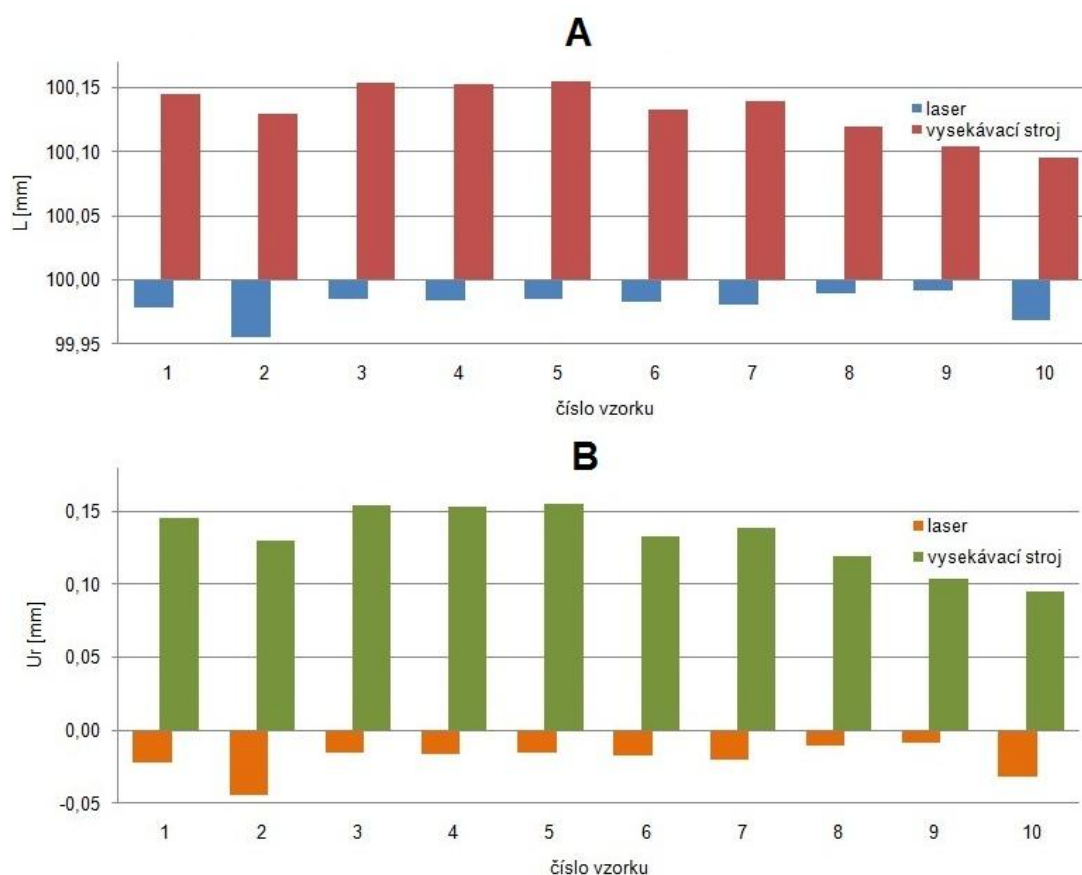
Obr. 9.8 Konfidenční a toleranční intervaly rozměrové přesnosti vzorků A) obdélník, B) čtverec.

VYSEKÁVACÍ STROJ

Pro dělení materiálu vysekávacím strojem byly zjištěny hodnoty uvedené v tabulce, z nich byly vytvořeny grafy (obr. 9.9, 9.10).

Tab. 9.5 Hodnoty rozměrové přesnosti u vysekávacího stroje.

VYSEKÁVACÍ STROJ										
OBDÉLNÍK										
č. vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
/L	100,145	100,130	100,154	100,153	100,155	100,133	100,139	100,119	100,104	100,095
/Ur	100,133	md2	100,121	mh2	100,145	Li2	100,072	Ls2	100,204	[μm]



Obr. 9.9 A) rozměrová přesnost a B) úchytky rozměrů vzorků.



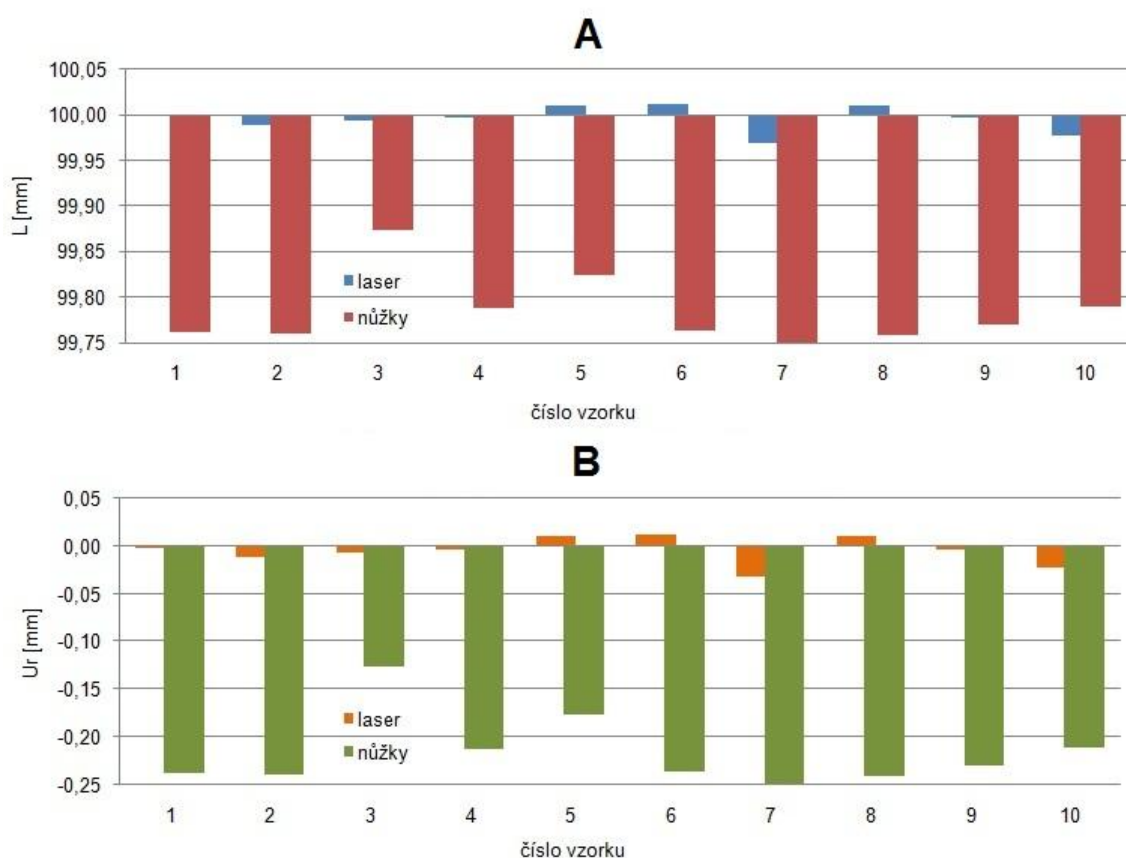
Obr. 9.10 Konfidenční a toleranční interval rozměrové přesnosti vzorků.

TABULOVÉ NŮŽKY

Pro dělení materiálu tabulovými nůžkami byly zjištěny hodnoty uvedené v tabulce, z nich byly vytvořeny grafy (obr. 9.11, 9.12).

Tab. 9.6 Hodnoty rozměrové přesnosti u tabulových nůžek.

NŮŽKY										
ČTVEREC										
č. vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
/L	99,762	99,761	99,874	99,788	99,824	99,764	99,751	99,759	99,770	99,789
/Ur	99,784	md2	99,762	mh2	99,806	Li2	99,674	Ls2	99,912	[μm]



Obr. 9.11 A) rozměrová přesnost a B) úchyly rozměrů vzorků.



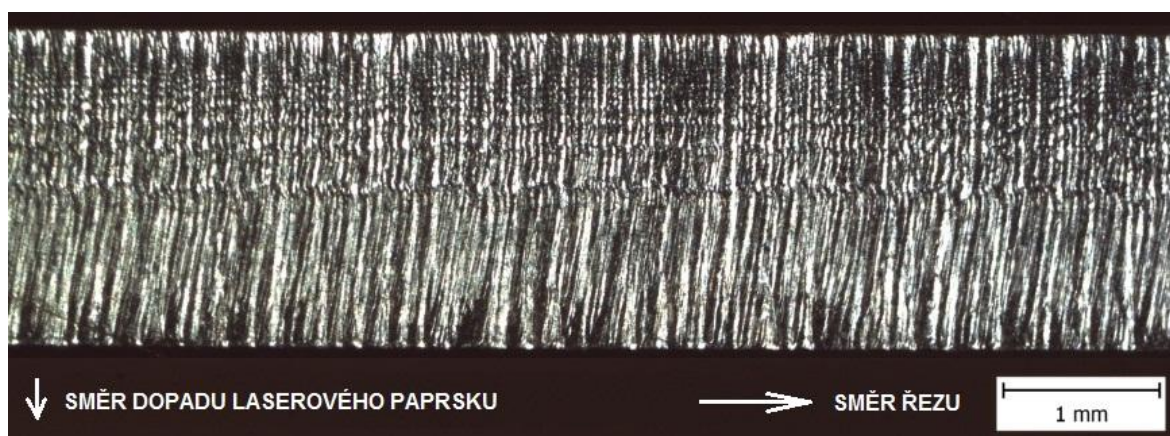
Obr. 9.12 Konfidenční a toleranční interval rozměrové přesnosti vzorků.

9.3 Fotodokumentace dělicích ploch vzorků

U vybraných vzorků dělených laserem, vysekávacím stroji a tabulovými nůžkami byla pro porovnání jednotlivých metod vyfotografována dělicí plocha.

LASER

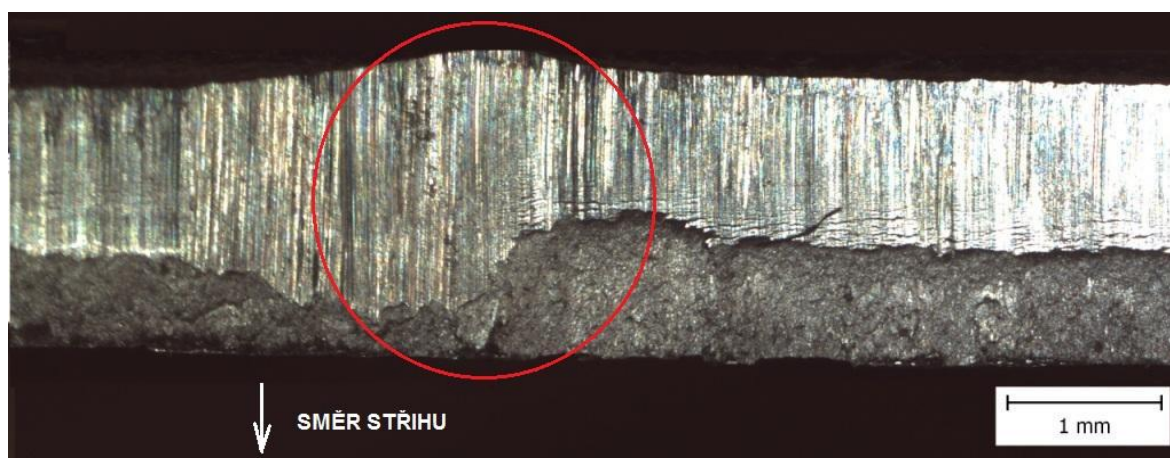
Na fotografii plochy řezané laserem (obr. 9.13) je patrná struktura povrchu s typickým drážkovitým vzorem, u kterého je doběh drážek částečně vyhnutý proti směru řezu. Plocha je bez výmolů, otřepů a nečistot.



Obr. 9.13 Fotografie řezné plochy u laseru.

VYSEKÁVACÍ STROJ

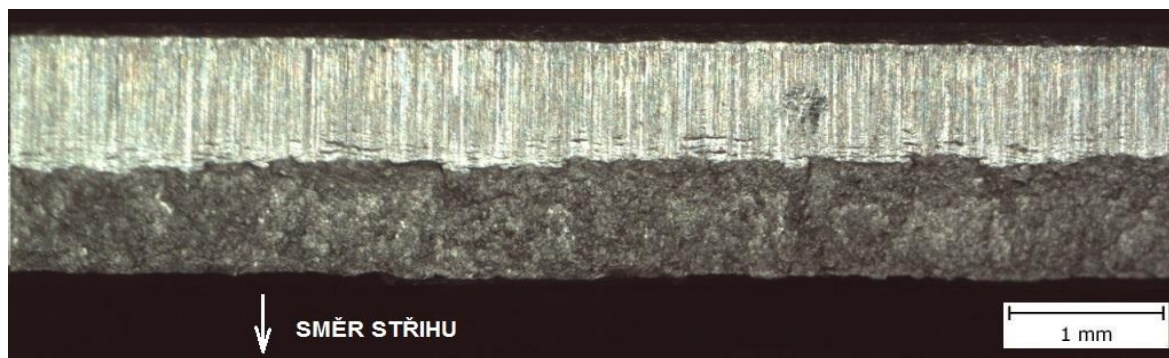
Na fotografii plochy ustřižené na vysekávacím stroji (obr. 9.14) je patrný červeně označený výstupek. Tento výstupek se objevuje vždy při novém najetí střížného nástroje do roviny stříhu, je to dáno částečným tvářením stříhaného materiálu před vlastním stříhem. Dále jde vidět, že stroj i nástroj jsou ve velmi dobré kondici, neboť ustřižená délka dosahuje v některých místech i více jak poloviny tloušťky stříhaného materiálu. Plocha je bez větších otřepů.



Obr. 9.14 Fotografie střížné plochy u vysekávacího stroje.

TABULOVÉ NŮŽKY

Ustřižená plocha na tabulových nůžkách (obr. 9.15) má celistvý charakter bez výstupků, neboť nedocházelo k opakovanému najetí nástroje do roviny stříhu. Stroj i nástroj jsou rovněž v dobré kondici, neboť ustřižená délka dosahuje zhruba poloviny tloušťky stříhaného materiálu. Plocha je bez větších otřepů.



Obr. 9.15 Fotografie střížné plochy u tabulových nůžek.

9.4 Základní ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení vzniklo na základě dostupných informací k uvedeným metodám výroby z výchozí vyrobené série 10 ks vzorků.

VSTUPNÍ ÚDAJE

Zjištěny byly údaje uvedené v tabulce. Ceny uvedené v eurech byly přepočítány podle kurzu 1 EUR = 25,74 Kč (kurz ČNB ke dni 29. 4. 2013).

Tab. 9.7 Vstupní ekonomické údaje.

NÁKUPNÍ CENA STROJŮ			CENA MATERIÁLU	
Vysekávací stroj	12 000 000 Kč		Vysekávací stroj	18,00 Kč/kg
Tabulové nůžky	6 000 000 Kč		Tabulové nůžky	18,00 Kč/kg
Laser	16 600 000 Kč		Laser	15,50 Kč/kg
NÁSTROJE VYSEKÁVACÍHO STROJE			VÝROBNÍ ČASY PRO 1 KS	
Kruhový Ø40 mm	118 €	3 037 Kč	Vysekávací stroj	B - 0,16 min
Čtvercový 25 mm	233 €	5 997 Kč	Tabulové nůžky	A - 0,23 min
Dělicí 76,2 x 5 mm	574 €	14 775 Kč	Laser	A - 0,09 min
Kazety nástrojů 3ks	1 200 €	30 888 Kč		B - 0,16 min
			VÝROBNÍ NÁKLADY PRO 1 KS	
			Vysekávací stroj	B - 2,37 Kč
			Tabulové nůžky	A - 2,51 Kč
			Laser	A - 2,40 Kč
				B - 4.26 Kč

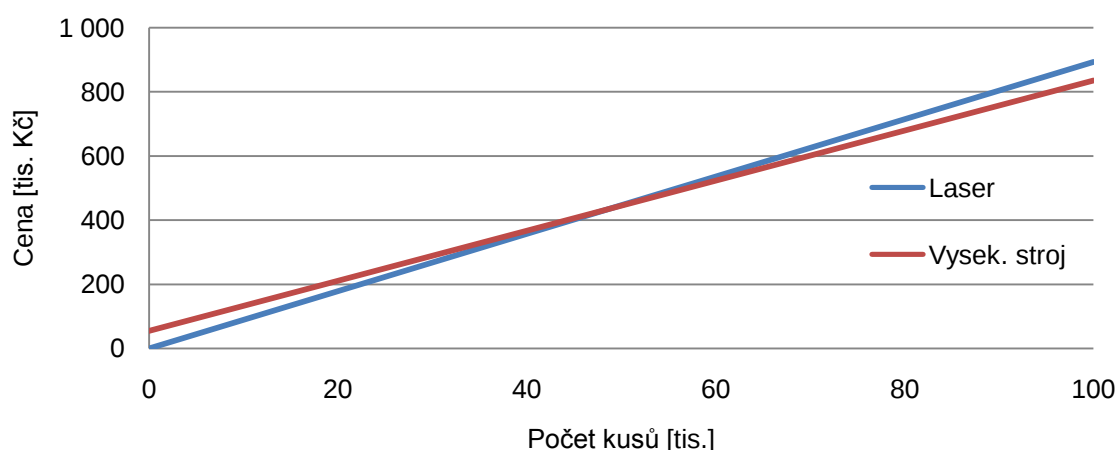
Z těchto vstupních údajů byly vypočítány celkové výrobní ceny jednotlivých vzorků.

Tab. 9.8 vypočítané ceny vzorků.

CELKOVÁ CENA VÝROBY 1 KS			
Stroj	Cena materiálu	Výrobní náklady	Celkem
Vysekávací stroj - B	5,43 Kč	2,37 Kč	7,80 Kč
Tabulové nůžky - A	3,42 Kč	2,51 Kč	5,93 Kč
Laser - A	3,50 Kč	2,40 Kč	5,90 Kč
- B	4,67 Kč	4,26 Kč	8,93 Kč

Z cen jednotlivých vzorků a cen potřebných zakoupených nástrojů byla zjištěna ekonomická výhodnost jednotlivých metod. V případě srovnání laser – tabulové nůžky toho nebylo potřeba, neboť už z tab. 9.8 vyplývá, že výroba na laseru vychází o 0,03 Kč levněji. Bylo tedy provedeno srovnání laser – vysekávací stroj (obr. 9.16).

Laser - vysekávací stroj



Obr. 9.16 Srovnání výhodnosti laseru a vysekávacího stroje.

Bylo vypočítáno, že při celkové pořizovací ceně uvedených vysekávacích nástrojů 54 697 Kč započítané do ceny každého kusu, začíná být vysekávací stroj výhodnější od série o počtu 48 405 ks.

Pro série o malém počtu kusů vychází laser nejvýhodněji. Dále vychází výhodněji u větších tloušťkách materiálu (nad 8 mm), které už se stříhacími technologiemi prakticky nedělí a součástí, u kterých je požadována plocha beze stop po najetí nástroje. Zde by bylo adekvátní posouzení např. s plazmovým dělením materiálu, které však není součástí této práce.

10 DOPORUČENÍ PRO PRAKTICKOU REALIZACI

Na základě zkoumání dříve uvedených parametrů u jednotlivých vzorků, bylo zjištěno, že výsledky vzorků vyrobených laserem vycházejí ze zkoumaných metod nejlépe:

- **struktura povrchu,**

U laseru se hodnota R_a pohybuje kolem $1,4\text{ }\mu\text{m}$ a hodnota R_z kolem $8\text{ }\mu\text{m}$. Vzhledem k tomu, že tyto hodnoty struktury povrchu jsou dosažitelné v celé tloušťce děleného materiálu, jedná se o nejlepší výsledek ze srovnávaných metod.

U vysekávacího stroje se hodnota R_a pohybuje kolem $0,5\text{ }\mu\text{m}$ a R_z kolem $3,9\text{ }\mu\text{m}$, jedná se však o ustřiženou část tloušťky materiálu, která tvoří cca $(0,5 - 0,7)$ tloušťky vysekávaného materiálu. Ve zbylé tloušťce, dochází k utržení materiálu, což se projeví horšími parametry struktury povrchu. Hodnota R_a se zde pohybuje kolem $4,3\text{ }\mu\text{m}$ a R_z kolem $24,9\text{ }\mu\text{m}$.

U tabulových nůžek se hodnota R_a pohybuje kolem $0,7\text{ }\mu\text{m}$ a R_z kolem $4,5\text{ }\mu\text{m}$. Jedná se jako v předešlém případě o ustřiženou část (cca $(0,4 - 0,6)$ tloušťky vysekávaného materiálu). Ve zbylé části se hodnota R_a pohybuje kolem $4,5\text{ }\mu\text{m}$ a R_z kolem $25,8\text{ }\mu\text{m}$.

- **rozměrová přesnost,**

Laser vyniká svou vysokou přesností, kdy se odchylka teoretického od jmenovitého rozměru pohybovala u vzorku B v průměru kolem $20\text{ }\mu\text{m}$ a u vzorku A dokonce jen kolem $6\text{ }\mu\text{m}$. Což odpovídá největším odchylkám v řádech setin milimetru. U měřených vzorků byla odchylka kladná i záporná vzhledem ke jmenovitému rozměru. Pro daný jmenovitý rozměr vzorku se jedná o stupeň přesnosti IT 7.

U vysekávacího stroje byla odchylka od jmenovitého rozměru v průměru $0,133\text{ mm}$. U měřeného vzorku byla tato odchylka vždy kladná. Hodnoty odchylek se tedy pohybovaly v řádu desetin milimetru, což pro daný rozměr vzorku odpovídá stupni přesnosti IT 10.

Na tabulových nůžkách byla odchylka od jmenovitého rozměru v průměru $0,216\text{ mm}$. U měřeného vzorku byla odchylka vždy záporná. Hodnoty odchylek se pohybovaly v řádu desetin milimetru, avšak vyšších než u vysekávacího stroje, což pro daný rozměr vzorku odpovídá stupni přesnosti IT 11.

- **fotodokumentace dělicích ploch,**

Plocha po dělení laserem tvoří jednotný povrch s miniaturními drážkami po vniku laserového paprsku. Plocha je bez otřepů a nečistot. Ve většině případů už není potřeba další úpravy.

Plocha po dělení vysekávacím strojem se skládá ze dvou rozdílných ploch, jak už bylo řečeno výše. Ustřižená plocha působí jednotným dojmem s velmi dobrými parametry struktury povrchu. Naopak utržená část plochy je velmi hrubá s patrnými četnými propady a výstupky materiálu.

V místě nového najetí nástroje do roviny stříhu materiálu je materiál trochu vystouplý, je totiž v tomto místě před samotným stříhem částečně tvářen. Plocha je bez otřepů a nečistot. Při dobrém stavu nástrojů a stroje není většinou potřeba dalších úprav.

Plocha po dělení tabulovými nůžkami je v podstatě totožná s předchozí plochou z vysekávacího stroje. U tabulových nůžek nedochází k tvorbě výstupků materiálu, neboť nástroj vždy stříhá materiál celou svou plochou a nedochází k opakovanému najetí nástroje do roviny stříhu.

- **ekonomické hodnocení.**

V ekonomickém hodnocení vyšel pro výrobu daného množství a typu vzorku ekonomicky nejvýhodněji laser. Tabulové nůžky pro danou výrobu nejsou celkově vhodné a vysekávací stroj je pro výrobu výhodný až od počtu 48 405 ks.

Doporučení

Výroba daného typu vzorků je nejvýhodnější na laseru. Laser je z porovnávaných metod nejvíce vhodný pro dělení součástí menších délek a složitějších tvarů při menších sériích. Neplatí u tlustších materiálů (tl. 8 mm a výše), kdy už se materiál tabulovými nůžkami, nebo vysekávacím strojem zpravidla nedělí. Tabulové nůžky jsou vhodné pro dělení plechů na pruhy do tloušťky materiálu 8 mm. Vysekávací stroj je vhodný pro dělení tvarově složitých součástí větších sérií (vysoká pořizovací cena nástrojů) s tloušťkou materiálu do 8 mm. Od tloušťky materiálu 8 mm se vyjma laseru používá k dělení materiálu ve značné míře také plazma, srovnání těchto dvou metod není součástí práce.

11 DISKUZE

Z porovnávaných metod vychází pro dané množství vzorků kvalitativně, rychlostí výroby a ekonomicky nejvýhodněji laser. Každá z porovnávaných metod má své limitující faktory, zkušební vzorky musely být tomuto faktu přizpůsobeny. Jelikož byl laser porovnáván s tabulovými nůžkami, bylo nutné zkušební vzorky navrhnout ve tvaru obdélníku, nebo čtverce s ostrými rohy bez rádiusů.

To je limitující faktor pro laser, který nemůže při řezání materiálu najíždět do ostrých rohů za plného výkonu a rychlosti řezání, neboť by došlo k jejich částečnému upálení. Doporučuje se tedy pro dělení materiálu laserem předeepsat do rohů aspoň minimální rádius. Při řezání materiálu laserem je řezaná plocha celistvá a celkově kolmá na čelní plochu s ostrým rohem podél linie řezu. Podle předpokladů dosahovaly vzorky nejlepších parametrů struktury povrchu (dodržení zásad správné technologie řezání) a vysoké rozměrové přesnosti (ovlivněna zejména přesností posuvů u konkrétního stroje, v dnešní době stanovena normou ISO 230–2, VDI/DGQ 3441 pro přesnost polohování strojů s řízenými osami).

Limitujícím faktorem pro tabulové nůžky bylo enormní zvýšení výrobního času z důvodu provedení krátkých stříhů a opakovaného ručního seřizování polohy plechu. Z tohoto důvodu došlo k velkému časovému rozdílu výroby oproti ostatním porovnávaným metodám. Dalším limitujícím faktorem je tloušťka střiženého materiálu, která v praxi dosahuje maximálně 8 mm. Střižná plocha se skládá ze dvou částí, ustřižené a utržené. U vyhodnocovaných vzorků tvoří poměr mezi těmito částmi zhruba 0,5/0,5 tloušťky ustřiženého materiálu, což svědčí o dobrém stavu a seřízení stroje a zanedbatelném opotřebení nástroje. Střižná plocha tvoří v linii stříhu s čelní plochou mírný rádius, ten je zapříčiněn částečným tvářením materiálu před začátkem vlastního stříhu (není potřeba sražení hrany). Rozměrová nepřesnost byla do značné míry způsobena opakovanou chybou při ručním polohování plechu.

U vysekávacího stroje jsou limitující rychlosti jednotlivých posuvů stroje a rychlosti pohybu vysekávacího nástroje. Ten je schopen natáčení o 360°, což snižuje potřebu tvarových nástrojů pro výrobu. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena těchto nástrojů. Střižná plocha se stejně jako u tabulových nůžek skládá ze dvou částí (ustřižené a utržené), které u vyhodnocovaných vzorků tvoří poměr zhruba 0,6/0,4 tloušťky vysekávaného materiálu. To svědčí o dobrém stavu a seřízení stroje a zanedbatelném opotřebení nástroje. Střižná plocha tvoří v linii stříhu s čelní plochou mírný rádius, ten je zapříčiněn tvářením materiálu před vlastním stříhem. Na střižné a čelní ploše jsou patrné malé rýhy v místě nového najetí nástroje do roviny stříhu (po tváření materiálu). Vysekávací stroje jsou většinou tvořeny rámem tvaru C a zpravidla se používají se pro dělení materiálů do tloušťek 8 mm.

Kvalita a teoretická přesnost a její hodnoty popsané v kapitole 6 jsou pouze orientačního charakteru. Hodnoty pro konkrétní případ jsou vždy ovlivněny stavem a druhem děleného materiálu, stavem a nastavením stroje, opotřebením nástroje, nebo optických prvků (laser) a dodržením správných technologických zásad a parametrů pro danou technologii. Lze říci, že hodnoty měřených parametrů u vyrobených vzorků všech srovnávaných technologií jsou výrazně lepší než hodnoty teoreticky předpokládané. Polotovary tloušťky 2 mm byl zvolen na základě dobrých parametrů střižné plochy u vysekávání i stříhání a možnosti srovnání s laserem.

ZÁVĚR

V diplomové práci bylo dosaženo následujících výsledků:

- byl nastíněn princip laserové technologie a její využití ve strojírenství, s hlavním zaměřením na dělení materiálu laserem,
- byly zjištěny a uvedeny teoretické parametry, určované při dělení materiálu jednotlivými způsoby,
- byly navrženy a vyrobeny dva druhy zkušebních vzorků, sloužící pro porovnání metod dělení materiálu laserem, vysekávacím strojem a tabulovými nůžkami,
- u vzorků bylo provedeno měření a následné statistické vyhodnocení parametrů Ra a Rz struktury povrchu,
- bylo provedeno měření a statistické vyhodnocení rozměrové přesnosti jednotlivých vzorků pro dané metody,
- byla vytvořena fotodokumentace dělené plochy vzorků,
- výroba jednotlivých vzorků byla, na základě vstupů pro výrobu série 10 ks, ekonomicky zhodnocena,
- na základě zjištěných údajů bylo vytvořeno doporučení pro praktickou realizaci.

Z údajů zjištěných v jednotlivých bodech práce byl potvrzen teoretický předpoklad, že dělení materiálu laserem bude z porovnávaných metod nejpřesnější (u rozměrů dosahováno až stupně přesnosti IT 7), s nejlepší celkovou strukturou povrchu, kde parametr Ra dosahuje hodnot kolem $1,4\text{ }\mu\text{m}$ a Rz kolem $8\text{ }\mu\text{m}$ (rovněž stupeň přesnosti IT 7).

Ekonomicky nejvýhodnější je pro dané množství a typy vzorků rovněž metoda laserového dělení materiálu. Na tabulových nůžkách lze vytvářet menší výrobky, čtvercového, nebo obdélníkového tvaru za mnohem delších časů a tudíž vyšších nákladů. Vysekávací stroj je v délce výrobního času srovnatelný s laserem a jeho provoz vychází levněji, avšak pořizovací cena jednotlivých vysekávacích nástrojů dělá výrobu rentabilní až od sérií s větším počtem kusů, v tomto případě by to bylo 48 405 ks.

Byla tedy ověřena použitelnost laseru pro dělení součástí menších rozměrů, jednoduchých tvarů, u plechu z konstrukční oceli tloušťky 2 mm. Laser vychází z porovnávaných metod ekonomicky nejprůzračněji, s velmi dobrými parametry rozměrové přesnosti a struktury povrchu (až IT 7).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Laser*. 3D HD Wallpaper [online]. 2011 [vid. 2013-02-25]. Dostupné z: <http://wallpaper-3d-hd.ru/cz/preview.php?hd=4816>
2. *Laserové řezání*. BV Brumovice [online]. 2012 [vid. 2013-02-25]. Dostupné z: <http://www.bvbrumovice.cz/index.php?page=1>
3. *Laser Cutting System BySpeed*. Bystronic [online]. 2012 [vid. 2013-04-19]. Dostupné z: [http://www.bystronic.cz/cs/products/LaserSystems/BySpeed Pro.php](http://www.bystronic.cz/cs/products/LaserSystems/BySpeedPro.php)
4. *Shears/ VS Series*. Durmazlar [online]. 2012 [vid. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://v1.durmazlar.com.tr/products/2/vs-series>
5. *Vysekávací stroj TruPunch 5 000*. Trumpf [online]. 2012 [vid. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-troje/produkty/vysekovani/vysekovaci-stroje/trupunch-5000.html>
6. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace*. PLS spol. s.r.o. [online]. 2002. 6 s. [vid. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
7. *Laser má dnes 50 let*. ALISI Brno [online]. 2010 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://alisi.isibrno.cz/aktuality/laser-ma-dnes-50-let-vyvijel-se-i-v-brne>
8. *Historie*. ALISI Brno [online]. 2012 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.isibrno.cz/muzeum/kgs/komuzeum/petru%20a%20laser.jpg>
9. ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. PLS spol. s.r.o. [online]. 2004. 8 s. [vid. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
10. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, 2000. 122 s. ISBN 80-277-1425-9.
11. *Seriál na téma lasery*. Lao [online]. 2011 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
12. ODDĚLENÍ TECHNICKÉ LITERATURY FIRMY TRUMPF WERKZEUG-MASCHINEN GMBH+CO. KG. *Obrábění laserem: CO₂ laser*. [soubor pdf.] 2007. 140 s. [vid. 2013-04-22].
13. *Laserové povlakování*. ARCRobotics s.r.o. [online]. 2010 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.arc-robotics.cz/laserove-navarovani.html>
14. FRROD s.r.o. [online]. 2011 [vid. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.frrod.cz/gallery.php?dir=248507&field=2&pic=1&ref=248507>
15. Promo Glass s.r.o. [online]. 2008 [vid. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.promoglass.cz/#img-3088-jpg>
16. Centrum laserových a automatizačních technologií CELAT [online]. 2010 [vid. 2013-03-11]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/galerie/displayimage.php?album=13&pos=10>

17. *Nekonvenční metody obrábění*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
18. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění* [tištěná verze]. Brno, 2012. 96 s. [vid. 2013-04-22].
19. *Laserové řezání* [online]. 2011 [vid. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
20. *Nd:YAG laser*. Wikipedia [online]. 1997 [vid. 2013-04-11]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Powerlite_NdYAG.jpg
21. *2D laserová řezací zařízení*. TRUMPF [online]. 2013 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni.html>
22. *3D obrábění laserem*. TRUMPF [online]. 2013 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/vyrobyky/laserova-zarizeni/3d-obrabeni-laserem.html>
23. *Stroje na řezání trubek*. TRUMPF [online]. 2013 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-trubek-laserem/stroje-na-rezani-trubek.html>
24. *Roboty*. ABB v České republice [online]. 2013 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/us/9AAC100735.aspx>
25. *Čistota technických plynů*. AIR PRODUCTS [online]. 2013 [vid. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/news/novinky/press92.htm>
26. *Tabulky řezných rychlostí: Byspeed 5200ARC* [soubor pdf.]. 2007 [vid. 2013-04-22].
27. BUCHFLNK, Gabriela. *Fascination of sheet metal* [soubor pdf.] Würzburg: Vogel Buchverlag, 2006. 21 s. [vid. 2013-04-22]. ISBN 978-3-8343-3071-0.
28. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobu (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 16 s.
29. *Nelegovaná jakostní hlubokotažná ocel: 1.0330* [soubor pdf.] 2008. 1 s. [vid. 2013-04-22].
30. ZDENĚK, Karpíšek. *Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost*. 3. doplněné vydání. Olomoučany: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 170 s. ISBN 978-80-214-3380-9.
31. ČSN ISO 16269-6. *Statistická interpretace dat - Část 6: Stanovení statistických tolerančních intervalů*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 33 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CO ₂	[-]	oxid uhličitý
DC	[-]	buzení laseru stejnosměrným proudem
RF	[-]	radiofrekvenční buzení laseru
Nd:YAG	[-]	yttrium aluminium granát dopovaný ionty neodymu

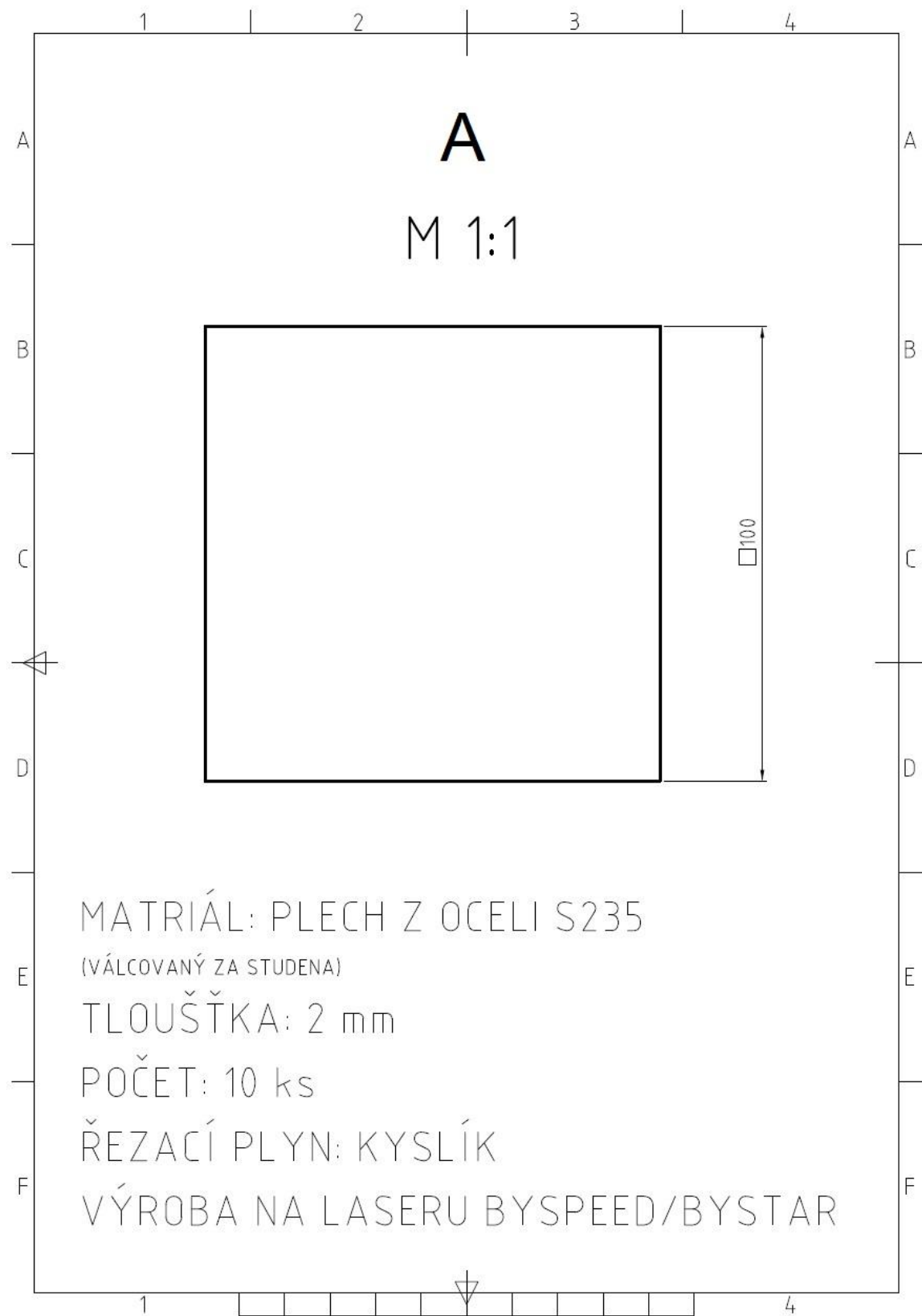
Symbol	Jednotka	Popis
E	[J]	energie
L _s	[μm]	horní mez tolerančního intervalu
L _i	[μm]	dolní mez tolerančního intervalu
m _h	[μm]	horní mez konfidenčního intervalu
m _s	[μm]	dolní mez konfidenčního intervalu
n	[-]	počet vzorků
n	[mm]	doběh drážek
h	[J·s]	Planckova konstanta
s	[mm]	tloušťka materiálu
s	[-]	směrodatná odchylka
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Rz	[μm]	největší výška profilu
Rmr(c)	[%]	materiálový poměr profilu
v	[Hz]	frekvence elektromagnetického záření
v	[m·s ⁻¹]	řezná rychlost
$\bar{x}$	[-]	aritmetický průměr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres vzorku A
Příloha 2	Výkres vzorku B
Příloha 3	Výrobní údaje – laser
Příloha 4	Výrobní údaje – vysekávací stroj
Příloha 5	Výroba vzorků
Příloha 6	Materiálové listy
Příloha 7	Atest materiálu
Příloha 8	Struktura povrchu – laser
Příloha 9	Struktura povrchu – tabulové nůžky
Příloha 10	Struktura povrchu – vysekávací stroj
Příloha 11	Měření vzorků
Příloha 12	Struktura povrchu laser/vysekávací stroj
Příloha 13	Struktura povrchu laser/tabulové nůžky
Příloha 14	Fotodokumentace dělicí plochy

PŘÍLOHA 1

Výkres vzorku A



PŘÍLOHA 2

Výkres vzorku B



PŘÍLOHA 3 (1/4)

Výrobní údaje – laser

BYPART

Flat part

JAR00701

1065

Code: JAR00701
Designation: 2 - S235 STUDENY
Technology: Laser cutting
Additional info: N, VZOREK

Created: 27.2.2013 by: Roman
altered: 27.2.2013 by: Roman
Checked: by:

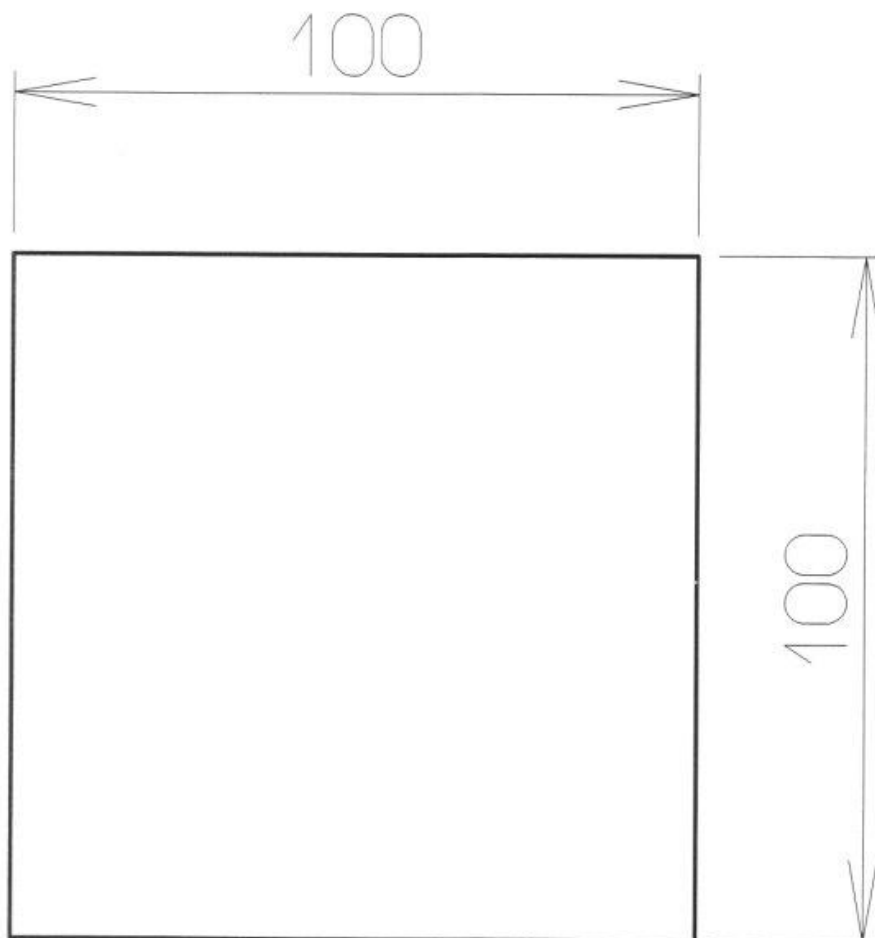
Group code: JARDA Group designation: /Parts database/Z_RUZNE/JARDA

Cerny plech 1.0332

Material code: Cerny plech 1.0332
Designation: Cerny plech 1.0332
Material No.: 1.0332

Thickness: 2.000 mm
Density: 7.85 kg/dm³

Group code: Cerny plech Group designation: /Materials database section/Cerny plech



Units: mm
Common Cut: no
Fill part: no
Rotation: 90

File name: 00155537.BPD
Date: 27.2.2013 10:07:21
Processing sequence OK: yes
No. of contours to process: 1
Cutting time: 0.09min

Dimension X: 105.00 mm
Dimension Y: 100.00 mm
Effective area: 10000 mm²
Weight: 0.157 kg

Roman

Bystronic Laser AG - Industriestr. 21 - CH 3362 Niederoenz

Wednesday, 27. February 2013

Page 1

PŘÍLOHA 3 (2/4)

Výrobní údaje – laser

BYPART

Flat part

JAR00700

10 ks

Code: JAR00700
Designation: 2 - S235 STUDENY
Technology: Laser cutting
Additional info: N, VZOREK

Created: 27.2.2013 by: Roman
altered: by:
Checked: by:

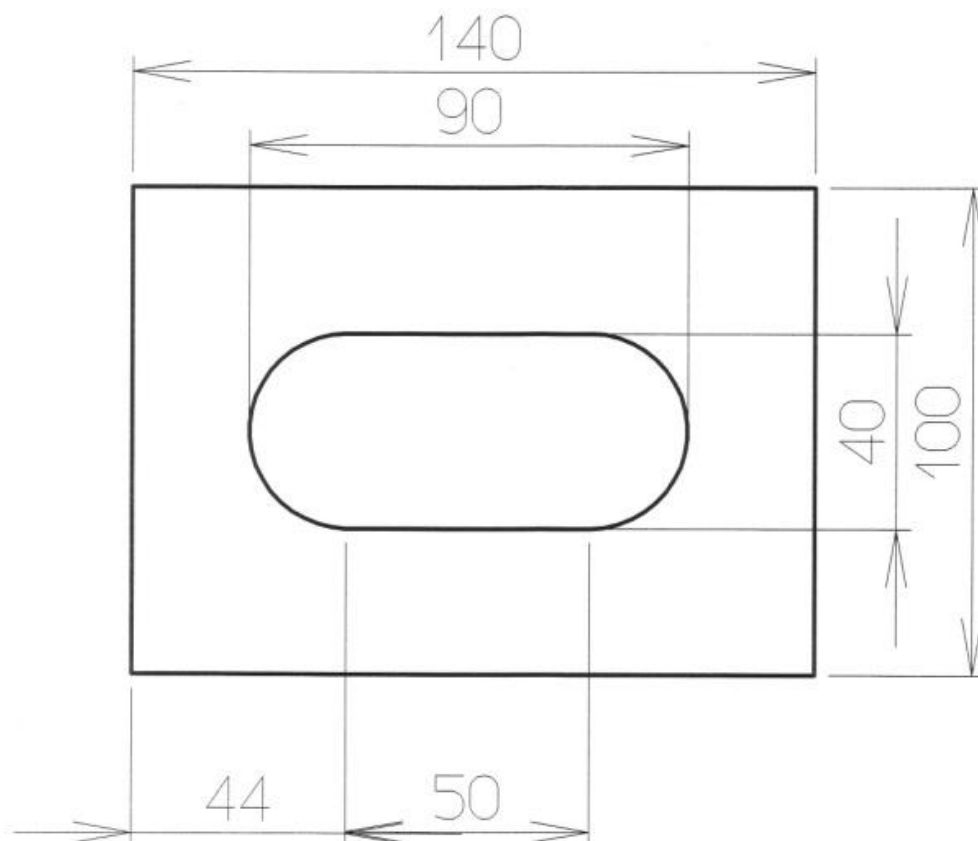
Group code: JARDA Group designation: /Parts database/Z_RUZNE/JARDA

Cerny plech 1.0332

Material code: Cerny plech 1.0332
Designation: Cerny plech 1.0332
Material No.: 1.0332

Thickness: 2.000 mm
Density: 7.85 kg/dm³

Group code: Cerny plech Group designation: /Materials database section/Cerny plech



Units: mm
Common Cut: no
Fill part: no
Rotation: 90

File name: 00155536.BPD
Date: 27.2.2013 10:06:03
Processing sequence OK: yes
No. of contours to process: 2
Cutting time: 0.16min

Dimension X: 145.00 mm
Dimension Y: 100.00 mm
Effective area: 10743 mm²
Weight: 0.169 kg

Roman

Bystronic Laser AG - Industriestr. 21 - CH 3362 Niederoenz

Wednesday, 27. February 2013

Page 1

PŘÍLOHA 3 (3/4)

Výrobní údaje – laser

BYWORK order list

2 - DC01 /S235 STUD

Job data

Job code	Material	Mach.-Parameter	Panel weight	Cutting time	Waste	Nr. of parts
98972	Cemy plech	10332020.E50	26.30 kg	0h2min31sec	87.6 %	20
Technologies						
Cutting, Correction normal, Normal piercing cut						

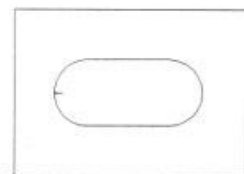
Material data

Code	Description	Article nr.	Thickness	Dimension	Uses
1340 x 1250 mm	User defined raw material		2.00mm	1340 x1250 mm	1 / 1

Plan data

Plan-Nr.	Filename	Plan-Dimension	Runs	Cutting time	Waste	Nr. of parts
1	9897201	537x 551mm	1	0h2min31sec	87.62%	20

Flat part data



Code
JAR00700

Description
2 - S235 STUDENY

Order No.

Weight
0.169kg

Area
10743.36mm²

Cutting time
0h0min9sec

Dimension
145.00 / 100.00mm

Debit / Quant
10/ 10

Cutting, Correction
normal, Normal
piercing cut

Info 1

Info 2

Info 3



Code
JAR00701

Description
2 - S235 STUDENY

Order No.

Weight
0.157kg

Area
10000.00mm²

Cutting time
0h0min5sec

Dimension
105.00 / 100.00mm

Debit / Quant
10/ 10

Cutting, Correction
normal, Normal
piercing cut

Info 1

Info 2

Info 3

PŘÍLOHA 3 (4/4)

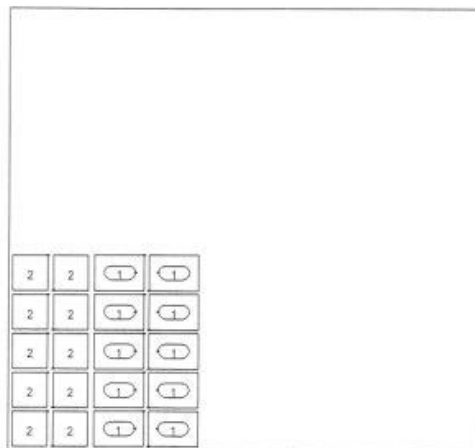
Výrobní údaje – laser

BYWORK order list

2 - DC01 /S235 STUD

Plan data

Filename	Plan Dimension	Panel Dimension	Runs	Cutting time	Waste	Nr. of parts
9897201	537x 551mm	1340x 1250mm	1	0h2min31sec	87.62%	20
Used technologies: Cutting, Correction normal, Normal piercing cut						



Flat parts data

Part	Part code	Dimension	Nr. of parts	Cutting time	Weight
1	JAR00700	145.00 x 100.00mm	10	0h0min9sec	0.17kg
2	JAR00701	105.00 x 100.00mm	10	0h0min5sec	0.16kg

FARA min. 540 x 560

PŘÍLOHA 4 (1/2)

Výrobní údaje – vysekávací stroj



NASTAVOVACÍ PLAN OBECNÉ ÚDAJE

22.02.2013
TruTops Punch
V08.04.00

STROJ:	TruPunch 5000 (S10) - TYP: 2 (3000.0 x 1600.0 mm)
SYSTEM ŘÍZENÍ:	Sin 840D VARIANTA: 1
Firma:	
NAZEV ZAKAZKY:	DIPLOMOVA PRACE
CESTA PROGRAMU NC:	/ TRUMPF.NET/ KAROSERIA/ VYKRESY/ OSTATNÍ/ JOB/ DIPLOMOVA_PRACE_1_S102_SIN_840D1.LST
NAZEV PROGRAMU:	DIPLOMOVA_PRACE_1 (DIPLOMOVA PRACE_1)
ID MATERIÁLU:	St37-2.0 (1.0038)
ID zboží na skladě:	
PŘÍREZ:	3000 x 1500 x 2 mm
HMOTNOST:	70.65 kg
STROJNÍ ČAS	0 : 01 : 38 [h:min:s]
POTŘEBA PAMETI:	8399 ZNAK
CELKOVÁ DÉLKA LASEROVÉHO ŘEZU:	0.000 mm
POČET PROGRAMOVÝCH CYKLU:	1
PROREZ:	96.27 %

VÝROBNÍ INSTRUKCE

POLOHY CHAPADEL:	5 10 16 21
DORAZOVÝ ČEP:	1 ZLEVA
POČATEČNÍ BOD:	X = 380.000 mm, Y = 140.010 mm
POZNAMKY:	

SEZNAM NASTROJU

IDENT.C.	TYP	ROZMER 1	ROZMER 2	ROZMER 3	UHĚL	POZNAMKA	WT	MT	LW	ZDVIHY	KT*	Otočný stůl
03250001	3	25.000	0.000	0.000	0.000	Ctverec 25.0mm	0	1	0	72	2	0
01400000	1	40.000	0.000	0.000	0.000	Kulat 40.0mm	0	1	0	24	2	0
04762050	4	76.200	5.000	0.000	0.000	Delic 76.2x 5.0mm	0	1	0	96	2	0

POČET OCEL-/RTC-/VELIKOST 5-KAZETY 0 / 3 / 0

* Typ kazety: 1 = Ocel, 2 = RTC, 3 = Velikost 5

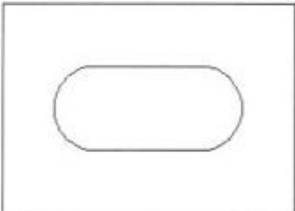
PTT	IDENT.C.	POZNAMKA	HU	DU	SOFTPUNCH
PTT-1	03250001	Ctverec 25.0mm	0.000	0.000	0
PTT-2	01400000	Kulat 40.0mm	0.000	0.000	0
PTT-3	04762050	Delic 76.2x 5.0mm	0.000	0.000	0

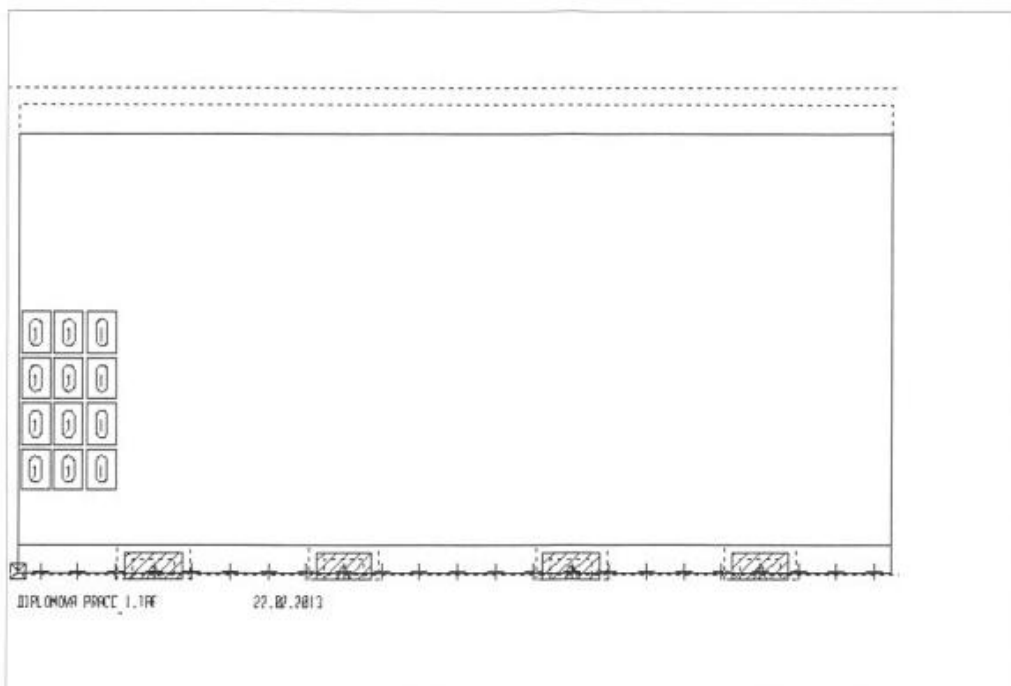
INFORMACE O JEDNOTLIVÝCH DÍLECH

CÍSLO DÍLU:	CÍSLO VYKRESU:	NAZEV GEOM:SOUBORU	POČET:
1	vzorky_strih.GEO	/ TRUMPF.NET/ Karoseria/ VYKRESY/ OSTATNÍ/ GEO/ vzorky_strih.GEO	12
NAZEV DESKY:			

PŘÍLOHA 4 (2/2)

Výrobní údaje – vysekávací stroj

INFORMACE O JEDNOTLIVÝCH DÍLECH		
	CÍSLO DÍLU:	1
	CÍSLO VYKRESU:	vzorky_strih.GEO
	NAZEV VYKRESU:	
	JMENO ZAKAZNIKA:	
	POCET:	12
	ROZMERY:	140.000 x 100.000 mm
	PLOCHA:	14000.00 mm ²
	HMOTNOST:	0.220 kg
	DOBA ZPRACOVANI:	0.13 min
	LASEROVÁ DÉLKA ŘEZÁNÍ:	0.000 mm
	NAZEV GEOM.SOUBORU	/ TRUMPF.NET/ Karoseria/ VYKRESY/ OSTATNI/ GEO/ vzorky_strih.GEO
	ČÍSLO KONTEJNERU:	



PŘÍLOHA 5

Výroba vzorků



Vysekávací stroj



Tabulové nůžky

PŘÍLOHA 6 (1/2)

Materiálové listy

1.0330 Číselné označení	Nelegovaná jakostní hlubokotažná ocel	DC01³⁾ Značka
-----------------------------------	--	------------------------------------

Chemické složení [hm. %]⁴⁾

C	Si	Mn	P	S
max 0,12	—	max 0,60	max 0,045	max 0,045

Normy EN

- [1] 10130 + A1
- [2] 10139
- [3] 10152
- [4] 10271

Mechanické vlastnosti¹⁾²⁾

Norma EN	[1]	[3]	[4]
Rozměr t [mm] ⁵⁾	0,35–3,00		
Stav	—	+ZE	+ZN
Mez kluzu R_{el} nebo $R_{p0,2}$ [MPa] min	max 280	max 280	max 280
Mez pevnosti R_m [MPa]	270–410	270–410	270–410
Tažnost A_{90} [%] min	28	28	28
Součinitel plastické anizotropie r_{90} min	—	—	—
Exponent deformačního zpevnění n_{90} min	—	—	—

- 1) Hodnoty, s výjimkou normy [2], platí pouze pro výrobky převálcované za studena.
2) U tlouštěk od 0,5 do 0,7 mm se dovoluje min. hodnota tažnosti o 2 % nižší a max. hodnota meze kluzu o 20 MPa vyšší.
U tlouštěk < 0,5 mm se dovoluje min. hodnota tažnosti o 4 % nižší a max. hodnota meze kluzu o 40 MPa vyšší.
3) Doba bez vzniku deformačních čar 3 měsíce, doporučuje se zpracovat do 6 týdnů od předání k expedici (platí pouze pro jakost povrchu B). Maximální hodnota meze kluzu platí pouze po dobu 8 dnů. Pro konstrukční účely lze počítat s min. hodnotou meze kluzu 140 MPa.
4) Ocel může být dodávána legovaná (např. B nebo Ti), pokud nebylo při objednávání dohodnuto jinak.
5) U povlakovaných výrobků se tloušťkou rozumí celková tloušťka po povlakování.

PŘÍLOHA 7

Atest materiálu

22.03.2012 08:42:05
C-2012-2897

TECHNOLOGICKÉ CENTRUM A.S.
KULKOVA 14
BRNO
614 00

12NP 149

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Feron, a.s. k zakázce č. 25653, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 49201 na množství 2740 KG. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1

U.S. Steel Košice s.r.o. Code: 728NKEW2/06C
Vstupný areál U. S. Steel Works Order No: XD231128
044 54 Košice Advice No: 12/417099 01
SLOVAK REPUBLIC Your order: 494475/U

Feron, a.s.

Polygrafická 3
108 33 PRAHA 10
Czech republic

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 12/417099 01

Desc. of goods: COLD ROLLED STEEL SHEETS

Size:

2,000 x 1500,0 x 3000,0 mm
EN 10131/06

Standard: EN 10130/06

Quality: DC01 Am

Spec. No: 60113802

Net Weight: 16 422 kg

Unit No	Coil No	Heat	Unit No	Coil No	Heat
492013201	4920132	49201	492013204	4920132	49201
492013202	4920132	49201	492013205	4920132	49201
492013203	4920132	49201	492013206	4920132	49201

MECHANICAL TEST RESULTS

		Min. / Max.	Coil No 4920132
Yield point-ReL(1)	(MPa)	/250	194
Tensile streng.-Rm(1)	(MPa)	270/410	325
Elongation A80(1)	(%)	28,0/	41,5
Direction: (1) -transversal;			

CHEMICAL COMPOSITION, %

	Min. / Max.	Heat No 49201		Min. / Max.	Heat No 49201
C	/	0,04	Mn	/	0,34
Si	/	0,01	P	/	0,008
S	/	0,013			

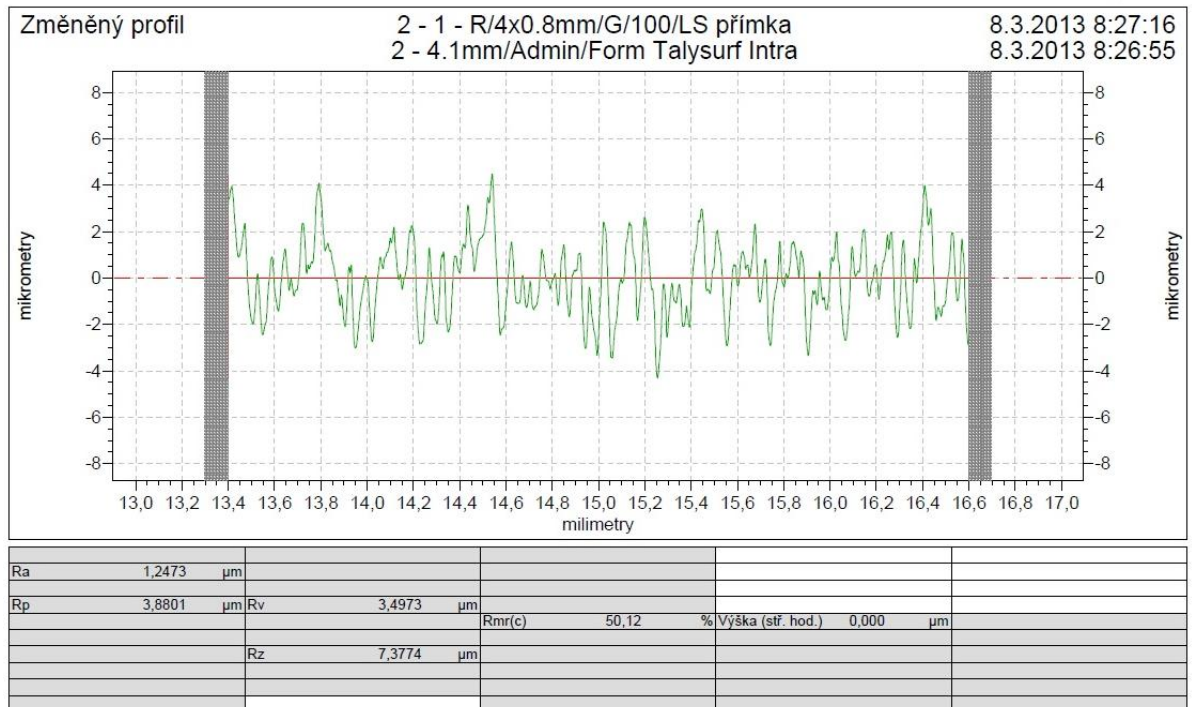
On the basis of the IAEA recommendation allowed limit of weight-based activity of a heat sample amounts up to 300 Bq/kg.
The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg.
Košice: 12.03.2012, 7:30:39 THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS.
JOSEF CERVENAK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE
e-mail: jcervenak@ek.uss.com, tel.: +421-55-6737464

109

Last Page: 1
P-USM/0063-04/10-01-12

U. S. Steel Košice, s.r.o.
Vstupný areál U. S. STEEL
Odbor Analýzy kvality a špecifikácie
Uvoľňovanie výrobkov a Hutné atesty
044 54 Košice

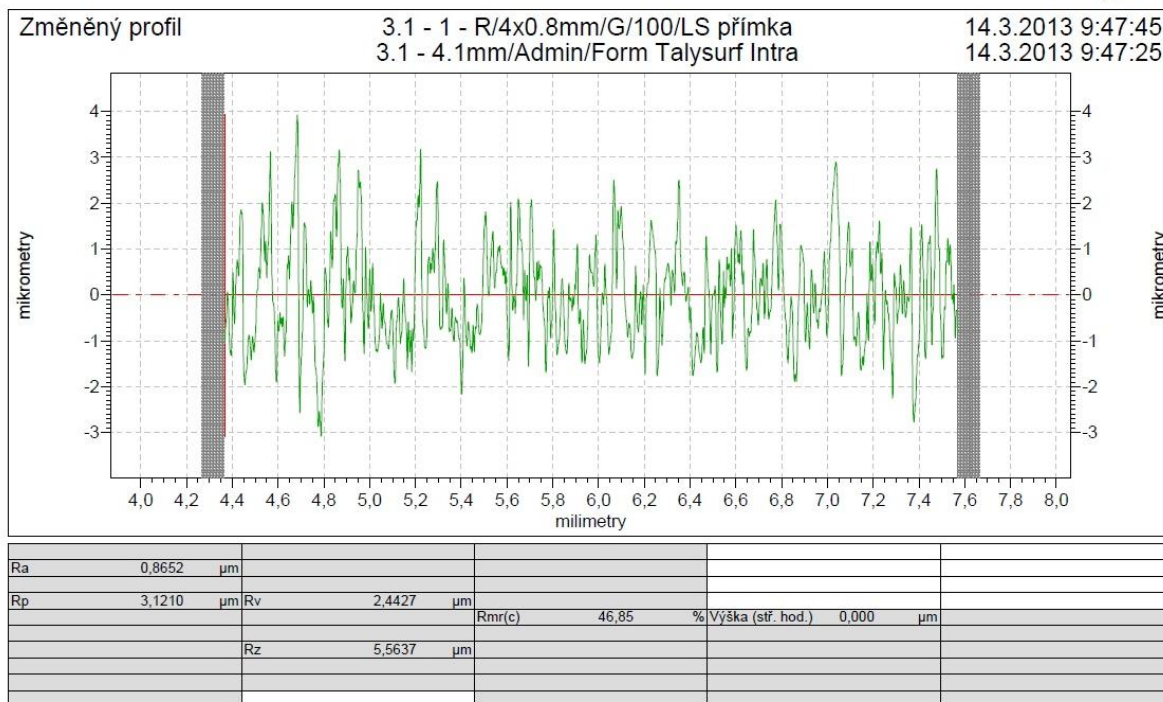
Struktura povrchu – laser



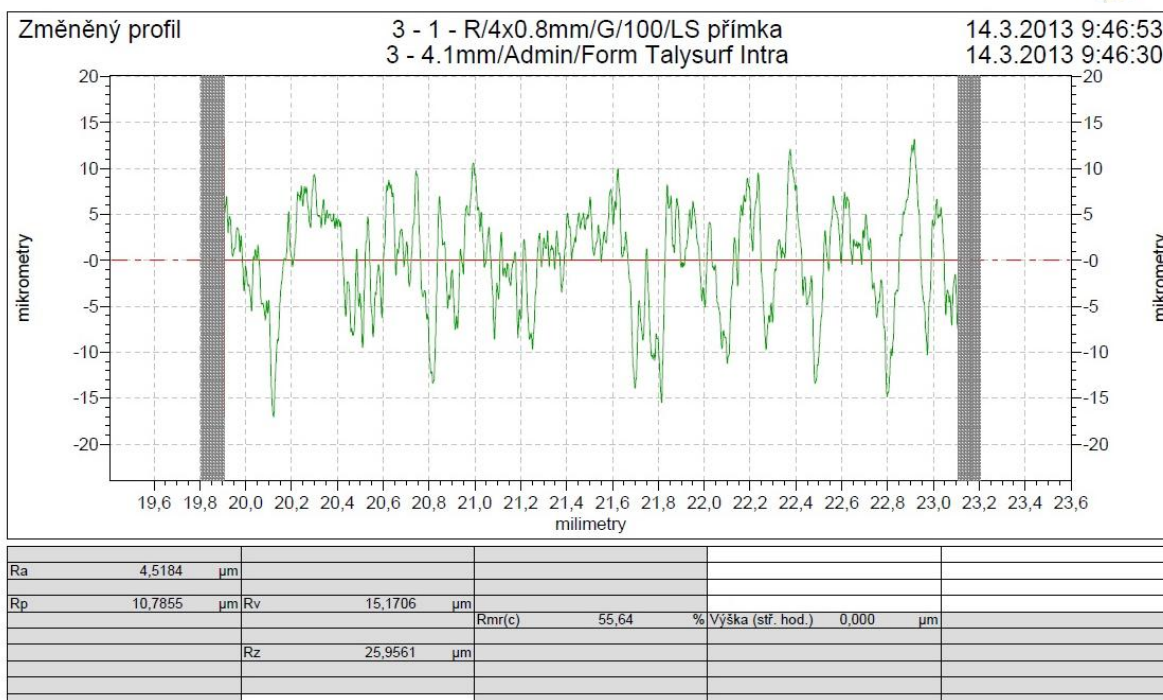
PŘÍLOHA 9

Struktura povrchu – tabulové nůžky

5.12.6.29



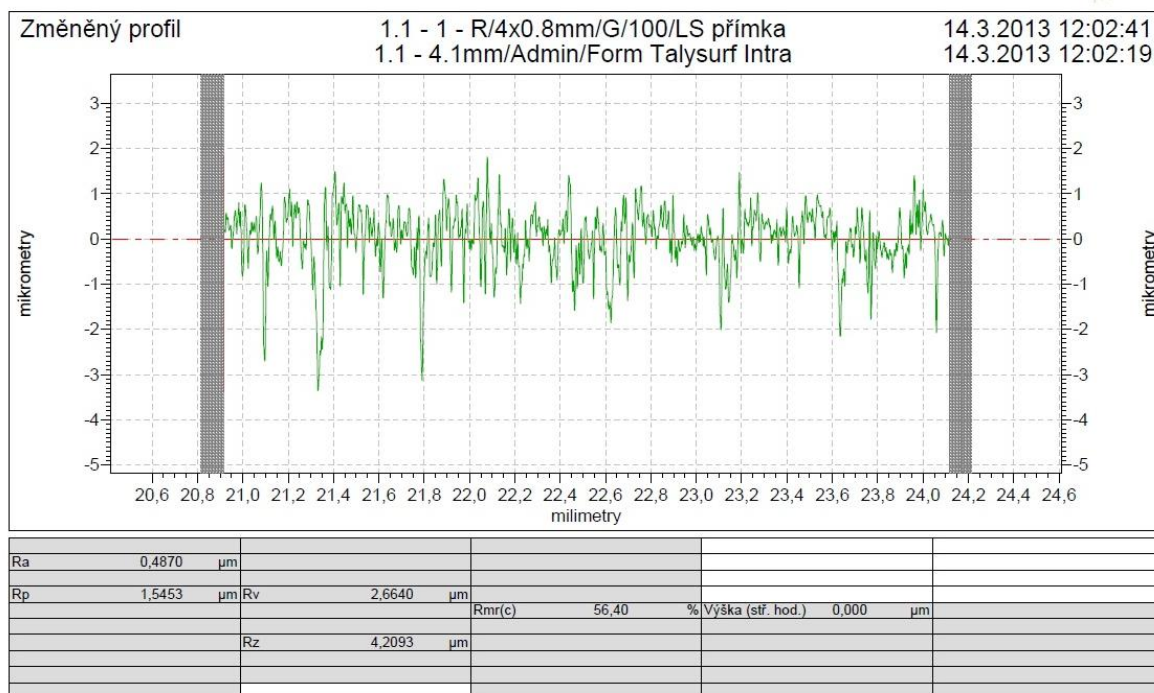
5.12.6.29



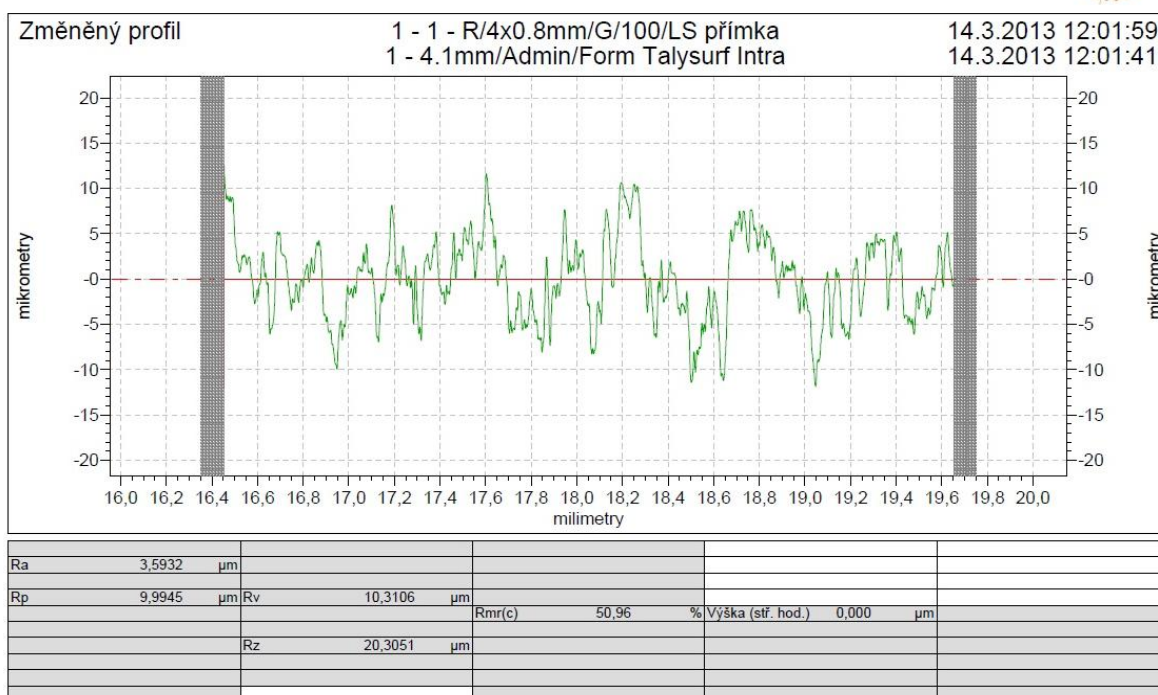
PŘÍLOHA 10

Struktura povrchu – vysekávací stroj

5.12.6.29



5.12.6.29



PŘÍLOHA 11

Měření vzorků



PŘÍLOHA 12

Struktura povrchu laser/vysekávací stroj

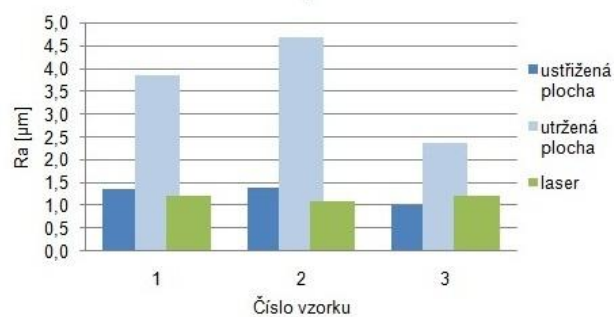
A



B



C



D

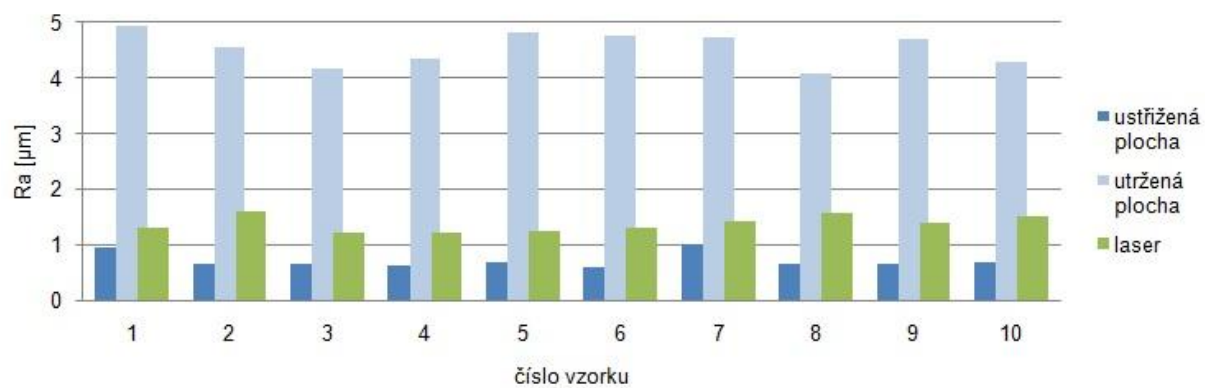


A. R_a laser/vysekávací stroj, B. R_z laser/vysekávací stroj, C. R_a drážky laser/vysekávací stroj, D. R_z drážky laser/vysekávací stroj.

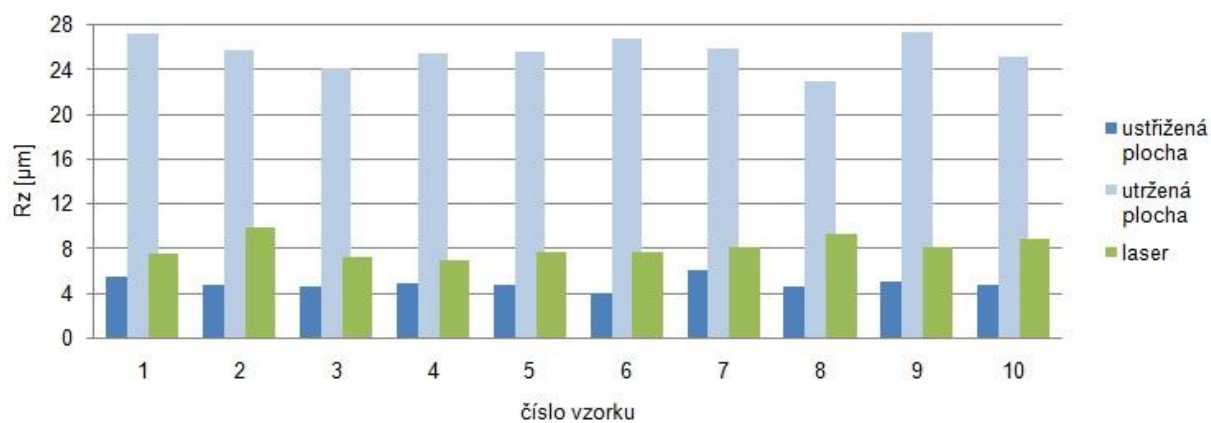
PŘÍLOHA 13

Struktura povrchu laser/tabulové nůžky

A



B

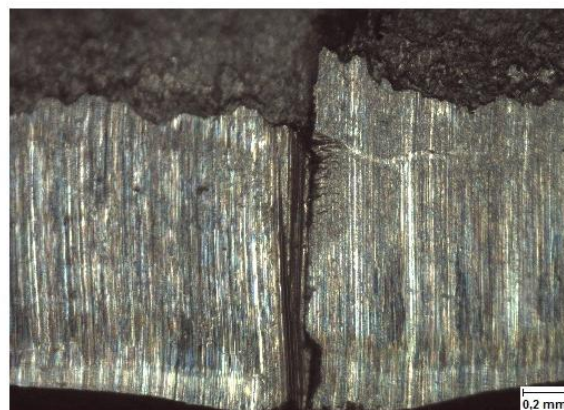


A. R_a laser/tabulové nůžky, B. R_z laser/tabulové nůžky.

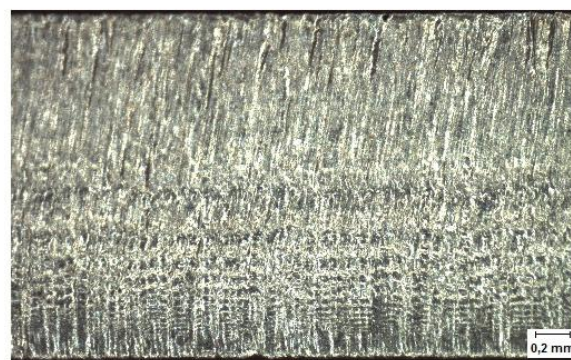
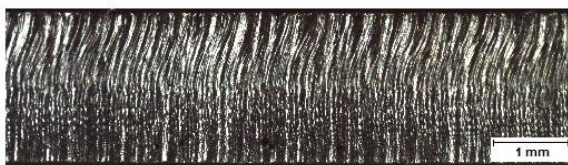
PŘÍLOHA 14

Fotodokumentace dělicí plochy

VYSEKÁVACÍ STROJ



LASER



TABULOVÉ NŮŽKY

