



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM A LASEREM

A COMPARISON OF THE WATER JET CUTTING AND LASER
TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub CHAMRAD

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Chamrad

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM A LASEREM

v anglickém jazyce:

A COMPARISON OF THE WATER JET CUTTING AND LASER TECHNOLOGIES

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Srovnání nekonvenčních paprskových technologií obrábění zejména z hlediska úběru materiálů a dosahované kvality obrobění.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

Popis technologie řezání vodním paprskem

Popis technologie řezání laserem

Technologicko-ekonomické vyhodnocení

Závěr

Seznam odborné literatury:

1. MAŇKOVÁ, I. Progresívne technologie. Vienaľa Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430.3.
2. KUBÁTOVÁ, J., LUKEŠ, I. Laserové technologie opracování kovových materiálů. 1988. 36s. ISSN 0322-8525.
3. Řezání laserem [online]. [cit. 2013-11-11]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.kovostanek.cz/rezani-laserem>>.
4. SOCHOR, V. Lasery a koherentní svazky. 1.vyd Praha: nakladatelství Československé akademie věd, 1990. 196s. ISBN 80-200-354-1.
5. HORÁČEK, Lukáš. Využití nekonvenčních paprskových technologií (LASER/vodní paprsek) ve strojírenství: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69s. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
6. STEINER, Martin. Současný stav a budoucnost nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách průmyslu České republiky: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 85 s., příloh 0. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.
7. MAŘÍKOVÁ, Petra. 3D abrazivní vodní paprsek. Brno, 2013. 91s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění, Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 14.1.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce bude zaměřena, jak už její název napovídá, na seznámení s problematikou nekonvenčních technologií a to s řezáním vodním paprskem a laserem.

Úvodní kapitoly se skládají z rešerše na již zmíněné metody obrábění. V praktické části, tvořené ve spolupráci s firmou Honeywell, bude zkoumána efektivita stroje na řezání laserem, který je starší, a nového stroje na řezání vodním paprskem.

Klíčová slova

Nekonvenční metody obrábění, vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, laser

ABSTRACT

The thesis is focused on the introduction of non-conventional technology into the manufacturing workplace, mainly water jet and laser cutting.

The first two chapters are research about water jet machining and laser. A practical part of my thesis was carried out with the assistance of Honeywell and involved comparing the efficiency of an older laser cutting machine against and new one for water jet machining.

Key words

Non-conventional machining methods, water jet, abrasive water jet, laser

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHAMRAD, J. *POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM A LASEREM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 61 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM A LASEREM** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jakub CHAMRAD

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu této bakalářské práce panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování práce.

Dále bych rád poděkoval zástupcům společnosti Honeywell, zejména panu Janu Zlámalovi za pomoc a vstřícnost při zhotovování součástí a vyhodnocování výsledků, dále panu Janu Michálkovi a Petru Pavlovi za pomoc při vyřezávání vzorků metodou vodního paprsku.

Rád bych poděkoval panu Ing. Josefu Knoblochovi Msc. za umožnění a dohled při měření rozměrů pomocí souřadnicového NC stroje.

Chtěl bych také vyjádřit díky lidem, kteří mi pomohli při vyhodnocování struktury materiálu, především panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D., paní Jiřině Houdkové a paní Ing. Zině Pavlouškové Ph.D.

Nakonec bych rád poděkoval své rodině za psychickou i finanční podporu, díky které mohu studovat již třetím rokem na VUT v Brně.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1 Vodní paprsek.....	11
1.1 Historický vývoj vodního paprsku.....	11
1.2 Princip metody vodního paprsku	12
1.3 Stroj a nástroj pro řezání vodním paprsek.....	14
1.3.1 Stroj a jeho části.....	14
1.3.2 Nástroj pro řezání vodním paprskem.....	16
1.4 Různé typy vodního paprsku.....	18
1.5 Použití vodního paprsku.....	20
1.5.1 Použití ve strojírenství	20
1.5.2 Použití v dalších odvětvích	20
1.6 Výhody a nevýhody technologie vodního paprsku.....	21
2 Laser.....	22
2.1 Historický vývoj laseru	22
2.2 Princip technologie laseru	23
2.3 Nástroj a stroj pro řezání laserem.....	25
2.4 Klasifikace laserů	27
2.4.1 Typ aktivního prostředí.....	27
2.4.2 Vysílaná vlnová délka.....	30
2.4.3 Režim laserového svazku.....	30
2.4.4 Typ buzení	31
2.4.5 Výkon.....	31
2.5 Použití laseru.....	32
2.5.1 Použití laseru ve strojírenství.....	32
2.5.2 Použití laseru v dalších odvětvích	35
2.6 Výhody a nevýhody technologie laseru	36
3 Praktické zkoušky řezání za různých podmínek.....	37
3.1 Řezání vodním paprskem.....	40
3.1.1 Předpoklady	40
3.1.2 Proces zhotovování vzorků.....	40
3.1.3 Dosažené výsledky	41

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	9
---------	------------------	------	---

3.2	Řezání laserem	43
3.2.1	Předpoklady	43
3.2.2	Proces zhotovování vzorků.....	43
3.2.3	Dosažené výsledky.....	45
4	zhodnocení výsledků a porovnání metod.....	48
4.1	Zhodnocení výsledků	48
4.1.1	Vodní paprsek	48
4.1.2	Laser	51
4.2	Porovnání metod	54
ZÁVĚR.....		56
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ		57
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....		59
Seznam použitých zkratek		59
Seznam použitých symbolů		60
SEZNAM PŘÍLOH		61

ÚVOD

Synonyma slova konvenční jsou například obvyklý, běžný a dohodnutý. Nekonvenční metody obrábění tedy budou neobvyklé metody, které využíváme při obrábění a mnoha dalších procesech.

Nekonvenční metody začaly vznikat ruku v ruce s novými konstrukčními řešeními, které se vyznačovaly tvarovou složitostí. Tyto tvarové složitosti vyžadovaly lepší materiály, a tak se zvyšoval i podíl těžkoobrobitelných materiálů, kovových i nekovových. Pro co nejproduktivnější způsob výroby se tedy začaly zavádět nové metody, které se značně lišily od klasických metod.

Jednotlivé nekonvenční metody se od sebe liší zejména fyzikálními účinky, kterými je obráběn materiál. Tyto účinky mohou být elektrotepelné, elektrochemické, chemické a mechanické.

Nekonvenční metody s principem elektrotepelným se vyznačují tím, že využívají teplo a tím řízeně odtavují materiál. Principem elektrochemického obrábění je jev zvaný elektrolýza. Podstatou chemických nekonvenčních metod obrábění je využití chemických reakcí pro obrábění. Mechanické, nebo také abrazivní metody obrábění pracují pomocí abrazivních nebo erozivních účinků některých látek [1].

V této bakalářské práci, která vznikala ve spolupráci s nadnárodní společností Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., budu porovnávat elektrotepelné řezání paprskem laseru a mechanické řezání vodním paprskem.

Společnost Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o. sídlí v Hlubočkách – Mariánském Údolí. Hlavní sídlo společnosti Honeywell je ve Spojených státech, konkrétně ve městě Phoenix v Arizoně. Tato společnost se zabývá výrobou a opravou plechových žáruvzdorných dílů leteckých turbínových motorů z nerezavějících ocelí a speciálních slitin. Komponenty vyrobené ve firmě Honeywell je možné najít v dopravních letadlech typu Boeing a Airbus, v helikoptérách, v obchodních letadlech typu Dassault Falcon, Cezena Citation a v dalších letadlech [19].

Na základě požadavků společnosti Honeywell je bakalářská práce rozšířena i o praktickou část, ve které byla zkoumána a porovnáвана efektivita řezání laserem na starším stroji a řezání vodním paprskem na novém stroji. Zkoumání a porovnávání bylo na základě výroby pro účel této práce navržených součástí za různých parametrů posuvové rychlosti, výkonu, či programu obrábění.

Na základě zkoumání došlo k porovnání nejen laseru a vodního paprsku mezi sebou, ale také k porovnání různých konfigurací nastavení, což pomůže technologům při optimalizaci výrobního postupu.



Obr. 1 Honeywell Aerospace Olomouc.

1 VODNÍ PAPERSEK

Vodní paprsek je jednou z nekonvenčních metod obrábění. Jedná se o velmi progresivní technologii s velkou oblastí využití. Technologie řezání vodním paprskem může být použita za přístupu abraziva (AWJ – Abrasive Water Jet) nebo jako řezání čistým vodním paprskem (WJM – Water Jet Machining).

1.1 Historický vývoj vodního paprsku

Již po tisíciletí formuje voda svým tokem reliéf zemského povrchu (např. Grand Canyon vytvořila svým tokem řeka Colorado nebo v naší domovině vytvořila řeka Mumlava nedaleko Harrachova Obří hrnce). Tento fakt byl lidem znám velmi dlouho, pro svůj užitek jej lidé začali využívat až v druhé polovině 19. století. Tehdy se začala ve Spojených státech amerických využívat voda vháněná pod tlakem do úzké trysky. Účinků tohoto nástroje se využívalo k odstraňování hornin [6].

V 30. letech 20. století byla technologie využívající vodu v úzké trysce testována v Rusku [9].

Doktor Norman Franz v 60. letech vymyslel způsob, jak dosáhnout vyšších tlaků při vhánění vody do trysky. Docílil toho tak, že pouštěl těžká závaží na sloupce vody, čímž vyvinul ve vodě vysoký tlak. Svůj stroj používal především k řezání dřeva a lepenky [9], [17].

V 70. letech minulého století se vodní paprsek používal k dělení plastů a dřeva. V tomto desetiletí byl také vynalezen abrazivní vodní paprsek. Díky tomuto vylepšení byl vodní paprsek použitelný k řezání tvrdých materiálů (např. sklo, beton, ocel). Tlak, kterého bylo při řezání dosahováno, měl hodnotu 380 MPa [9].

Největší měrou se o začlenění vodního paprsku do průmyslu zasloužila NASA. Národní úřad pro letectví a kosmonautiku potřeboval nařezat několik desítek tisíc keramických desek, které měly být použity jako jakýsi plášť, který izoluje raketoplán před teplotami kolem 1260 °C. Keramika byla vhodná pro svou špatnou tepelnou vodivost, proto vhodným řešením bylo řezání metodou abrazivního vodního paprsku [8].

Od roku 1980 začíná být vodní paprsek používán v průmyslu. V 90. letech se začal vodní paprsek používat také v automobilovém průmyslu. Na konci 20. století tlak dosahoval až 670 MPa [9], [16].

V dnešní době se tato technologie používá nejen k obrábění, ale také k vyřezávání, soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů, či k opracování kovových i nekovových materiálů. V současnosti se používá především abrazivní vodní paprsek. Jako abrazivo může být mnoho různých látek o různé hrubosti. Tyto parametry se volí podle požadavků výroby [13], [14].

1.2 Princip metody vodního paprsku

Princip řezání touto nekonvenční metodou spočívá ve využití kinetické energie vysokotlakého a vysokorychlostního vodního paprsku. Při použití abraziva se kombinuje kinetická energie kapaliny a kinetická energie abrazivních částic.

Kapalina bez či s abrazivem, je usměrňována do úzkého paprsku, čímž se zlepšují řezné účinky. Tento paprsek prochází tryskou řezací hlavy a proniká do obrobku. Důsledkem vzájemného tření s materiálem postupně ztrácí svou kinetickou energii a vychyluje se z původního směru. Navíc dochází ke zhoršování jakosti povrchu obrobku. Oběma nepříznivým vlivům se dá předejít oscilačním řezáním. Oscilační řezání nemá konstantní rychlost, její velikost se s určitou frekvencí mění [15].

Dělení se tedy provádí jako obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Zdrojem tlaku jsou speciální tlaková čerpadla, která mohou mít příkon 9 – 75 kW a průtok vody 1,2 – 7,5 dm³.min⁻¹. Pracovní tlak se nejčastěji pohybuje mezi 800 a 4100 bary. Paprsek vzniká v řezací hlavě, která je zakončena tryskou například ze safíru [12].

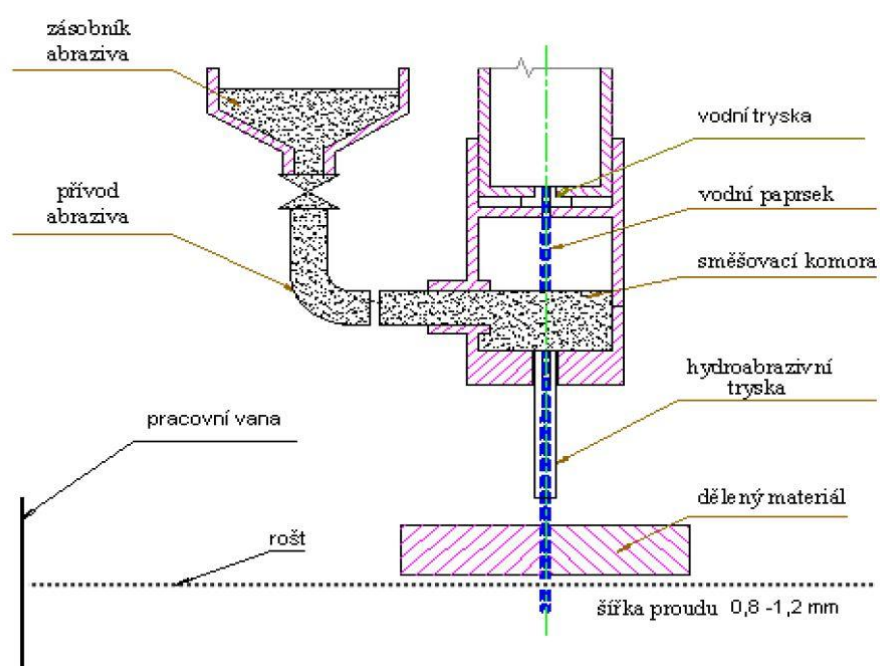
Kvalita řezu je ovlivněna těmito faktory:

- výtokovým průměrem trysky;
- tlakem kapaliny;
- rychlostí proudění kapaliny;
- vzdáleností ústí trysky od obrobku;
- úhlem sklonu vodního paprsku;
- u abrazivního paprsku navíc druhem abraziva [15].

Tento k životnímu prostředí šetrný způsob obrábění je řízen NC nebo CNC systémem. Dále se skládá z hydraulické jednotky s multiplikátorem (násobičem tlaku), různých filtrů, ventilů, potrubí pro rozvod vody, systému dávkování abraziva, řezací hlavy, zařízení pro pohyb řezací hlavy, řezacího roštu pro obrobek, lapače nečistot a systému pro úpravu a recyklaci vody (viz obr. 2). Tyto části jsou dále popsány v následující kapitole [40].

U abrazivního vodního paprsku je v kapalině kromě abraziva obsaženo určité procento aditiv. Aditiva slouží k vytvoření souvislého, vysoce účinného paprsku, který se při styku s obráběným materiálem netříští, zamezují nadměrné turbulenci v paprsku. Jako aditiva slouží různé polymery s lineárními molekulami, například polyakrylamid (PAA) a polyetyloxid (PEO) [13].

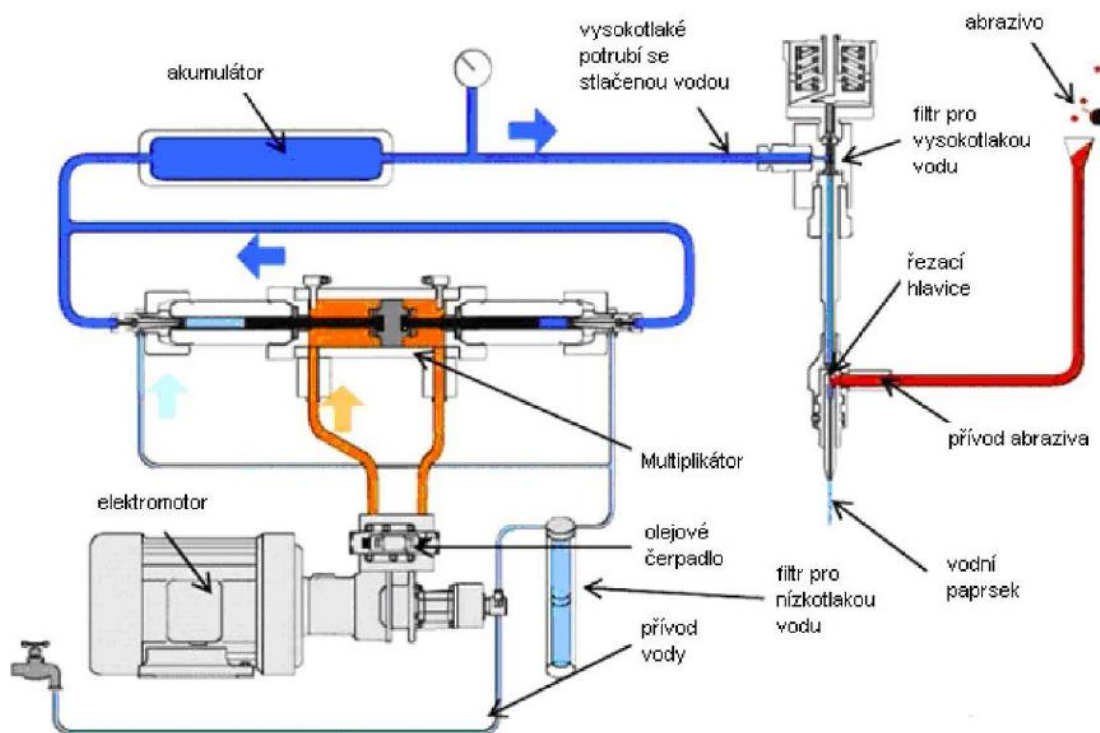
Důležitost systému pro úpravu a recyklaci vody je vysoká. Z velké části ovlivňuje životnost trysky, zabraňuje zanášení otvoru trysky, a životnost potrubí pro rozvod vody. Ovlivňuje také kvalitu a rychlost řezu. Tvrdost vody je především způsobena koncentrací hořčíku a vápníku. Pro změkčování vody se používá zařízení, které je schopno provádět iontovou výměnu. Čištění následuje po změkčování vody, je to proces úpravy vody, provádí se například zpětnou osmózou, což je tlačení vody vysokým tlakem přes polopropustnou membránu, která zachytí až 98 % nečistot. Kapalina, která se používá ve stroji, musí být deionizovaná a demineralizovaná. Neměla by tedy obsahovat minerály a ionty neodstraněné při procesu změkčování, které otvor trysky zanášejí [14], [15].



Obr. 2 Schéma řezání vodním paprskem [12].

1.3 Stroj a nástroj pro řezání vodním paprskem

Stroje pro obrábění vodním paprskem jsou velmi robustní, skládají se z mnoha částí (viz obr. 3). Na nástroji je nejvíce závislá kvalita řezu, proto je potřeba pravidelně kontrolovat jakost nástroje a řezu.



Obr. 3 Schéma stroje pro řezání vodním paprskem [16].

1.3.1 Stroj a jeho části

Generátor vysokého tlaku

Podle potřebného tlaku jsou dostupné dva typy generátorů. Zařízení s multiplikátorem se používá ke generování tlaku až 650 MPa, triplexová pístová čerpadla zvládnou vytvořit tlak okolo 300 MPa [16].

Multiplikátor

Princip generování vysokého tlaku spočívá v rozdílné velikosti dvou činných ploch. Na jednu z těchto ploch je přes elektronicky řízený rozvaděč přiváděn olej, tím dochází k posunu pístu, do té doby než se nesepe koncový spínač. Jakmile k sepnutí dojde, rozvaděč přepne tok oleje na druhou činnou plochu, což vyvolá posun pístu opačným směrem. Při stlačování kapaliny na jedné straně multiplikátoru, je na druhé straně čistá filtrovaná voda nasávána [16].

Jestliže olej působí na činnou plochu o obsahu S tlakem p , pak tlak p' musí být tolikrát větší, kolikrát je menší činná plocha S' . Tuto rovnost (1) popsal již Pascal v 17. století našeho letopočtu. Bohužel tento vztah má pouze teoretický podklad. V praxi dochází ke ztrátám (např. ztráty v netěsnostech, ztráty hydrodynamické), proto se členy na pravé straně rovnice (1) musí vynásobit vhodným koeficientem (η_M) (2) [16].

$$p' = \frac{S - S'}{S'} p \text{ [Pa]} \quad (1)$$

$$p' = \frac{S - S'}{S'} p \cdot \eta_M \text{ [Pa]} \quad (2)$$

V tomto systému dochází ke značným tlakovým rázům (kvůli stlačitelnosti vody se přibližně prvních 15% spotřebuje na kompresi vody, aniž by se z toho nějaká voda dostala do systému). Proto je kapalina z multiplikátoru vedena do akumulátoru tlakových rázů [16].

Pístová čerpadla

Pístová, nebo též plunžrová, čerpadla mají dvě hlavní části, píst a válec. Píst koná přímočaře vratný pohyb ve válci, ve kterém jsou sací a výtlačné ventily [34].

Při sání se píst posouvá směrem k dolní úvratí, přes otevřený sací ventil se do válce nasává voda. Při reverzním pohybu pístu a uzavření ventilů stoupá tlak ve válci, po otevření výtlačných ventilů je voda pod vysokým tlakem hnána do vysokotlakého potrubí [34].

Používají se vždy pístová čerpadla s minimálně dvěma válci, které pracují v různých frekvencích. Díky tomu nemusíme používat akumulátor tlakových rázů [34].

Filtr

Přes filtr prochází kapalina dříve, než se dostane do generátoru vysokého tlaku. Filtr zachytává nečistoty velikosti řádově v mikrometrech. Nečistoty ve vodě snižují životnost trysky, proto by měla být filtrace co nejdokonalejší. Kromě trysky snižuje přítomnost nečistot životnost i dalším částem stroje (např. těsnění a další) [9].

Akumulátor

Vysokotlaká nádoba, která pohlcuje rázy kapaliny. Úlohou akumulátoru, nebo též tlumiče pulzů, je udržovat konstantní rychlost a stejný tlak proudu v systému. Jedná se o dutou nádobu určitého objemu, ve které se nachází kapalina, ta je stlačena na požadovaný tlak. Bez použití akumulátoru by tedy docházelo k nepravidelným dodávkám kapaliny, což by zapříčinilo tvorbu rýh na povrchu řezaného materiálu [13], [17].

Ventily

Díky ventilům (jednocestným, dvojcestným) můžeme regulovat či úplně přerušit průtok kapaliny [13].

Rozvodné elementy

Mezi rozvodné elementy řadíme různé hadice a potrubí, které mají za úkol přenos kapaliny strojem až k nástroji. Materiál je nejčastěji vysokopevnostní korozivzdorná ocel. Tyto elementy musí být uzpůsobeny k flexibilnímu pohybu řezací hlavy. Pro snadnost výměny jsou normalizovány a standardizovány [3], [21].

Výstupní dýzy

Přímo ovlivňují vlastnosti vodního paprsku a tím pádem i řezu [16].

Lapač vody

Nádoba, která je umístěna pod obrobkem, slouží k zachytávání vodního paprsku a tlumení hluku. Lapač vody by měl být dostatečně hluboký, aby nedošlo ke kontaktu vodního paprsku a jeho dna. Rozeznáváme dva typy lapačů, stacionární, které tvoří součást stacionárních řezacích strojů a mobilní, které se používají při řezání vodním paprskem pomocí robotické ruky [13], [17].

1.3.2 Nástroj pro řezání vodním paprskem

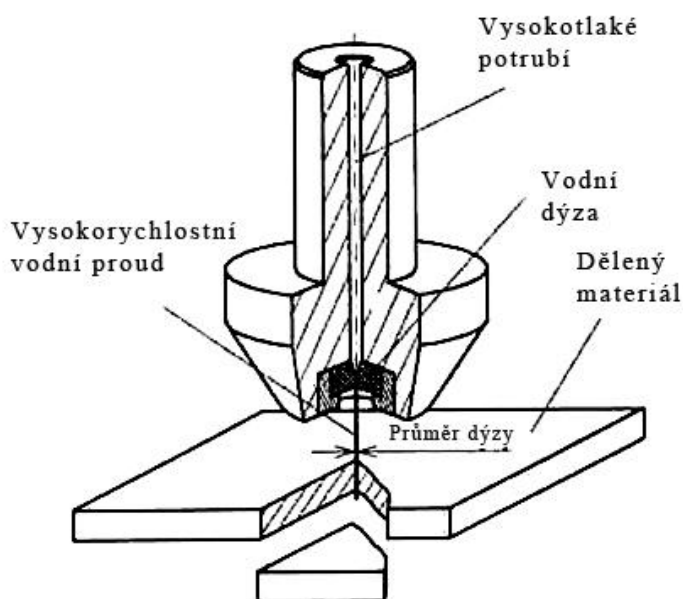
Nástroj pro řezání vodním paprskem se nazývá tryska. Na trysce je závislá kvalita řezu, je to tedy velmi důležitá část stroje. Trysky jsou jiné pro řezání čistým vodním paprskem a pro řezání vodním paprskem s přídavkem abraziva.

Kapalina o vysokém tlaku není přiváděna přímo do trysky, ale do řezné hlavy. Podle typu obrábění rozlišujeme řezací hlavy pro čistý vodní paprsek a řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsek s radiálním nebo axiálním přívodem abraziva (viz obr 7). Řezací hlava je osazena vodní tryskou [13].

Tryska pro řezání čistým vodním paprskem

Vnitřní části trysky pro řezání vodním paprskem se vyrábějí ze slinutých karbidů, korundu, safíru nebo diamantu. Diamantová tryska má několikanásobně delší životnost, její výhodou je, že po zanesení trysky nečistotami se může vyčistit a používat znovu. Safírová tryska má životnost přibližně 200 hodin a má asi desetinovou cenu než diamantová [13].

Jelikož kapalina, při výtoku z trysky, může dosahovat rychlostí přes 1000 m.s^{-1} , je kladen velký důraz na souosost a drsnost vnitřního povrchu. Při nedodržení předepsaných hodnot těchto parametrů je negativně ovlivněna kvalita paprsku a tedy i celého procesu [16].



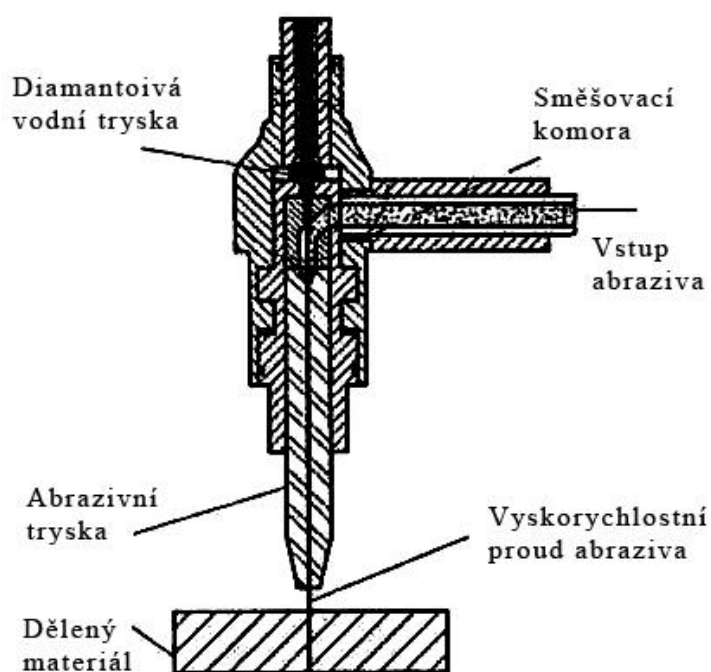
Obr. 4 Tryska pro řezání vodním paprskem [13].

Tryska pro řezání abrazivním vodním paprskem

Tlak čistého vodního paprsku pro řezání těžkoobrobitelných kovů musí dosahovat až 1000 MPa, příkon by musel být také několikanásobně vyšší. Proto je výhodnější tyto materiály řezat abrazivním vodním paprskem.

Do proudu vody se ve směšovací komoře přidává jemné brusivo (např. granát, olivín, karbid křemíku, korundový prášek, ocelová drť a další), které zlepšuje řeznou schopnost. Rozlišujeme dva základní druhy přívodu abraziva. Radiální přívod abraziva se provádí tryskou, kterou je možno použít i pro čistý vodní paprsek. Vyrobit ji je jednodušší, než trysku pro axiální přívod abraziva. Ta je naopak lepší v tom, že v ní dochází k lepšímu směšování brusiva s vodou a tím pádem k menšímu opotřebení trysky [13].

Trysky pro abrazivní vodní paprsek musí být dobře odolné vůči otěru. Jsou nejčastěji vyráběny práškovou metalurgií z kubického nitridu bóru, řezné keramiky nebo z karbidu wolframu s iontovou implantací. Tyto materiály jsou pevné a otěruvzdorné, což je zapotřebí především u otvoru trysky. Seběmenší změna otvoru znamená nežádoucí řezné nepřesnosti [16].



Obr. 5 Tryska pro řezání abrazivním vodním paprskem [13].

1.4 Různé typy vodního paprsku

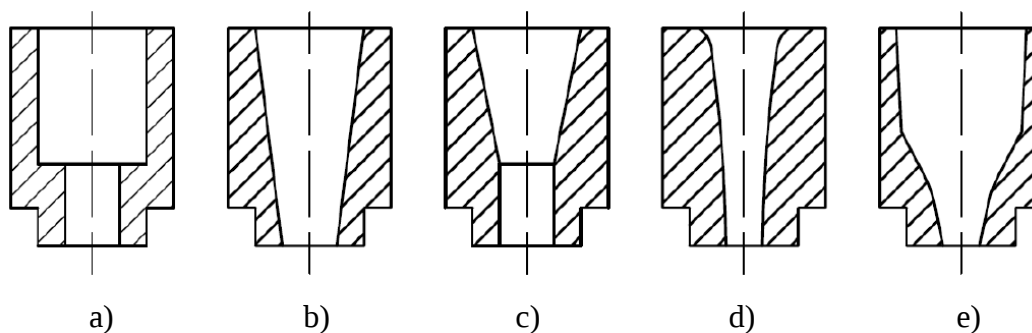
Vodní paprsek nemá tak specifické dělení jako laser. Přesto jej můžeme dělit podle určitých vlastností.

Nejzákladnějším dělením je podle použití či nepoužití abraziva.

Vodní paprsek používá při řezání čistou kapalinu.

Abrazivní vodní paprsek využívá při odebírání materiálu paprsku kapaliny s abrazivem.

Tvar vodních trysek



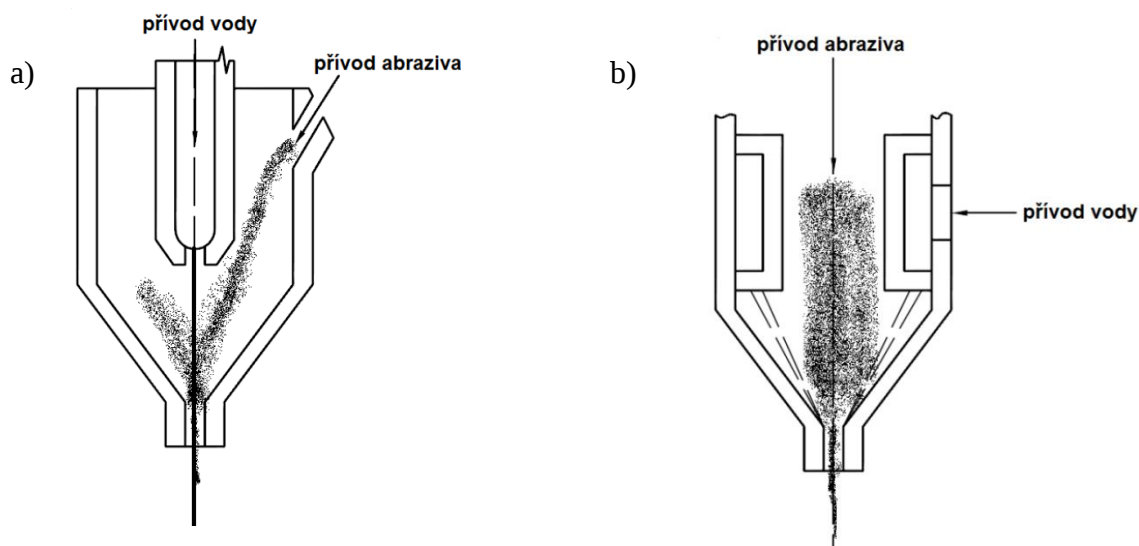
Obr. 6 Tvary vodních trysek:

a) válcová b) kuželová c) kombinovaná d) kónická e) složená – bikubická [16].

Přívod abraziva

Radiální přívod abraziva (Abrasive water jet)

Axiální přívod abraziva (Abrasive slurry jet)



Obr. 7 Trysky používané pro řezání abrazivním vodním paprskem:

a) radiální přívod abraziva b) axiální přívod abraziva [13].

Typ abraziva

Druh použitého abraziva ovlivňuje jak kvalitu obráběných ploch, tak i životnost trysky. U abraziv se posuzuje jejich tvrdost a zrnitost.

Křemičitý písek (SiO_2) je velmi levné abrazivo s nižším řezacím účinkem. Jeho používání je zakázáno, kvůli karcinogennímu křemičitému prachu.

Oxid hlinitý neboli korund (Al_2O_3) je velmi tvrdým a abrazivem s dobrými řeznými schopnostmi. Při použití dochází k vyššímu opotřebení trysky. Tento typ abraziva je dobře recyklovatelný, jeho cena je však poměrně vysoká.

Diamantový prach je nejtvrdším abrazivem. Tvrdost jde samozřejmě ruku v ruce s cenou.

Ocelová drť se vyrábí ohřevem oceli a zakalením do vody. Poté se ocel rozdrtí na jemný prášek.

Olivín je levnou a měkčí alternativou. Olivínové abrazivo se používá při výrobě, v níž je důležitější zisk než řezný výkon. Jak již napovídá chemický vzorec $(\text{Mg.Fe})_2(\text{SiO}_4)$, olivín se skládá ze dvou komponent.

Granát je nejčastěji používané abrazivo. Pochází z Číny, Indie či Austrálie. Drcený granát má ostré hrany, jeho řezivost, tvrdost a pevnost je na velmi dobré úrovni. Nevýhodou je obtížná recyklace rubínu. Granát se používá ve dvou modifikacích, $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3]$ je almandin a $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ je yttrium hliníkový granát [12], [21].

Druh použitého paprsku

Pulzující paprsek modulovaný ultrazvukem – Díky krátkodobému a opakovanému trvání pulzu vznikají tlakové špičky. Tento režim paprsku je vhodný k vrtání řezání, lámání a drcení hornin. Používá se například v báňském průmyslu.

Kontinuální paprsek – je to nejrozšířenější metoda; vyznačuje se stálou energií hladiny paprsku při procesu řezání.

Kavitační paprsek – jedná se o princip kontinuálního paprsku, kde destruktivní silou je paprsek s obsahem kavitačních bublinek.

Ledový vodní paprsek – paprsek je přechlazený ledem nebo tekutým dusíkem, ledová drť pak slouží jako abrazivo; používá se především v potravinářském průmyslu [2], [13].

1.5 Použití vodního paprsku

Postupem času má vodní paprsek, ať už s přidáním abraziva či ne, stále větší uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu. Čistý vodní paprsek se používá spíše k řezání nekovových materiálů. Vodní paprsek s přídavkem abraziva se používá k dělení především kovových materiálů. Přídavek abraziva zvyšuje účinnost při řezání tvrdých materiálů.

1.5.1 Použití ve strojírenství

Ve strojírenství se vodní paprsek používá k těmto úkonům:

- řezání vodním paprskem (řezání vodním paprskem se týká především materiálů, jako jsou titan, wolfram, tantal, uran, a materiálů velmi tvrdých a těžkoobrobitelných, například slinuté karbidy, superslitiny; dále se vodním paprskem řezou kompozity, vláknité materiály, izolační materiály; pomocí vodního jsou vyráběny tvarově složité součásti, za zmínku stojí díly motorů, turbín a kompresorů);
- řezání závitů;
- vrtání;
- soustružení;
- frézování;
- čištění;
- leštění a tryskání.

Vodní paprsek se dá použít jako nástroj při předcházejících operacích namísto vrtáku, soustružnického nože či frézy [14], [15].

1.5.2 Použití v dalších odvětvích

Mimo strojírenství se dále vodní paprsek používá v těchto odvětvích:

- stavební průmysl (vodní paprsek se ve stavebním průmyslu používá především k řezání keramiky, betonu a materiálů, které jsou používány k izolaci);
- chemický průmysl (vodní paprsek je v chemickém průmyslu používán mimo jiné k řezání výbušných látek, jako například dynamitu);
- potravinářský průmysl (vodní paprsek se v potravinářském průmyslu používá k řezání nebo jinému dělení potravin a to jak v normálním, tak v zmraženém stavu);
- elektrotechnický průmysl (vodní paprsek se v elektrotechnice může použít k řezání permanentních magnetů a desek tištěných spojů);
- jaderný průmysl (vodní paprsek může najít uplatnění i v jaderném průmyslu, kde ho může být využito při odstraňování železobetonových vrstev a jejich dekontaminace v zařízeních pro jaderné elektrárny);
- textilní průmysl (vodní paprsek se používá k řezání kůže);
- ostatní odvětví lidské činnosti (vodní paprsek se dá mimo jiné použít k řezání a matování skla a dále také k těžbě a třídění hornin) [13], [15].

1.6 Výhody a nevýhody technologie vodního paprsku

Obrábění vodním paprskem má řadu výhod, ale ani tato nekonvenční metoda není dokonalá. Mezi výhody patří:

- jedná se o bezkontaktní způsob obrábění;
- vysoká energetická účinnost (80%);
- studený řez (do 50 °C), řezání materiálů citlivých na teplotu;
- řezané plochy zatíženy jen minimálním zbytkovým napětím a jsou bez mikrotrhlin;
- nedochází k tepelné deformaci;
- možnost řezat i zvlněné plechy (malá citlivost na vzdálenost trysky od materiálu);
- jeden řezný nástroj umožňuje řezání i vrtání;
- je možné řezat ve všech směrech;
- obrobek nemusí být pevně upevněn;
- nevytváří na řezaném materiálu tvrdou, těžce obrobitelnou vrstvu;
- přesnost řezání materiálů (do tloušťky 10 mm) je $\pm 0,05$ mm; abrazivní vodní paprsek (s tloušťkou do 300 mm) $\pm 0,13$ mm;
- řezný proces je bezpečný, šetrný k životnímu prostředí, není zdraví škodlivý a probíhá v bezprašném prostředí bez vzniku par a plynů;
- lze použít pro čištění, leštění a tryskání těžkoobrobitelných materiálů;
- řez je bez otřepů na spodní hraně;
- úběr materiálu je jen minimálně závislý na mechanických vlastnostech řezaného materiálu;
- životnost trysek pro vodní paprsek je asi 100 hodin, pro abrazivní vodní paprsek je přibližně poloviční;
- možnost řezání i pod vodní hladinou [12], [13], [17], [18].

Mezi nevýhody patří:

- provoz doprovází značný hluk;
- cena abraziva ovlivňuje celkovou cenu;
- úkosity a striace na řezaných plochách;
- zpoždění paprsku;
- kuželovitý tvar paprsku;
- nezpůsobí řezat materiály podléhající korozi a materiály náchylné na kontakt s vodou (bobtnání), kalené sklo a hrnčířskou hlinu v nezpracovaném stavu;
- rádius vnitřních rohů je závislý na průměru vodního paprsku;
- malé dílce musí být zajištěny můstkem, aby nepropadaly do lapače, můstek se pak musí odstranit;
- delší vysoušení u nasákavých materiálů [12], [13], [17], [18].

2 LASER

Laser je další nekonvenční metodou obrábění. Patří k velkým objevům 20. století. Jeho název tvoří 5 písmen, která znamenají Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (v překladu zesilování světla pomocí stimulované emise záření) [22].

2.1 Historický vývoj laseru

Teoretické základy principu, který využívají i lasery, dal v roce 1917 Albert Einstein, který ve své práci *Emise a absorpce světla podle kvantové teorie* poukazuje na jevy jako spontánní (samovolná) emise, absorpce a možnou existenci emise stimulované (vynucené) [23].

V roce 1939 ruský fyzik V. A. Fabrikant objevil možnost využití stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícího prostředím [22].

V. A. Fabrikant spolu s dalšími ruskými fyziky M. M. Vudynkým a F. A. Butajevovou získali roku 1951 patent na metodu zesilování elektromagnetického záření [24].

O dva roky později se objevil první předchůdce laseru s označením MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), byl zkonstruován Ch. H. Townesem a jeho studenty H. J. Zeigerem a J. P. Gordonem [23].

Tento objev dal za vznik novému vědnímu oboru, který byl pojmenován kvantová elektronika.

Roku 1958 vyslovili A. Schawlow a Ch. H. Townes nezávisle na sobě hypotézu, že stimulované emise ve formě, v jaké byla použita v maseru, by se dala použít i v infračervené a optické oblasti spektra. Tímto položili první návrh laseru [22].

15. května 1960 byl sestrojen první laser Američanem T. H. Maimanem. Jako aktivní prostředí byl použit krystal rubínu [25].

Rok 1962 byl významný pro Československo, kde se začal používat první maser. O rok později se v naší republice objevil i první laser (He-Ne) [24].

Zanedlouho začaly vznikat další typy laserů. Za 53 let bylo zkonstruováno mnoho typů lišících se jak aktivním prostředím, tak i způsobem buzení, výkonem a dalšími parametry. Lasery začaly postupně pronikat z laboratoří do různých oblastí (jako např. průmysl, medicína, stavebnictví, vojenská technika, a mnoho dalších).

V dnešní době se laser v průmyslu používá nejen k řezání, ale i k svařování, gravírování, vrtání, mikroobrábění a měření vzdálenosti.

Podle všeho bude budoucnost patřit vláknovým laserům, které sice nenahradí všechny aplikace konané současnými typy laserů, tyto polovodičové lasery však mají řadu výhod, mezi které patří vysoká účinnost, rozměrová nenáročnost, vysoká kvalita paprsku, dlouhá životnost, vzduchové chlazení a některé další [32], [33].

2.2 Princip technologie laseru

Nejdůležitější procesy, které probíhají v laseru, jsou absorpce a stimulovaná emise.

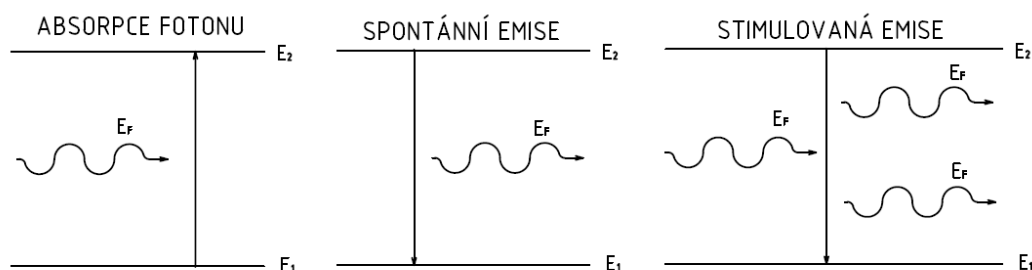
Látka má dva energetické stavy, základní stav, stabilní (ozn. E_1) a stav excitovaný, nestabilní (ozn. E_2) a $E_2 > E_1$. Jestliže na atom, který je ve stavu stabilním dopadá foton s energií

$$E_F = E_2 - E_1 \quad (3)$$

pak může být foton tímto atomem zachycen, dochází k absorpci a atom přechází ze stavu E_1 do stavu E_2 [7], [25].

$$E_F = h \cdot f \quad (4)$$

kde h je Planckova konstanta ($\sim 6,626\,176 \cdot 10^{-34}$ J. s) a f je frekvence fotonu [25].



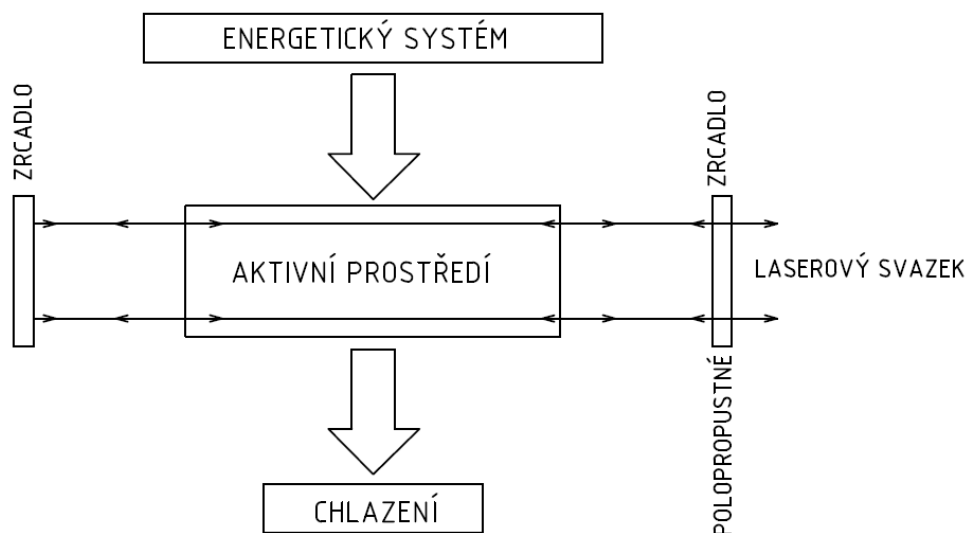
Obr. 8 Schéma základních procesů v laseru [7].

Z nestabilního stavu (E_2) přechází atom zpět do stabilního stavu (E_1) a rozdíl energií se vyzáří ve formě fotonu, tomuto ději se říká spontánní (samovolná) emise. Stimulovaná (vynucená) emise nastává tehdy, když na sebe vzájemně působí atom v excitovaném stavu a foton o energii E_F . Dochází ke stimulaci atomu primárním fotonem a tedy k návratu atomu do základního stavu. Při návratu vyzáří rozdíl energií jako sekundární foton. Sekundární foton má stejnou vlnovou délku, fázi a směr šíření jako foton primární.

V daném prostředí se tedy elektromagnetická vlna zeslabuje absorpcí a zesiluje stimulovanou emisí. Jestliže je většina atomů v excitovaném stavu, pak nastává situace, která je označována jako inverze populace. Inverze populace je základní podmínkou pro zesílení záření stimulovanou emisí. Aby bylo inverzní populace dosaženo, musí se nalézt prostředí, ve kterém jí lze dosáhnout, tzv. aktivní prostředí. Dále se také musí vytvořit energetický systém, který bude aktivnímu prostředí dodávat dostatek energie, která je nutná k dosažení inverze populace [7].

Umístěním aktivního prostředí mezi dvě rovnoběžná zrcadla, jedno nepropustné (100 % odrazivost) a jedno polopropustné (odrazivost 40 – 80 %), získáme optický rezonátor, který neustále vrací část stimulované emise záření zpět do aktivní látky (viz obr. 9). Optický rezonátor vybírá pouze ty fotony, které mají shodnou frekvenci s jeho rezonanční frekvencí. Přes polopropustné zrcadlo prochází koherentní monochromatický paprsek laseru, ostatní fotony jsou vyzařovány vnějšími stěnami aktivního prostředí. Laser je tedy kvantový elektronický zesilovač a generátor světelného svazku, který má tyto základní vlastnosti:

- je vysoce monochromatický – světlo v laserovém paprsku má téměř jednu vlnovou délku;
- má vysoký stupeň koherence – časové i prostorové;
- má malou divergenci (rozbíhavost);
- má modální strukturu – v příčném průřezu vytváří paprsek jednoduchou stopu, nebo útvary pravoúhle či kruhově symetrické [7], [15].



Obr. 9 Zjednodušené schéma laseru [7].

2.3 Nástroj a stroj pro řezání laserem

Technologie laseru umožňuje různé aplikace dokonce i s velmi tvrdými materiály a to při vysoké kvalitě řezu a při vysokých rychlostech. Kvalita a provedení jednotlivých aplikací významně závisí na konstrukci laseru.

Konstrukce laserů zahrnuje tyto části (viz obr. 10):

Laserová hlavice

Laserová hlavice se skládá z laserového média (aktivního prostředí) a rezonátoru. Aktivní prostředí určuje délku vlny záření, může se vyskytovat ve všech skupenstvích. Aktivní prostředí je směsí materiálů s vhodnými energetickými hladinami.

Rezonátor slouží k zesílení a zformování záření. Jedná se o optický systém, který určuje vlastnosti vystupujícího záření (koherenci svazku, intenzitu záření, pravidelnost záření a různé další charakteristiky). Skládá se minimálně ze dvou zrcadel, která jsou nejčastěji sférická. Průměr zakřivení nám udává stupeň divergence (rozbíhavosti). Vzdálenost mezi zrcadly a vlnová délka mají vůči sobě lineární závislost, což nám také dokazuje vztah (6):

$$L = n \cdot \lambda \quad (6)$$

kde L je vzdálenost mezi zrcadly [mm], λ je vlnová délka záření [nm] a n je přirozené číslo [-] [26], [27].

Budící zařízení

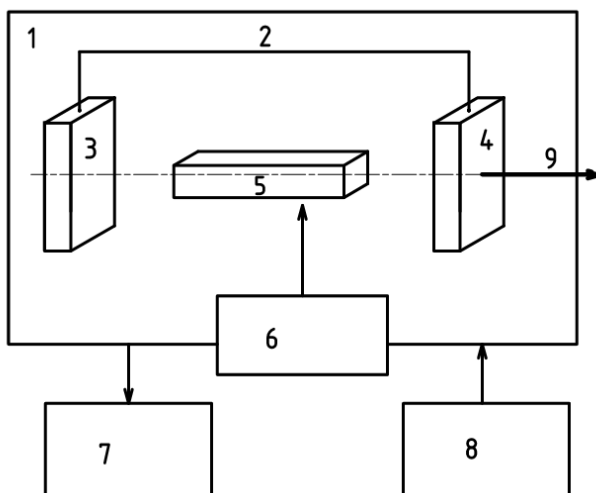
Způsob buzení je dán aktivní látkou. Buzením dodáváme do systému excitační energii, která je potřebná k tomu, aby vznikla inverze populace (více atomů je na vyšších energetických hladinách, méně na energeticky nižších), což je základ pro děj zvaný stimulovaná emise.

K buzení může docházet optickým zářením, elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, expanzí plynu, injekcí nosičů náboje, rekombinací a mnoha dalšími způsoby [25], [27].

Chladicí zařízení

Chladicí zařízení (okruh) slouží k odvodu tepla, na které se přeměnila energie, ze které se nestalo záření.

Chladicí okruh má dvě větve, vnitřní používá neionizovanou vodu a vnější vodu z vodovodu nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem. V některých případech může probíhat chlazení vnější větví pouze pomocí vzduchu [25], [27].



Obr. 10 Schéma hlavních částí laseru:

1. Laserová hlavice, 2. Rezonátor, 3. Nепropustné zrcadlo,
4. Polopropustné zrcadlo, 5. Aktivní prostředí, 6. Budicí zařízení
7. Chladicí systém, 8. Zdroj energie buzení, 9. Laserový paprsek [26].

Obrábění či jiné úkony spjaté se strojírenstvím se provádějí na drahých strojích. Mezi tyto stroje můžeme zařadit například přesné polohovací stoly, roboty, CNC systémy, či specifické stroje výrobců specializovaných na výrobu strojů pro laserové obrábění (Winbro, Newtech a mnoho dalších).

2.4 Klasifikace laserů

Rozdělení laserů se provádí hlavně kvůli velkému množství dostupných typů. Jelikož neexistuje jeden univerzální laser, který by byl vhodný pro všechny úkony, které je možné dělat laserem, dělíme lasery podle různých hledisek:

2.4.1 Typ aktivního prostředí

Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím je pevná opticky propustná látka (krystalická nebo amorfní) s přísadami aktivačních prvků, kterými mohou být:

- krystaly (oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty a další);
- skla (výborná optická kvalita, naopak špatná tepelná vodivost a tvrdost);
- keramika [7].

Pevnolátkové lasery pracují především v pulsním režimu. Jako čerpací zdroj se používají plynové výbojky nebo diody. Je potřeba používat účinné chlazení. Mezi pevnolátkové lasery se řadí:

- rubínový laser (aktivní prostředí: Al_2O_3 , aktivován ionty Cr^{3+});
- Nd:YAG laser (aktivní prostředí: yttrium–aluminium–granát, aktivovaný neodymem);
- Nd:YLF laser (aktivní prostředí: lithium–yttrium–fluorid, aktivovaný neodymem);
- Er:YAG laser (aktivní prostředí: yttrium–aluminium–granát, aktivovaný erbiem) [7], [27].

Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je v plynné fázi. Je tvořeno atomy, molekulami či ionty. Plynové lasery většinou pracují v kontinuálním režimu. Dobré parametry těchto laserů, stabilita, nízká rozbíhavost a vysoká účinnost je následkem homogenního (stejnorodého) prostředí. Tyto lasery pracují v nepřetržitém režimu, jejich trvalý výkon není velký. Byly vyvinuty i plynové lasery s vysokým výkonem, které pracovaly v impulsním režimu a byly rozměrově náročné.

Plynové lasery se využívají v průmyslu (obrábění, mikroobrábění, řezání, vrtání, svařování, čištění a popisování), v medicíně a v měřicí technice.

U atomárních laserů je aktivní prostředí tvořeno elektricky neutrálními, v molekulách nevázanými atomy. Mezi atomární lasery patří například:

- helium – neonový laser (aktivní prostředí je tvořeno excitovanými – vybuzenými atomy neonu v kontinuálním doutnavém elektrickém výboji ve směsi helia a neonu; vysílají světlo v červené a infračervené oblasti);
- měděný laser (aktivní prostředí je tvořeno atomy mědi; buzení probíhá pomocí elektrického výboje ve směsi par mědi a dalších plynů jako například helia a argonu; vysílá zelené světlo a jejich účinnost se pohybuje kolem 1 %);
- jodový laser (aktivní prostředí je tvořeno atomy jodu; může být buzen proudem fotonů nebo rezonančním přenosem energie; generuje viditelné nebo infračervené záření) [25], [35].

Iontové lasery mají jako aktivní prostředí ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů (Sn, Pb, Zn, Cd, Se). Patří tam tyto lasery:

- argonový laser (aktivní prostředí je tvořeno ionty argonu; buzení probíhá pomocí silnoprůdového elektrického výboje; vysílá světlo ve viditelné oblasti);
- helium – kadmiový laser (aktivním prostředím jsou ionty kovu; buzení je uskutečňováno elektrickým výbojem, ve kterém se nejdříve excituje a ionizuje helium, atomy helia pak umožňují vznik iontů kadmia) [25].

Mezi molekulové lasery řadíme tyto lasery:

- vodíkový laser (aktivním prostředím je molekulární vodík; buzení je prováděno pomocí elektrického výboje v plynu; generuje ultrafialové světlo);
- dusíkový laser (aktivním prostředím je molekulární dusík; generuje ultrafialové, viditelné, blízké infračervené a infračervené záření);
- excimerový laser (aktivním prostředím jsou excimery, což je zkratka slov excitovaný dimer; buzení probíhá elektronovým svazkem s účinností přibližně 10 % a elektrickým výbojem s účinností asi 1 %);
- CO₂ laser (aktivním prostředím jsou molekuly oxidu uhličitého; buzení se provádí elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí, dynamickým ochlazením plynu; do laserové hlavice se zavádí pomocný plyn, který odstraňuje z obráběného materiálu taveninu a páry, chrání optiku a vytváří ochrannou nebo naopak vhodně agresivní atmosféru; účinnost kolem 10 %);
- CO laser (aktivním prostředím jsou molekuly oxidu uhelnatého; buzení se provádí elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, chemickou reakcí nebo dynamickým ochlazením plynu; vyzařuje infračervené záření) [27].

Kapalinové lasery

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou nejčastěji roztoky organických barviv (Rhodamin 6G, Rhodamin B, Fluorescein, Alizarin, různé Coumariny a další, rozpuštěné například v lihu či destilované vodě). Kromě organických barviv se dají použít také speciálně připravené kapaliny, které jsou dopovány ionty prvků vzácných zemin [22].

Organická barviva mají široká absorpční pásma ve viditelné a blízké ultrafialové oblasti spektra. Jsou schopny spojitě měnit vlnovou délku záření generovaného těmito lasery. Díky metodám nelineární optiky a až 200 druhům organických barviv lze dosáhnout všech vlnových délek (v rozmezí 300 nm až 1500 nm). Buzení se provádí pomocí speciální výbojky (nekoherentní buzení), nebo pomocného laseru (koherentní buzení), například dusíkového nebo argonového [22].

Tyto lasery se používají ve spektroskopii (vzhledem k možnosti naladění na přesnou vlnovou délku) a v medicíně [27].

Polovodičové lasery

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál. Na rozdíl od ostatních druhů laserů nastává emise záření při průchodu elektrického proudu přechodem p-n. Vlnová délka závisí na použitém materiálu [22].

Médiiem u těchto typů laserů je nejčastěji:

- galium arsenid (GaAs);
- kadmium sulfid (CdS);
- kadmium selen (CdSe) [25].

Typickými představiteli polovodičových laserů jsou:

- polovodičový laser (buzený svazkem elektronů);
- injekční polovodičový laser (buzení se provádí přiložením elektrického pole k polovodičovému přechodu);
- vysoce výkonné diodové lasery [25], [27].

Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu. Je nutné jej chladit [27].

Paprsek u polovodičových laserů lze snadno modulovat změnou elektrického proudu. Jedná se o kompaktní lasery poměrně malých rozměrů, které dosahují relativně vysoké účinnosti (řádově v desítkách procent – až 50 %, závisí na použitém polovodiči). Mezi nevýhody patří rozbíhavost generovaného záření a velká závislost jeho parametrů na teplotě aktivního polovodiče [25].

Tyto lasery se používají na svařování, tepelné zpracování, nanášení povlaků, řezání popisování součástí a v technologii Rapid Prototyping. Injekčního polovodičového laseru se využívá u LED diod, laserových ukazovátek a v počítačové technice [25], [27].

Plazmatické lasery

Inverze populace hladin je vytvářena uvnitř chladnoucího plazmatu. Experimentálně bylo vyrobeno mnoho plazmatických laserů s rozsáhlým spektrem vlnových délek výstupního záření [25].

Při laserových přechodech v rozpadajícím se plazmatu mají nevyšší součinitel zisku ionty těchto prvků:

- argon (vlnová délka 747 nm);
- kadmium (vlnová délka 537,8 nm);
- rtuť (vlnová délka 567 nm) [25].

Plazmatické lasery, jejichž aktivní prostředí je vytvořeno mnohonásobně nabitými ionty, jsou jednou z cest k vytvoření rentgenového laseru, který je zdrojem koherentního rentgenového záření [25].

Plazma je nejčastěji vytvářena elektrickým výbojem, může však být vytvořena i jinými způsoby. Mezi jiné způsoby patří například vznik plazmy (silnoprůdným) elektronovým svazkem, produkty jaderných reakcí, chemickými reakcemi nebo fokusovaným laserovým zářením [2], [25].

Vláknové lasery

Jedná se o nemodernější technologii související s lasery. Záření se generuje uvnitř optického vlákna, které je dopováno prvky vzácných zemin (Erbium, Ytterbium). Takto vzniklý svazek se vyznačuje vysokou kvalitou, kompaktností. Není nutné používat prvky jako čočky, zrcadla či děliče svazku. Těmto laserům stačí i relativně nižší příkon. Tyto lasery se dají zatím použít k řezání, svařování a značení [33].

2.4.2 Vysílaná vlnová délka

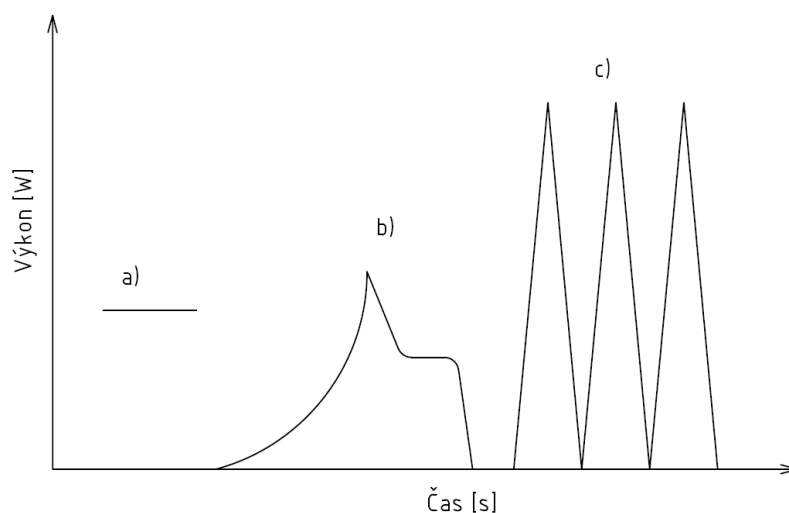
Podle toho, jaké záření je laser schopný generovat, lasery dělíme na:

- infračervené lasery;
- lasery viditelného pásma;
- ultrafialové lasery;
- rentgenové lasery;
- lasery využívající γ -záření [22].

2.4.3 Režim laserového svazku

Podle toho, v jakém režimu je laser schopný pracovat, dělíme lasery na lasery schopné pracovat v režimu:

- pulsním;
- impulsním;
- kontinuálním [1].



Obr. 11 Schematicky znázorněný režim laserového svazku:

a) kontinuální, b) pulsní, c) impulsní [1].

2.4.4 Typ buzení

Podle toho, jakým způsobem probíhá buzení, lasery dělíme na:

- lasery buzené opticky;
- lasery buzené elektrickým výbojem;
- lasery buzené elektronovým svazkem;
- lasery buzené tepelnými změnami;
- lasery buzené chemicky;
- lasery buzené rekombinací;
- lasery buzené injekcí nosičů náboje [22].

2.4.5 Výkon

Podle použitého výkonu dělíme lasery na lasery *nízkovýkonové*, které využívají až stovky Wattů, a na lasery *vysokovýkonné*, které využívají až desítky kilowattů.

Jedním z hledisek dělení je i použití, které bude zmíněno v následující kapitole.

2.5 Použití laseru

Laser se svým použitím neváže pouze na strojírenství, expandoval téměř do všech odvětví průmyslu a je možné se s ním setkat téměř každý den. Jeho hlavní využití však stále zůstává ve strojírenství.

2.5.1 Použití laseru ve strojírenství

Nejširší a nejčastější využití laseru je ve strojírenství. Výčet úkonů, které lze provádět laserem je uveden zde:

- řezání laserem – jedná se o technologii dělení materiálu, která je velmi rozšířená a je to také nejčastější využití laseru v průmyslové výrobě; rozlišujeme 3 základní typy řezání pomocí laseru:
 - sublimační řezání (povrch řezaného materiálu je ohříván paprskem laseru na teplotu odpařování, pomocný plyn pak odstraňuje páru na čele řezu);
 - tavné řezání (řezaný materiál je lokálně natavován laserovým svazkem a silný proud asistenčního, inertního, plynu odstraňuje roztavený materiál; na vlastním procesu řezání se nepodílí; nevýhodou toho to způsobu řezání je to, že na spodní straně řezu jsou tuhnutí kapky řezaného materiálu; tímto způsobem se řezou materiály jako například nerezové oceli, hliník, mosaz, měď, pozinkované plechy, keramika, plasty, dřevo, textilní materiál, papír, sklo a další);
 - oxidační řezání (jedná se o řezání za pomoci aktivního plynu, v tomto konkrétním případě kyslíku; kyslík a roztavený povrch řezaného materiálu na sebe působí, dochází k exotermická reakci, ta ohřívá materiál, a tím usnadňuje tavení a odfukování materiálu – strusky; snižuje také koeficient odrazivosti materiálu, díky tomu materiál více absorbuje energii laseru; je tedy zřejmé, že oxidační řezání je rychlejší než tavné; jeho nevýhody však spočívají v horší kvalitě povrchu řezu, širší tepelně ovlivněné oblasti a ve vzniku širší řezné spáry; není vhodné pro řezání přesných, geometricky složitých tvarů; oxidační řezání se používá k řezání především nízkolegovaných a nelegovaných ocelí, které nejsou tak náchylné k oxidaci, jako vysokolegované oceli) [25], [36];
- vrtání laserem – při vrtání dochází k ohřívání materiálu velkou rychlostí; materiál se odpařuje a tím umožňuje průnik laseru hlouběji; intenzita svazku musí být mnohem vyšší, než u jiných aplikací laseru; tepelně ovlivněná oblast je při pulsním režimu menší než při režimu kontinuálním; vrtání pomocí laseru se uplatňuje v automobilovém a leteckém průmyslu; pro vrtání se používají CO₂ lasery, Nd:YAG lasery a excimerové lasery; rozlišujeme tyto způsoby:
 - jednorázové (dochází k úplnému pronikání po dopadu pulsu na materiál);
 - postupné (jednotlivé vrstvy jsou odpařovány dopadem série pulsů na jedno místo);
 - trepanační (působením série pulsů podél požadovaného otvoru se vyvrtávají díry o větších průměrech) [25], [36];

- soustružení s podporou laseru – pro soustružení pomocí laseru se používají tři metody:
 - bezkontaktní odtavení materiálu (při něm odpadá složitost spojená s upínáním součásti; úběr materiálu je však malý oproti konvenčnímu soustružení);
 - soustružení s předehřevem (vlivem vyšší teploty se mění mechanické vlastnosti materiálu; laserový svazek je nasměrovaný na plochu soustružené součásti těsně před břit);
 - odřezávání materiálu různoběžnými paprsky laseru (dva různoběžné paprsky laseru jsou vůči sobě skloněny o určitý úhel) [26], [36];
- frézování s podporou laseru – jedná se o alternativu ke konvenčním technologiím; pomocí laseru můžeme frézovat odtavováním nebo odpařováním materiálu z povrchu obrobku, nebo odřezávat materiál dvěma různoběžnými paprsky laseru; pro frézování se používají především CO₂ a Nd:YAG laser [38];
- značení a popisování laserem – značení a popisování je založeno na změně barvy povrchu popisovaného materiálu, nebo na místním odpaření materiálu; na povrchu materiálu je působením laseru vytvořen stálý, mechanicky odolný, kontrastní a nenapodobitelný popis; pro tyto úkony se používá CO₂ laser, Nd:YAG laser a excimerový laser [35];
- gavirování laserem – gavirováním jsme schopni tvořit jak jednoduché, tak i složité reliéfy; proces je velmi podobný jako u popisování, ale musí dojít ke změně parametrů laseru; použití se týká především kalených ocelí, které se používají na formy a zápustky, keramických materiálů, pro obě tyto varianty se používá Nd:YAG laser; pro gavirování dřeva a gumy se používá CO₂ laser [37];
- nanášení povlaků laserem – do paprsku laseru je přiváděn nanášený materiál ve formě prášku nebo drátu, zde je roztaven a přiváděn na povrch součásti, kde ztuhne; další možnost je, že je materiál, který bude tvořit povlak, na povrch materiálu přímo nanesen a následně laserem roztaven; pomocí laseru můžeme nanášet povlaky i na tvarově velmi složité součásti [7];
- svařování laserem – svařování laserem je velmi rychlá alternativa svařování, při níž dochází k vzniku malé tepelně ovlivněné oblasti; dá se použít, i když je přístup ke spojovaným částem pouze z jedné strany; nedochází k fyzickému kontaktu s elektrodou; svar se vyznačuje dobrými pevnostními charakteristikami; není potřeba žádný přídavný materiál; laserem se dají svařovat i jinak těžko svařitelné materiály, jako třeba titan a jeho slitiny, hliníkové slitiny, zlato, niob; svařování laserem nachází uplatnění v kosmonautice, v automobilovém a leteckém průmyslu; rozlišujeme tyto typy svařování:
 - kondukční svařování (kondukční svařování neboli svařování vedením tepla se vyznačuje širokými a plochými svary; laserový svazek roztavuje materiál pouze na povrchu, a proto se používá především k svařování tenkých plechů; k tomuto svařování se používá Nd:YAG laser);

- hluboké svařování (hluboké svařování je charakteristické úzkými, ale hlubokými svary; při překročení určité intenzity tepla pronikne svazek hluboko do materiálu, dochází zde k roztavování a částečnému odpařování; díky asistenčnímu plynu je zabráněno oxidaci a vzniku pórů v místě svaru; pro tento typ svařování se používá CO₂ laser) [38], [39];
- povrchová úprava materiálu laserem – metody úpravy povrchu kovů pomocí laseru jsou uvedeny zde:
 - bez natavení povrchu (pomocí laseru lokálně zvyšujeme teplotu zpracovaného materiálu až nad eutektoidní teplotu ale pod teplotu tavení příslušného materiálu; jedná se o popouštění a kalení s polymorfními změnami);
 - s natavením povrchu (povrchová vrstva zpracovaného materiálu se velmi rychle působení laseru přetaví a následuje ochlazení, díky kterému dosáhneme jemné amorfnní struktury; takto zpracovaný materiál je pak odolnější vůči korozi a proti opotřebení);
 - s odpařením povrchu (dochází k úběru materiálu působením laserového svazku tangenciálně na rotující součást; tím zahlazujeme mikronerovnosti a snižujeme drsnost povrchu) [23].

2.5.2 Použití laseru v dalších odvětvích

Jak už bylo zmíněno, laser pronikl téměř do všech odvětví lidské činnosti a s výsledky práce laseru nebo přímo s laserem je možno se potkávat každý den. Nejčastější použití laseru mimo strojírenství je uvedeno zde:

- lasery v medicíně (laser byl poprvé použit v medicíně k operaci v roce 1949 a jeho aplikací v tomto odvětví přibývá; laserová chirurgie umožňuje řezání a odpařování tkání velmi malých ploch; při operacích za asistence laseru nedochází k dotyku s tkání, díky tomu nedochází k vzniku infekce a k poškození okolí tkáně; současně s řezem dochází ke koagulaci, teplem se uzavírají konce cév, zmenšuje se tím pádem krvácení);
- lasery v mikroelektronice (laser v mikroelektronice se používá především k těmto operacím: laserové doladování, laserové rýhování, laserové žíhání a laserová litografie);
- lasery v astronomii, geodézii a geofyzice (laser se v těchto odvětvích používá k měření vzdáleností prostřednictvím času, který uběhne, než se odražený paprsek vrátí zpět; rychlost paprsku je rovna rychlosti světla v daném prostředí; díky tomu můžeme měřit například zemětřesení, pohyb kontinentů, dráhy družic a další věci);
- lasery v ekologii a meteorologii (laser nachází uplatnění i v ekologii a meteorologii; slouží zde jako pozemní radary, které mapují množství částic v ovzduší, znečištění ovzduší, směr pohybu částic, výška oblačnosti, proudění vzduchu v atmosféře a další důležité údaje);
- lasery ve výpočetní technice (laser, který by se dalo použít v soudobé výpočetní technice, musí mít co nejmenší rozměry; všechny objekty, u kterých se nevyžadují velké rozměry, se zmenšují a zužují; z důvodu malých rozměrů se používají ve výpočetní technice především polovodičové lasery; můžeme se s nimi setkat v laserové tiskárně či kopírce, CD – ROM mechanice, v laserovém ukazovátku a v mnoha dalších předmětech);
- laser jako zbraň (laser se také používá pro vojenské aplikace; nejčastěji slouží k zaměřování, nebo označování cílů; může být také využit k přímé likvidaci cíle; k tomu by však byla zapotřebí velká energie) [1], [7], [13], [22], [35].

2.6 Výhody a nevýhody technologie laseru

Obrábění paprskem laseru má řadu výhod, ale také nevýhod. Mezi výhody této nekonvenční elektrotepelné metody patří:

- jedná se o bezkontaktní a bezsilové obrábění (lze obrábět i velmi křehké materiály bez nebezpečí jejich mechanického poškození);
- dosahuje velkých posuvových rychlostí ($100 - 17\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, i více);
- malá tepelně ovlivněná oblast;
- malá tepelná pnutí a deformace uvnitř materiálu;
- přesnost*;
- plochy řezu mají velmi dobrou jakost povrchu;
- lze řezat různé tvary jedním nástrojem;
- řezání všemi směry;
- provoz je čistý a tichý;
- obrábění i těžkoobrobitelných materiálů (i za vysoké rychlosti obrábění);
- snadná regulace výkonu;
- seřizování a přípravné práce nejsou náročné;
- svařování i špatně dostupných míst;
- hospodárnost při malých výrobních dávkách;
- odpadá údržba nástroje;
- chemická čistota paprsku zaručuje obrábění bez znečištění obrobku;
- dá se použít ke značení a popisování [1], [15], [21], [28].

Mezi nevýhody řadíme:

- pořizovací cena stroje;
- nízká účinnost (přibližně jen 10% vůči příkonu zařízení);
- vliv na životní prostředí (elektromagnetický smog, laserový plyn);
- přísná bezpečnostní opatření doprovázející výrobu;
- rozsah tloušťek řezaného materiálu**;
- nemůže řezat plasty a materiály s vysokou světelnou odrazivostí [1], [15], [21], [28].

* Hodnota je závislá na typu laseru, na přesnosti ovládacího mechanismu a dalších parametrech.

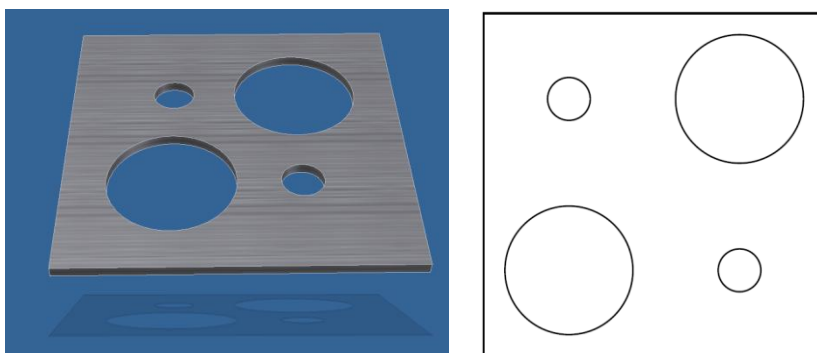
** Tloušťka plechu závisí na konkrétním druhu laseru, stroji a jeho konfiguraci.

3 PRAKTICKÉ ZKOUŠKY ŘEZÁNÍ ZA RŮZNÝCH PODMÍNEK

Praktická část této bakalářské práce, která se zabývá vlivem procesních parametrů na kvalitu a přesnost řezu, byla tvořena na dvou odlišných pracovištích v olomoucké pobočce firmy Honeywell. Vyhodnocení výsledků proběhlo jak ve firmě Honeywell, tak na Vysokém učení technickém v Brně. Vyhodnocení se týká jak rozměrové přesnosti, tak kvality povrchu řezaných ploch.

Pro tento účel byla navržena součást (viz obr. 12), která byla vyřezávána z plechů z chromniklové oceli INCO 718 AMS 5596 tlouštěk 1,02 mm a 2,57 mm. Materiál INCONEL se používá především pro aplikace v leteckém průmyslu, což je také hlavní odvětví, kterým se zabývá pobočka firmy Honeywell v Olomouci.

Aby byla zajištěna opakovatelnost, byl řez proveden pro každou tloušťku plechu a každý zvolený parametr dvakrát. Cena plechu nebyla nízká, proto bylo provedeno jedno opakování řezu.



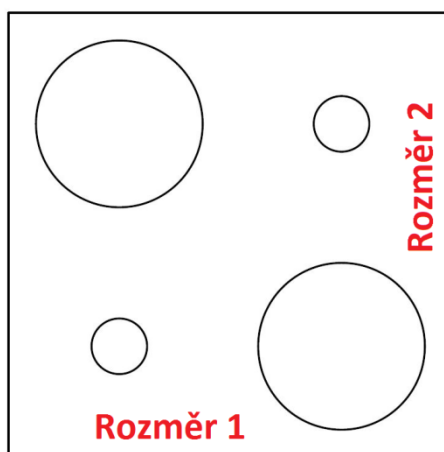
Obr. 12 Vyřezávaná součást.

Ze všeho nejdříve proběhla vizuální kontrola pouhým okem. Základním hodnotícím kritériem byl fakt, zda paprsek prořezal materiál při daných parametrech. K prořezání nedošlo třikrát. Jednou u vodního paprsku a dvakrát u laseru. Dále bylo sledováno množství a tvar přetavené vrstvy, vznikající na vnitřní straně u výrobků, vzniklých řezáním pomocí laseru.

Po vizuální kontrole okem, byla provedena kontrola pod zvětšovací optikou, která byla schopna dělat snímky makrostruktury a odesílat je do počítače. Pomocí toho bylo provedeno vyhodnocení struktury a kvality řezaných ploch na základě makrostruktury.

Při vyhodnocování rozměrové přesnosti bylo použito NC stroje pro souřadnicové měření rozměrů. Díky tomu bylo možné zachytit úchytky od požadovaného rozměru co nejpresněji. Pro vyhodnocování rozměrů součástek, řezaných z tlustého plechu vodním paprskem bylo použito posuvné měřidlo, a to z důvodu zkosení jeho řezaných ploch. Odchylky od požadovaných rozměrů byly do tabulky uvedeny největší (u paty zkosení).

Bohužel bylo zpětně zjištěno, že stroj na řezání vodním paprskem vyřezal výrobky menší než požadovaný rozměr. Bylo to z důvodu zavedeného měřítka v programu 0,88 namísto 1. Z toho důvodu se při porovnávání obou metod dbalo na odchylky vůči požadovanému rozměru, který byl pro obě metody jiný (pro laser 40 mm a pro vodní paprsek 35,2 mm). Na součástech byly měřeny dva na sebe kolmé vnější rozměry (viz obr. 13).



Obr. 13 Vyhodnocované rozměry vyřezávané součásti.

Po změření všech součástí bylo u vybraných součástí, řezaných za použití specifických parametrů (plech 2,57, vodní paprsek – řezný program extra dobrý a extra drsný; laser – $P = 1000 \text{ W}$, $v = 300 \text{ mm.min}^{-1}$ a $P = 1100 \text{ W}$, $v = 900 \text{ mm.min}^{-1}$), proveden metalografický výbrus a byla sledována tepelně ovlivněná oblast (HAZ) u součástí, řezaných laserem a deformovaná oblast součástí, která byla vyrobena pomocí vodního paprsku. Metalografické výbrusy byly vyrobeny na Vysokém učení technickém v Brně a byly provedeny podle všech zásad a stanov. Leptadlem byla látka Marble.

Tabulka 1 slouží ke komplexnějšímu porovnání laseru a vodního paprsku. Tato tabulka obsahuje mimo jiné i důležité aspekty, které nebylo možné při praktické části vyzkoušet.

Tabulka 1 Porovnání technologií řezání vodním paprskem a laserem [12], [15].

Metoda	Laser	Vodní paprsek
Dělitelné materiály*	Všechny, mimo kompozitů a materiálů, které mají vysokou světelnou odrazivost	(Téměř) všechny materiály
Teplota řezu**	Teplý řez	Studený řez
Vliv teploty řezu*** na materiál	Malý	Není
Změny struktury materiálu v místě řezu	Malé****	Žádné***
Kolmost řezu	Mírný odklon	
Drsnost povrchu obrobené plochy	Nízká drsnost ($\geq Ra\ 3,2$)	Lze dosáhnout nízké drsnosti ($\geq Ra\ 3,2$)
Výronek v řezné spáře	Většinou bez výronku	Vždy bez výronku
Tvrdost řezaného materiálu	Nemá vliv na rychlost řezání	Mírně ovlivňuje rychlost řezání (snižuje)
Řezání plastů	Problematické - toxicita	Je možné
Řezání kompozitů	Je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	Je velmi vhodné
Řezání keramiky, skla, kamene	Velmi omezené	Je velmi vhodné, s výjimkou kalených skel
Reliéfní obrábění	Je možné	Výjimečně
Velikost dílce	Malé i velké dílce	
Tloušťka materiálu	Malá a střední	Velmi široký rozsah
Složitost tvaru	Komplikované tvary	
Průstřel	Je možný	
Vznik plyných emisí	Malé množství	Bez vývinu, nebo jen při průstřelu
Vznik oxidických povlaků	Pouze při řezání s kyslíkem	Pouze u materiálů, korodujících při styku s vodou
Vliv na pracovní prostředí	Malé exhalace a hluk	Hluk
Běžné tolerance rozměrů	$\geq \pm 0,1$	$\geq \pm 0,1$

* Tvrzené sklo by se vlivem vnitřního pnutí při řezání vodním paprskem roztříštilo.

** Rozdíl mezi teplým a studeným řezem je v teplotě. Teplota studeného řezu je do 50 °C. Teplota teplého řezu dosahuje až teploty tavení daného materiálu.

*** Teplota vodního paprsku je nízká, neovlivňuje tedy strukturu materiálu v místě řezu. Kdežto u laseru je teplota vysoká a dochází k vzniku tepelně ovlivněné oblasti.

**** Teplota laseru ovlivňuje strukturu vlivem vysoké teploty a ochlazení vlivem okolní teploty vzduchu. Ve struktuře může vzniknout HAZ, která je však díky provozním parametrům malá.

3.1 Řezání vodním paprskem

Tato podkapitola pojednává o odhadech, jak by měly výrobky vypadat z hlediska rozměrového, z hlediska makrostruktury a mikrostruktury. Dále byl popsán stroj pro řezání vodním paprskem a samotný řezný proces. V poslední části jsou uvedeny dvě tabulky s naměřenými hodnotami, jedna pro každou tloušťku plechu.

3.1.1 Předpoklady

Na základě rešerše, která byla prováděna pomocí literatury a internetu, se dají předpokládat jevy, které jsou uvedeny v následujících třech odstavcích.

Na struktuře řezné plochy by se měly objevit 2 zóny řezu. Ve spodní zóně byly předpokládány rýhy, které by se měly zaoblovat proti směru posuvu [12], [20].

Co se týče rozměrové přesnosti součástek, literatura se liší v tom, že některé zdroje zohledňují programy přesnosti stroje pro obrábění (v takovém případě jsou rozměrové odchylky od požadovaného rozměru uvedené v tab. 2) a některé ne (ty pak uvažují rozměrovou přesnost od extrémní hodnoty $\pm 0,04$ mm, přes $\pm 0,1$, $\pm 0,13$ mm, $\pm 0,4$ mm až do $\pm 0,5$ mm). Vzhledem k tomu, že metoda abrazivního vodního paprsku je schopna řezat materiály tloušťek řádově ve stovkách milimetrů, není očekávána velká změna na kontrolních vzorcích (1,02 mm a 2,57 mm) [4], [2], [12], [20], [29], [30].

Z pohledu mikrostruktury by nemělo dojít k žádnému ovlivnění, především ne tepelnému, jelikož se jedná o studený způsob řezání. Působením abraziva by měla jít vidět deformací ovlivněná oblast.

Tabulka 2 Přesnost pro různé programy přesnosti [4], [12].

Program přesnosti*	Přesnost [mm]
<i>Extra dobrý</i>	$\pm 0,1$
<i>Dobrá</i>	$\pm 0,1$
<i>Střední</i>	$\pm 0,15$
<i>Hrubý</i>	$\pm 0,2$
<i>Extra drsný</i>	$\pm 0,2$
*Názvy programů přesnosti, které udává výrobce (firma PTV).	

3.1.2 Proces zhotovování vzorků

Řezání vzorků vodním paprskem proběhlo 6. 12. 2013 na stroji *Uni Jet WJ3015-1Z-UJ-PJ-5AX* (viz obr. 14). Čerpadlo, používáno tímto strojem, je *PTV JETS – 3,8/60 Classic*. Průměr použité trysky byl 1 mm. Jako abrazivo byl použit granát GMA, který je australského původu. Tvrdost tohoto abraziva podle Mohra (uvádí výrobce) je 7,5 až 8. Teplota tavení je až 1250 °C. Zrnitost abraziva má hodnotu 80.

Výrobní řada Uni Jet má základní rám z oceli, některé z dalších komponent jsou z hliníku. Obsahuje přesnou planetovou převodovku a servomotor. Ozubené regály jsou z kalené oceli a pastorky z nerezové oceli. Lapač vody je nezávislý na zbytku. Tento stroj je schopen pracovat v pěti stupních přesnosti, při dvou různých tloušťkách materiálu to dává dohromady 10 různých možností, které budu mezi sebou porovnávat (viz Tab. 3 a 4). Aby byla zachována opakovatelnost, řezání byla provedena dvakrát, vše za nezměněných podmínek či personálu. Programy přesnosti jsou odstupňovány od *extra drsného* přes *hrubý*, *střední*, *dobrá* až po *extra dobrý* [11].



Obr. 14 Stroj na řezání vodním paprskem: *UNI JET WJ 3015 - 1Z – UJ – PJ – 5AX* [11].

Vodní paprsek řezal materiál při různé tloušťce a programu přesnosti různě rychle. Nejvyšší rychlost posuvu, kterou byl vzorek řezán, byla podle dokumentace $3539,6 \text{ mm.min}^{-1}$, touto rychlostí však byly řezány jen části rovných řezaných ploch, průměrná rychlost při tomto konkrétním řezu byla 1141 mm.min^{-1} . Tlak kapaliny byl konstantní pro všechny řezy a měl hodnotu 4130 bar (přibližně 413 MPa). Tok abraziva byl 400 g.min^{-1} .

Na rozdíl od laseru, kde musely být předem připraveny polotovary plechu o rozměrech $60 \times 60 \times 1,02 \sim 2,57 \text{ mm}$, se mohlo řezat přímo do plechu, rozměry svěráku nebyly důležité, protože žádný svěrák, do kterého by se upínal plech, nebyl použit. U součástí velikosti té zkoumané se musí přidávat můstek, aby součást nepropadla až do lapače a nemusela být složitě hledána.

3.1.3 Dosažené výsledky

Tabulka 3 Výsledky měření pro plech tloušťky 1,02 mm.

Program*	Doba řezu [s]	Průměrná rychlost řezu [mm.min^{-1}]	Odchylka od rozměru 1** [mm]	Odchylka od rozměru 2** [mm]
Extra drsný	28	1141	-0,5	-0,24
Hrubý	28	1097,8	-0,43	-0,25
Střední	30	1016,6	-0,21	-0,22
Dobry	31	943,4	-0,12	-0,2
Extra dobrý	33	877,8	-0,08	-0,15

*Názvy programů přesnosti, které udává výrobce (firma PTV).

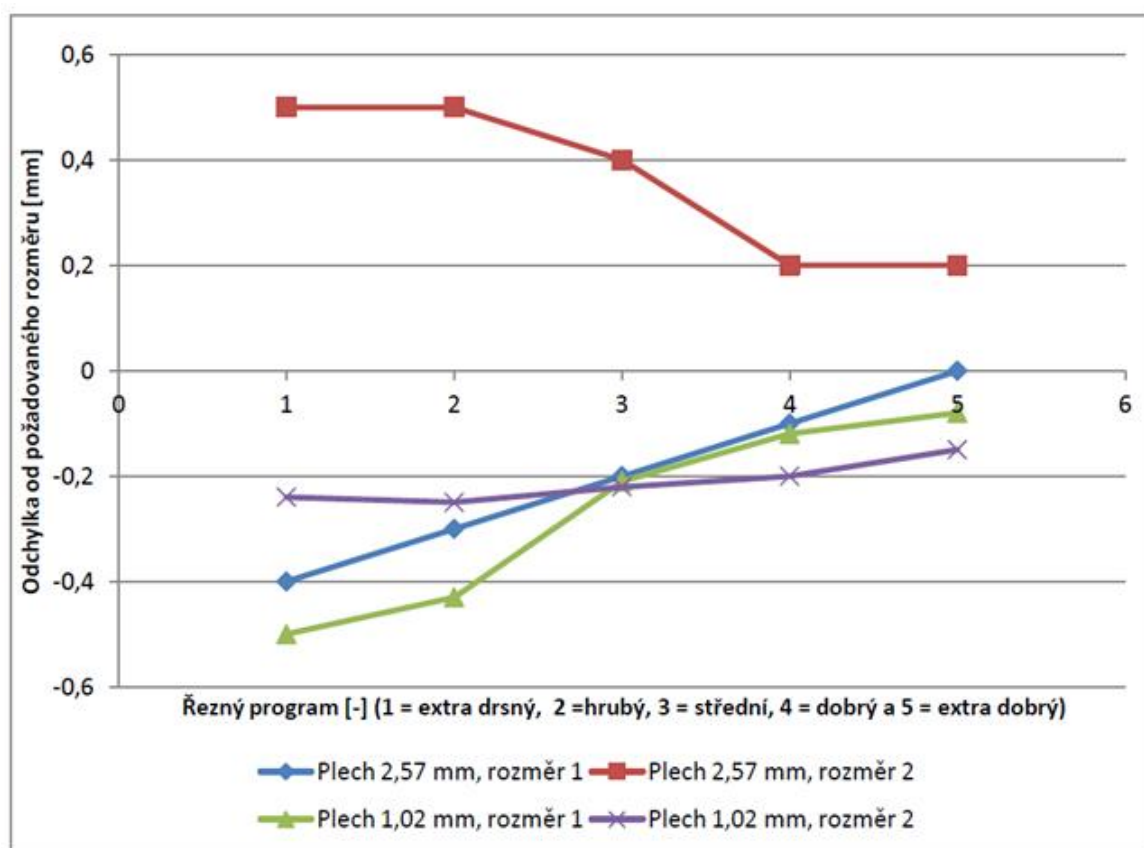
** Rozměr 1 a rozměr 2 jsou rozměry dvou na sebe kolmých stran naší řezané součásti (viz obr. 13). U vodního paprsku byl jmenovitý rozměr 35,2 mm a u laseru 40 mm. Vodní paprsek je menší z důvodu chybně nastaveného měřítka při řezání.

Tabulka 4 Výsledky měření pro plech tloušťky 2,57 mm.

Program*	Doba řezu [s]	Průměrná rychlost řezu [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	Odchylka od rozměru 1** [mm]	Odchylka od rozměru 2** [mm]
Extra drsný	52	471,3	-0,4	0,5
Hrubý	53	450,8	-0,3	0,5
Střední	57	412,4	-0,2	0,4
Dobrý	62	378,6	-0,1	0,2
Extra dobrý	66	349	0	0,2

* Názvy programů přesnosti jsou uvedeny podle výrobce.

** Rozměr 1 a rozměr 2 jsou rozměry dvou na sebe kolmých stran naší řezané součásti (viz obr. 13). U vodního paprsku byl jmenovitý rozměr 35,2 mm a u laseru 40 mm. Vodní paprsek je menší z důvodu chybně nastaveného měřítka při řezání.



Obr. 15 Závislost odchylky od požadovaného rozměru na řezném programu.

3.2 Řezání laserem

V této podkapitole jsou popsány předpokládané výsledky řezání, stroj pro řezání laserem a samotný řezný proces. V poslední části jsou uvedeny čtyři tabulky s naměřenými hodnotami, dvě pro každou tloušťku plechu.

3.2.1 Předpoklady

Tvorba rešerše o řezání laserem potvrdila, že existuje málo odborné literatury, která uvádí přesné hodnoty, především rozměrové přesnosti. Přesnost je ovlivněna parametry, na které je nastavený daný stroj pro řezání laserem. Největší vliv má přesnost ovládacího mechanismu.

Bylo pozorováno, že laser je přesnější* technologií než vodní paprsek. Proto bylo pravděpodobné, že naměřené hodnoty se budou více přibližovat požadované hodnotě, než tomu bylo u vodního paprsku. Rozměrové tolerance se podle zdrojů pohybují od 0,03 mm přes 0,05 mm až po 0,63 mm.

Struktura řezané plochy byla popsána jako rýhovaná. To není nic neobvyklého u vysokoenergetických způsobů řezání. Hloubka rýh je hlavním parametrem pro výslednou strukturu povrchu [2], [5], [29], [31].

Při pohledu do materiálu a vyhodnocování mikrostruktury byl předpoklad vzniku tepelně ovlivněné zóny. Velikost HAZ je závislá na teplotní vodivosti materiálu. Výčet několika materiálů, včetně korozivzdorné oceli, je uveden v tab. 5. Barevně jsou rozlišeny rozměry, které se svými hodnotami přibližují zkoušeným součástem [13].

** Přesnější při určitých (menších) tloušťkách materiálů, pro které je laser koncipován.*

Tabulka 5 Hodnoty tepelného ovlivnění pro různé materiály [13].

Materiál	Šířka materiálu [mm]	Rychlost řezání [m.min ⁻¹]	HAZ [mm]	Výkon [kW]
Sklotextil	1,5	3	0,25	0,4
	12,7	4,6	0,63	20
Nástrojová ocel	3	1,7	0,2	0,4
Ocel pro zušlechťování	1,2	4,6	0,2	0,4
Titan	1	7,5	0,5	0,6
Korozivzdorná ocel	1,3	4,6	0,2	0,4
	2,5	1,27	0,25	0,4
	4,7	1,27	0,2	20

3.2.2 Proces zhotovování vzorků

Řezání vzorků z tenčího plechu probíhalo 10. 1. 2014 a z plechu o tloušťce 2,57 mm 7. 2. 2014 na stroji *Winbro Delta* (viz obr. 16). Robustní konstrukce stroje zajišťuje potřebnou stabilitu pro přesný provoz a to i v případě extrémně velkých součástí (průměr do 1900 mm, výška do 500 mm a hmotnost do 500 kg). Tento stroj má řídicí systém *Heidenheim iTNC 530* a PC řídicí systém. Disponuje kapacitním snímáním vzdálenosti trysky, kontaktním sondováním a havarijním systémem ochrany. V tomto stroji je možnost 3D řezání a integrace CAM softwaru [10].



Obr. 16 Stroj na řezání laserem: *Winbro Delta* [10].

Při samotném řezání byla za konstantního výkon (500 W pro plech tloušťky 1,02 mm a 1000 W pro plech tloušťky 2,57 mm) měněna rychlost posuvu a následně při stálé rychlosti ($2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro tenký plech a $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ pro široký plech) byly použity různé výkony (viz tab. 6 – 9).

Při řezání bylo vidět, že rýhy, vzniklé na řezaných plochách při průchodu paprsku materiálem, jsou rovnoběžné s osou paprsku. Drsnost je definována jejich hloubkou. Se zvyšující tloušťkou materiálu byly rýhy hlubší.

Na spodní hraně řezu se vyskytovala ulpívající struska (otřepy). Na spodní hranu se dostávala díky procesnímu plynu, který vyfukoval natavený materiál pryč z řezu. Ten pak chladnul mimo materiál na spodní hraně. K odstranění otřepu je potřeba dalších operací. Konkrétní postup je volen podle druhu otřepů. Ty mohou být:

- drobné otřepy (jde snadno odstranit);
- ostré nebo tvrdé otřepy (odstraňují se dalšími operacemi).

3.2.3 Dosažené výsledky

Tabulka 6 Výsledky měření pro plech tloušťky 1,02 mm při konstantním výkonu stroje 500 W.

Rychlost [mm.min ⁻¹]	Doba řezu [s]	Odchylka od rozměru 1* [mm]	Odchylka od rozměru 2* [mm]
500	57	-0,04	+ 0,02
1000	35	+ 0,02	+ 0,01
1500	29	+ 0,02	+ 0,05
2000	27	+ 0,18	+ 0,03

* Rozměr 1 a rozměr 2 jsou rozměry dvou na sebe kolmých stran naší řezané součásti (viz obr. 13). U vodního paprsku byl jmenovitý rozměr 35,2 mm a u laseru 40 mm. Vodní paprsek je menší z důvodu chybně nastaveného měřítka při řezání.

Tabulka 7 Výsledky měření pro plech tloušťky 1,02 mm při konstantní řezné rychlosti 2000 mm.min⁻¹.

Výkon [W]	Doba řezu [s]	Odchylka od rozměru 1* [mm]	Odchylka od rozměru 2* [mm]
250	27	-	-
500	27	+ 0,18	+ 0,03
750	27	+ 0,07	- 0,04
1000	27	- 0,04	- 0,14

* Rozměr 1 a rozměr 2 jsou rozměry dvou na sebe kolmých stran naší řezané součásti (viz obr. 13). U vodního paprsku byl jmenovitý rozměr 35,2 mm a u laseru 40 mm. Vodní paprsek je menší z důvodu chybně nastaveného měřítka při řezání.

Tabulka 8 Výsledky měření pro plech tloušťky 2,57 mm při konstantní rychlosti 900 mm.min⁻¹.

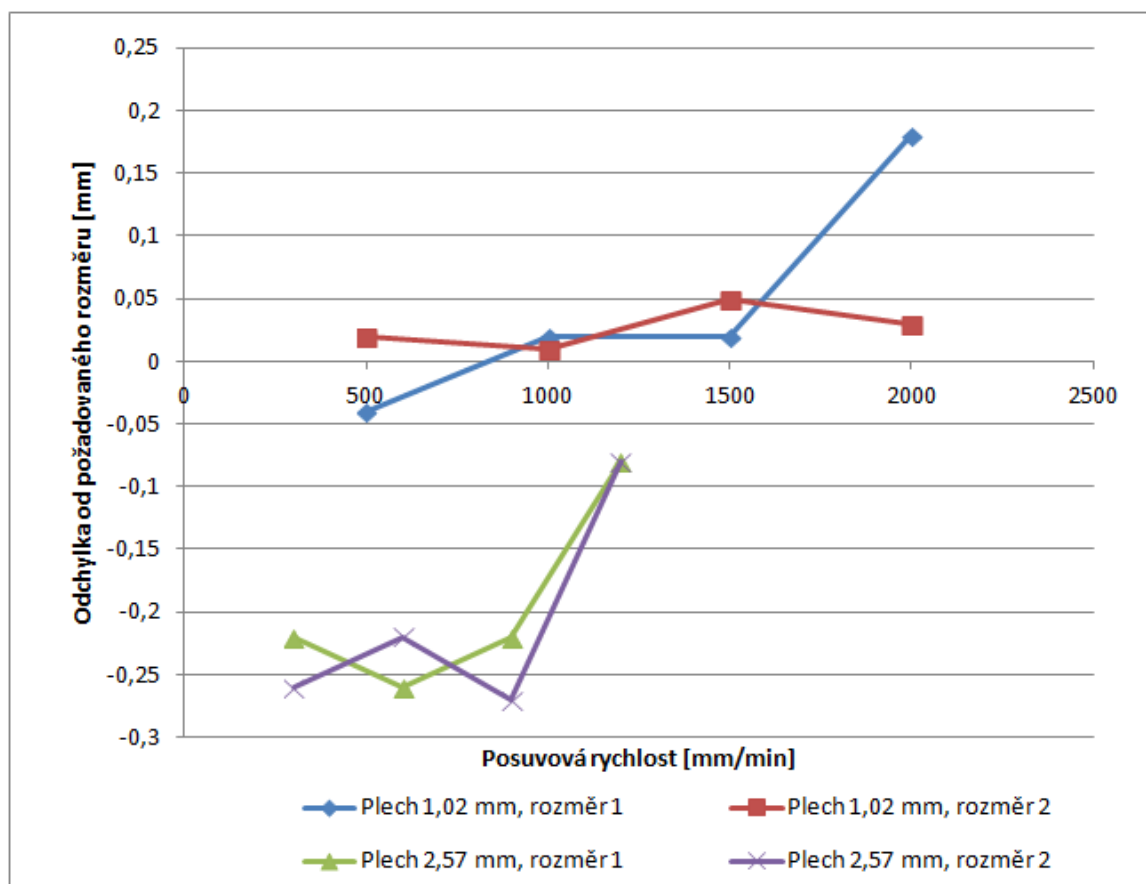
Výkon [W]	Doba řezu [s]	Odchylka od rozměru 1* [mm]	Odchylka od rozměru 2* [mm]
800	36	+ 0,02	- 0,06
900	36	- 0,14	- 0,18
1000	36	- 0,22	- 0,27
1100	36	- 0,25	- 0,16

* Rozměr 1 a rozměr 2 jsou rozměry dvou na sebe kolmých stran naší řezané součásti (viz obr. 13). U vodního paprsku byl jmenovitý rozměr 35,2 mm a u laseru 40 mm. Vodní paprsek je menší z důvodu chybně nastaveného měřítka při řezání.

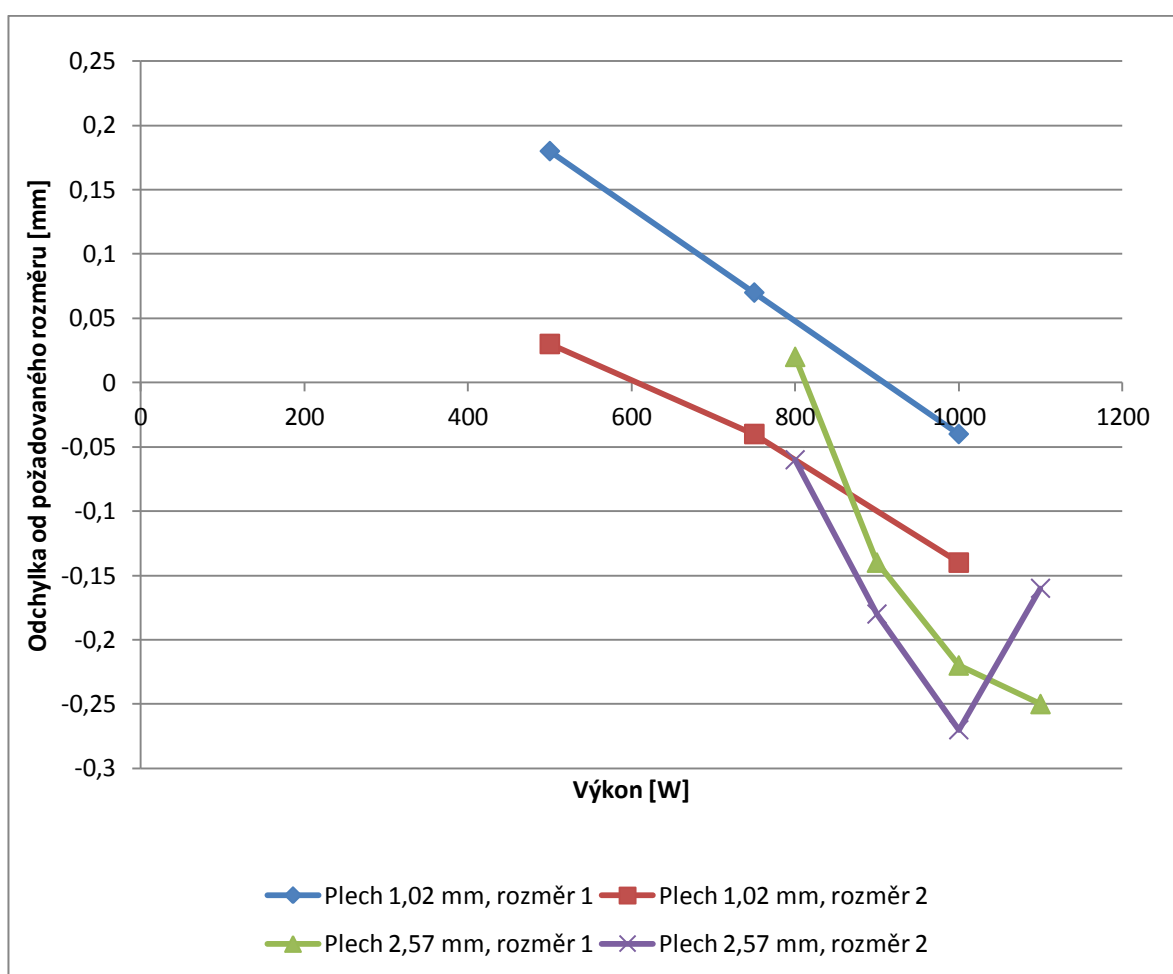
Tabulka 9 Výsledky měření pro plech tloušťky 2,57 mm při konstantním výkonu stroje 1000 W.

Rychlost [mm.min ⁻¹]	Doba řezu [s]	Odchylka od rozměru 1 * [mm]	Odchylka od rozměru 2* [mm]
300	77	- 0,22	- 0,26
600	46	- 0,26	- 0,22
900	36	- 0,22	- 0,27
1200	32	- 0,08	- 0,08

* Rozměr 1 a rozměr 2 jsou rozměry dvou na sebe kolmých stran naší řezané součásti (viz obr. 13). U vodního paprsku byl jmenovitý rozměr 35,2 mm a u laseru 40 mm. Vodní paprsek je menší z důvodu chybně nastaveného měřítka při řezání.



Obr. 17 Závislost odchylky od požadovaného rozměru na posuvové rychlosti.



Obr. 18 Závislost odchylky od požadovaného rozměru na výkonu.

4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A POROVNÁNÍ METOD

Na základě poznatků, zjištěných při řezání oběma nekonvenčními metodami, a následným zkoumáním nově vzniklých součástek mohou být vyvozeny určité výsledky. Na to, jak se tyto výsledky lišily od předpokladů, které byly sepsány v části 3.1.1 resp. 3.2.1 pomocí studia odborné literatury, jsou zaměřeny následující podkapitoly.

Následně byly porovnávány obě metody mezi sebou a také jednotlivé konfigurace strojů pro řezání, což bylo velmi důležité pro technology a bylo to jedním z požadavků společnosti Honeywell.

4.1 Zhodnocení výsledků

V této podkapitole je uvedeno, zda se výsledky praktické zkoušky lišily od odhadovaných hodnot.

4.1.1 Vodní paprsek

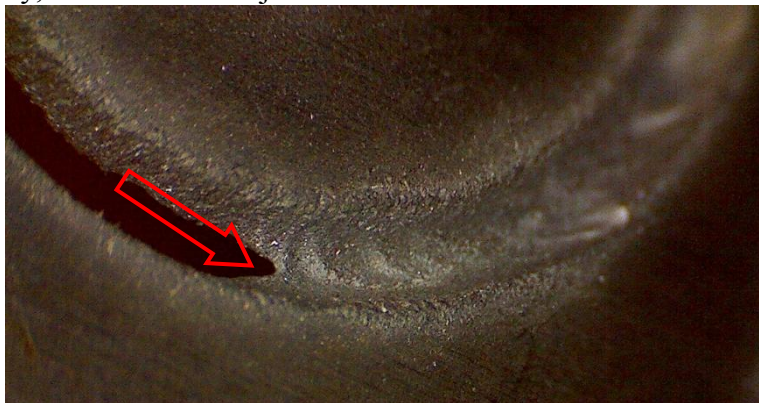
Vzhledem k rozbíhavosti paprsku vody došlo k tomu, že se na řezaných plochách vyskytoval úkos. Jakost řezané plochy se lišila podle stupně programu kvality řezu. Na všech však bylo patrné to, že byly obráběny abrazivní metodou, a i když byla řezaná plocha bez otřepů, byly na ní vidět nepravidelnosti, způsobené právě mechanickým obráběním pomocí abraziva (viz obr. 19). Nebylo patrné, že by byla řezaná plocha rozdělena do dvou zón, což byl jeden z původních předpokladů po přečtení odborné literatury.



Obr. 19 Řezaná plocha materiálu (o tloušťce 1,02 mm) po řezání metodou AWJ.

Odchyly od požadovaného rozměru byly v intervalu od mínus půl milimetru do půl milimetru, což bylo pokaždé pro *extra drsný* program kvality řezu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při *extra dobrém* programu řezání. U tenkého plechu byla odchylka 0,08 mm do záporných hodnot. Tlustší plech nebylo možné měřit pomocí NC souřadnicového přístroje, proto bylo k měření využito posuvného měřidla.

V tomto případě se dá jen konstatovat, že názvy programů řezání hovoří samy za sebe a technologové by tedy měli používat ten, který bude dostačující pro konkrétní úkon. Pro přibližnou hodnotu odchylky mohou být použity hodnoty z katalogu firmy PTV, nebo naměřené hodnoty, které se nacházejí v tabulkách 2 a 3.



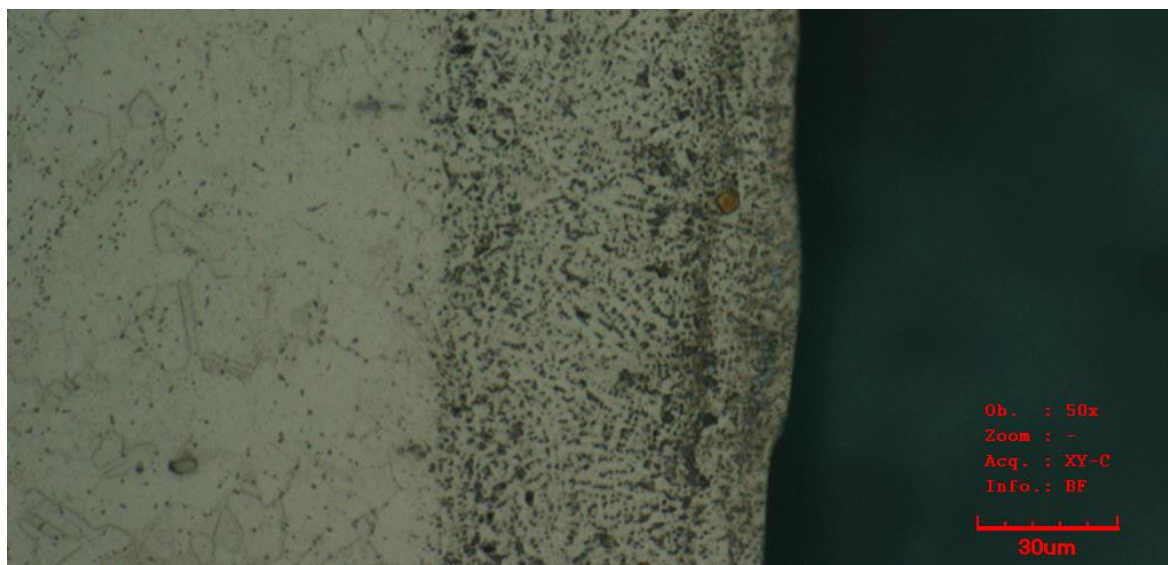
Obr. 20 Výrobek, u kterého nedošlo k úplnému prořezání.

Z pohledu na mikrostrukturu bylo vidět, že se objevila deformací ovlivněná oblast (viz obr. 21). Detailněji jsou změny mezi touto oblastí a oblastí neovlivněnou vidět na obr. 22. Vznik deformačně ovlivněné oblasti však nastal při řezání řezným programem s označením extra drsný. Při použití extra dobrého řezného programu tento nežádoucí jev nenastal (viz obr. 23).

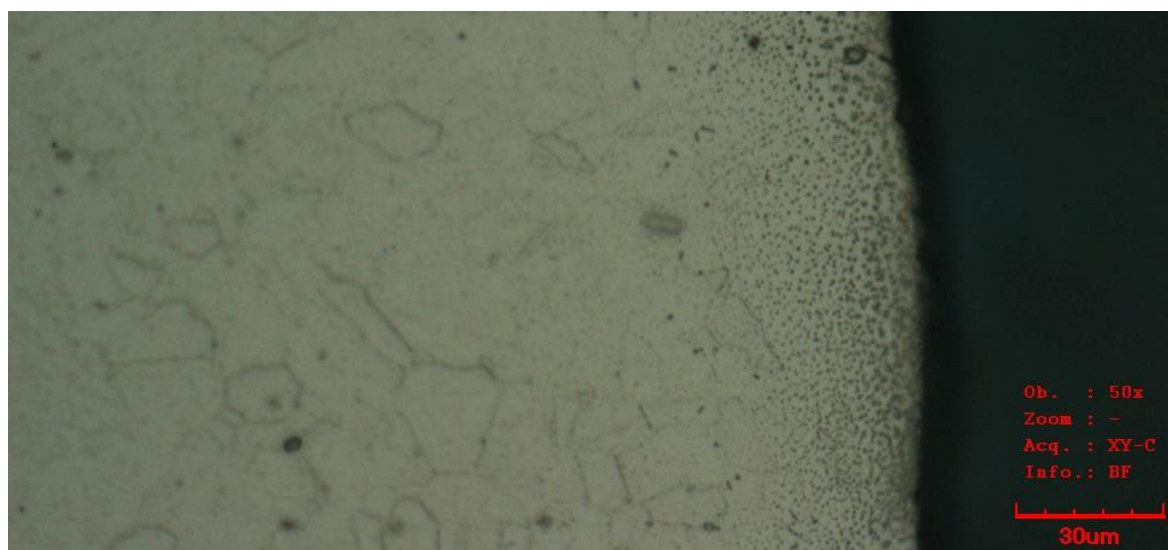
Deformačně ovlivněná oblast vzniká působením abraziva na řezaný materiál. Vzhledem k použití materiálu INCONEL, vlivem jeho materiálových charakteristik (především tažnosti) se tato deformací ovlivněná oblast projevila při určitých řezných podmínkách.



Obr. 21 Mikrostruktura vyrobené součásti při řezném programu extra drsný.



Obr. 22 Detail na oblast hrany ovlivněnou deformací, při řzném programu extra drsný.



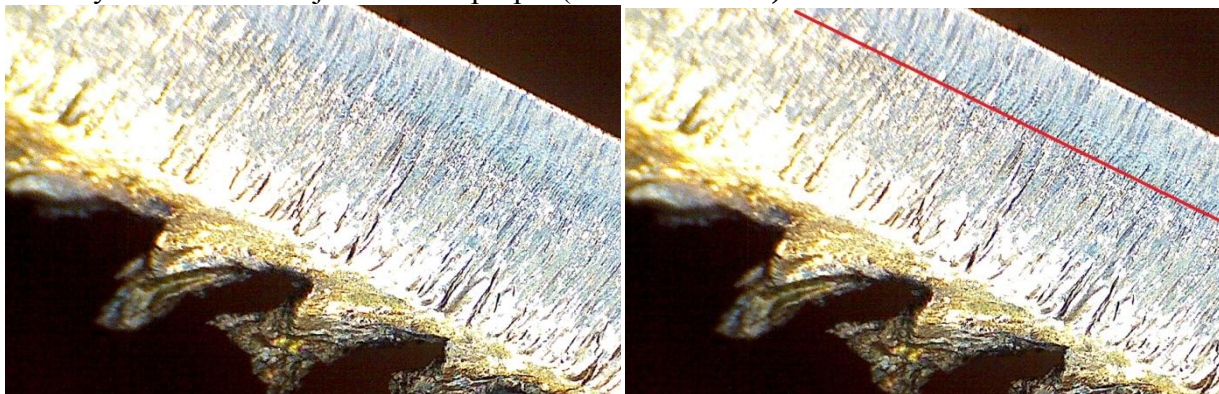
Obr. 23 Mikrostruktura vyrobené součásti při řzném programu extra dobrý.

4.1.2 Laser

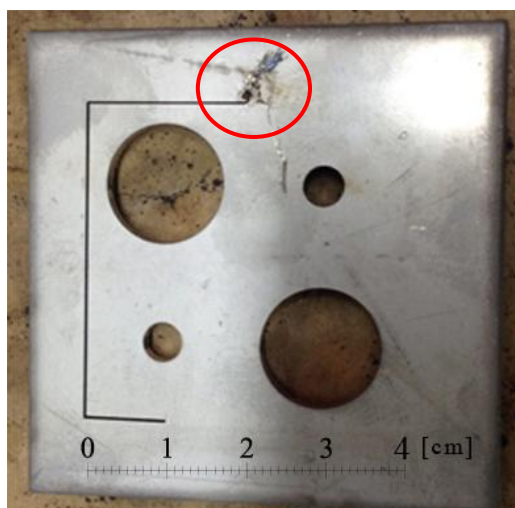
Z hlediska řezaných ploch bylo vše v souladu s údaji, uváděnými v odborné literatuře. Na řezaných plochách byly patrné rýhy, které se u plechu tloušťky 2,57 mm stáčejí (ve spodní části přibližně 0,4 mm tloušťky materiálu – hodnota závisí na procesních parametrech) v důsledku tečení materiálu. U plechů této tloušťky je patrná ulpívající struska (dále ozn. jako otřepy), což při výrobě způsobuje další náklady (jak časové, tak finanční) na opracování.

Tyto otřepy by se daly částečně eliminovat. Pro lepší jakost řezané plochy měl být fokus nastaven o něco více do materiálu (viz obr. 24). Ale i tak by u daného (staršího) stroje byly. U tenčího plechu problémy s otřepy nenastaly.

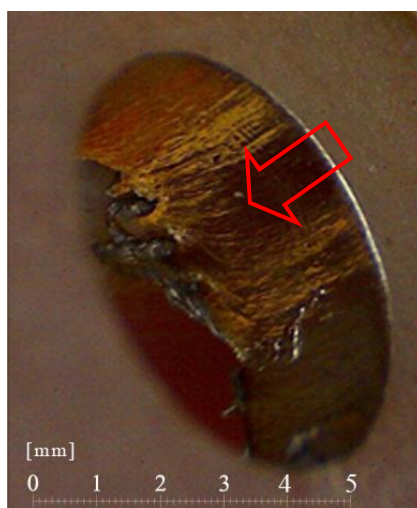
Kromě změny polohy ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku se dá řezný proces ovlivnit, jak už bylo řečeno, výkonem, rychlostí, dále pak tlakem a druhem plynů a transparentí (prostupností) fokusační optiky. U vyrobených součástí bylo možné na jedné z řezaných hran vidět nájezd a u děr propal (viz obr. 25 a 26).



Obr. 24 Znárodnění, kam byl laser fokusován (červená linka na obrázku vpravo - přibližně v 1/3 tloušťky plechu o tloušťce 2,57 mm).



Obr. 25 Nájezd na řezané hraně.



Obr. 26 Propal u díry menšího průměru ($\varnothing$ 3 mm).

Z pohledu přesnosti rozměrů byl laser velmi přesný. Při pohledu do tabulek 3 až 6 bylo patrné, že nejvyšší odchylka od požadovaného rozměru je 0,26 mm do záporných hodnot. Tohoto výsledku bylo dosaženo na plechu tloušťky 2,57 mm při rychlosti 300 mm.min⁻¹ a výkonu 1000 W. Tento výsledek byl největší odchylkou z měřených hodnot, většina výsledků se vyskytovala v tolerančním poli $\pm 0,25$ mm.

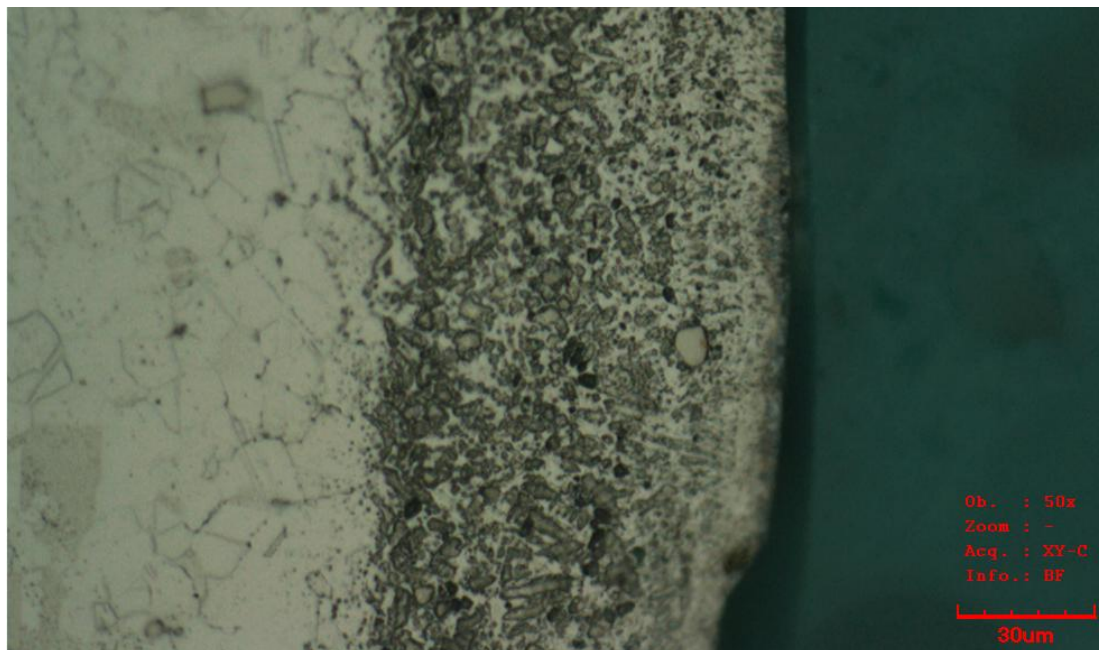
Nejpřesnější řez byl proveden na plechu tloušťky 1,02 mm při výkonu 500 W a rychlosti 1000 mm.min⁻¹. Hodnota této odchylky byla 0,01 mm.

Vzhledem k přesnosti a rychlosti řezání (celkový čas se od nejrychlejšího lišil asi o 4 sekundy) by bylo vhodné obrábět plech tloušťky 1,02 mm výkonem 500 W a rychlosti 1000 mm.min⁻¹ a plech o tloušťce 2,57 mm výkonem 800 W a rychlosti 900 mm.min⁻¹.

Vyhodnocení pomocí mikroskopu ukázalo, že při vhodně zvolených parametrech bylo možné se vyvarovat vzniku tepelně ovlivněné oblasti (viz obr. 29). Tyto parametry byly pro plech tloušťky 2,57 mm voleny tak, že posuvová rychlost byla 900 mm.min⁻¹ a výkon byl 1100 W. Na druhou stranu, pro ten samý plech, ale při rychlosti 300 mm.min⁻¹ a výkonu 1000 W se tepelně ovlivněná oblast objevila, ale byla do 100 μ m (viz obr. 27). Rozdíl struktury materiálu neovlivněného a tepelně ovlivněného je vidět na obr. 28.



Obr. 27 Mikrostruktura vyrobené součásti při posuvové rychlosti 300 mm.min⁻¹ a výkonu 1000 W.



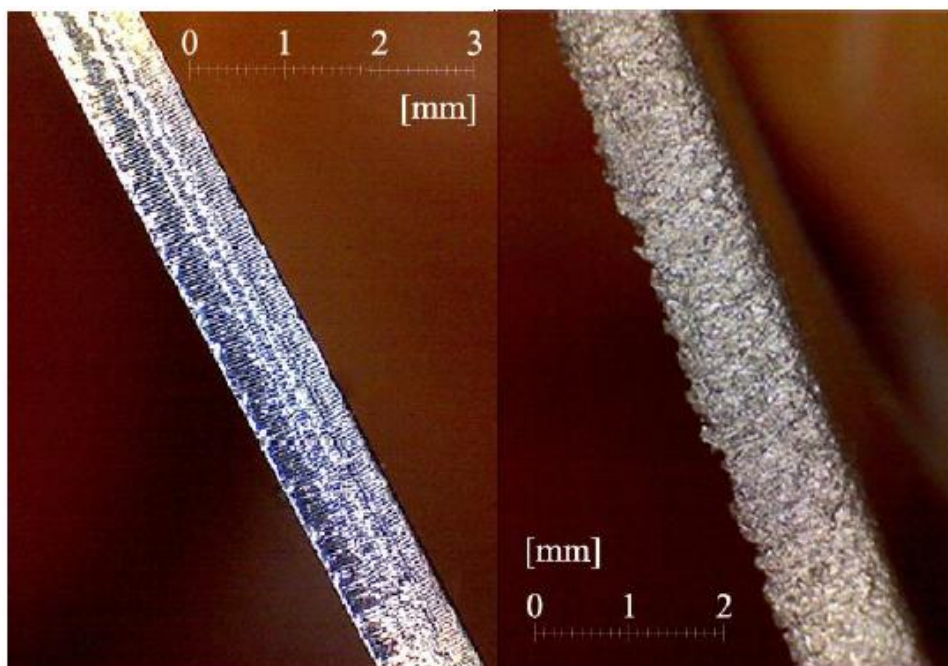
Obr. 28 Detail na oblast hrany tepelně ovlivněnou, při posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a výkonu 1000 W .



Obr. 29 Mikrostruktura vyrobené součásti při posuvové rychlosti $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a výkonu 1100 W .

4.2 Porovnání metod

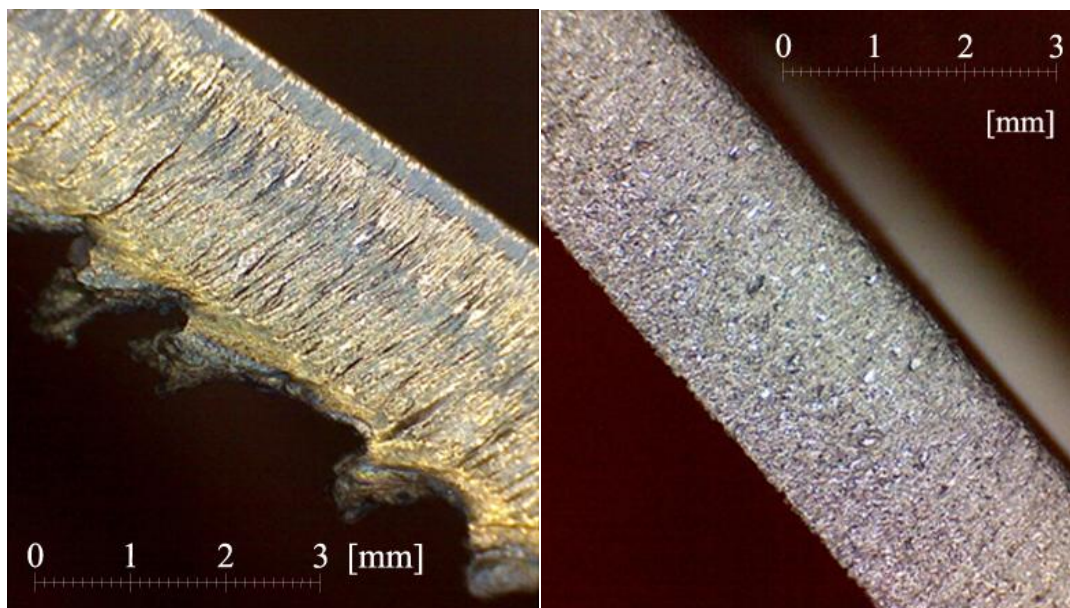
Porovnání na základě praktické zkoušky dopadlo podle očekávání technologů na obou pracovištích. Plechy tloušťky 1,02 mm by bylo lepší řezat laserem. Jakost řezaných ploch byla lepší a na spodní hraně se netvořily tvrdé otřepy (viz obr. 30). Rozměrová přesnost také vypovídala pro laser. Tepelně ovlivněná oblast nebyla u této tloušťky plechu nijak zvlášť patrná. Snad jen jedinou nevýhodou bylo to, že musely být připraveny polotovary, které se vyrobily stříháním. Polotovary byly při řezání upnuté do svěráků, což u této tloušťky plechu mohlo být problém. Při použití větší síly při utahování by se mohl plech ohnout, což by znamenalo rozměrovou nepřesnost. Díky správnému upnutí tato situace nenastala a bylo tedy možné bez problémů vyřezat přesnou součást.



Obr. 30 Řezaná plocha vyrobené součásti z plechu tloušťky 1,02 mm po řezání laserem (vlevo) a abrazivním vodním paprskem (vpravo).

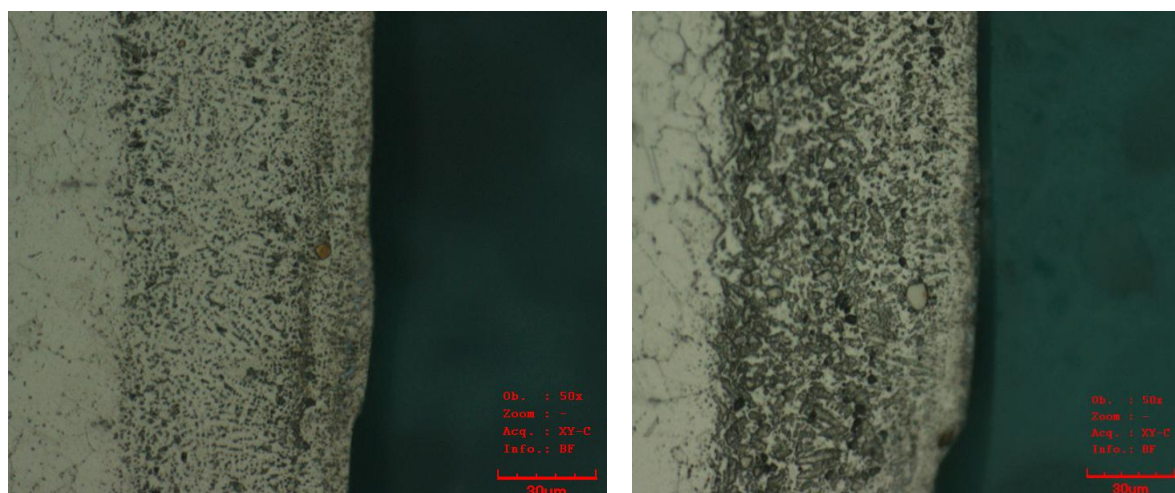
U plechu tloušťky 2,57 mm naopak dominoval vodní paprsek. Nemuselo by tomu tak být vždy, ale stroj, na kterém bylo řezání laserem prováděno, byl starší a některá nastavení (např. fokus) jsme nechali na původních hodnotách. Laser byl sice přesnější, ale otřepy, které zůstávaly na spodní řezané hraně, byly velké a muselo by dojít ještě k dalšímu opracování součástí (viz obr. 31). Na druhou stranu, naše součásti byly tak malé, že musely být, při řezání abrazivním vodním paprskem, opatřeny můstkem, aby nepropadly do lapače vody. Náročnost na opracování je však mnohonásobně nižší. Kvalita povrchů řezaných ploch utrpěla vlivem tečení materiálu. Navíc by se zde měla vyskytovat tepelně ovlivněná oblast (viz tab. 5). To se však při praktické zkoušce nepotvrdilo (řezné podmínky byly jiné, než ty, při kterých byly pořízeny hodnoty v dané tabulce). Jelikož se polotovary pro laserové řezání nemohly vyrobit stříháním (kvůli tloušťce plechu), byly stejně pro daný účel připravovány pomocí vodního paprsku. Za stávajících strojních podmínek by měl být volen pro řezání plechů o tloušťce 2,57 mm vodní paprsek.

Jelikož pomocí vodního paprsku může být řezána až desetkrát větší tloušťku než laserem, nebyl tento výsledek překvapivý. Laser se více hodí na tenčí plechy a vodní paprsek naopak na plechy větší tloušťky.



Obr. 31 Řezaná plocha vyrobené součásti z plechu tloušťky 2,57 mm po řezání laserem (vlevo) a abrazivním vodním paprskem (vpravo).

Při porovnávání laseru a vodního paprsku z hlediska ovlivněných oblastí, byly na tom obě technologie podobně (viz obr. 32). U obou se vyskytovala ovlivněná oblast malá, nebo se, při správně zvolených procesních parametrech, nevyskytovala vůbec. I když to laicky vypadá, že čím déle probíhalo řezání laserem, respektive čím kratší dobu probíhalo řezání vodním paprskem, tím by měla být ovlivněná zóna větší. Není tomu tak. Záleží na optimalizaci parametrů, které jsou různé pro různé tloušťky. Co se týče laseru, lze volit z více kombinací, než je tomu u vodního paprsku.



Obr. 32 Pohled na deformačně ovlivněnou oblast po řezání abrazivním vodním (vlevo) a tepelně ovlivněnou oblast po řezání laserem (vpravo) součásti z plechu tloušťky 2,57 mm.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na srovnání dvou nekonvenčních metod obrábění.

Na základě rešeršní části mohu konstatovat, že:

- vodní paprsek je progresivní technologií, mezi jejíž výhody patří vysoká energetická účinnost, teplota do 50 °C při obrábění, řez je bez otřepů, bohužel je provoz doprovázen značným hlukem a na řezaných plochách se vyskytují úkosity;
- laser má širokou škálu použití (i mimo průmysl) a to díky specifickým vlastnostem, mezi které patří přesnost, řezná rychlost, kvalita řezaných ploch, čistý a tichý provoz, chemická čistota paprsku a další, na druhou stranu finanční nároky na pořízení stroje a asi jen 10 % účinnost dávají prostor k vylepšování a inovacím.

Na základě dosažených výsledků praktické části této práce mohu konstatovat, že:

- plechy tloušťky 1,02 mm vykazovaly lepší jakost i přesnost při řezání laserem, byly bez otřepů a úkosů;
- vodní paprsek se při řezání plechů tloušťky 2,57 mm osvědčil díky tomu, že na výrobcích nevznikaly otřepy (při řezání laserem vznikaly, protože stroj pro řezání laserem je starší a nemá dostatečný výkon);
- velikost odchylky od požadovaného rozměru při řezání vodním paprskem se snižovala s větší přesností řezného programu (při řezném programu *extra drsný* byla největší, při *extra dobrém* byla nejmenší);
- závislost velikosti odchylky od požadovaného rozměru na výkonu byla u tenčích plechů (1,02 mm) téměř lineární a pohybovala se od kladných do záporných hodnot, u plechů větší tloušťky (2,57 mm) byla závislost nelineární;
- při zvyšování posuvové rychlosti v použitém rozmezí byla u plechů tloušťky 2,57 mm nejmenší odchylka při nejvyšší rychlosti (1200 mm.min⁻¹), závislost by bylo možné aproximovat nelineární funkcí;
- závislost odchylky od požadovaného rozměru na posuvové rychlosti u plechů tenčích (1,02 mm) by bylo možné aproximovat lineární funkcí stoupající (hodnoty jdou ze záporných hodnot do kladných a nejmenší odchylka je při rychlosti 1000 mm.min⁻¹);
- otřepy, vzniklé při řezání laserem plechu tloušťky 2,57 mm, byly tvrdé a musely být odstraněny dalšími operacemi, což prodloužilo celý proces výroby a také prodražilo;
- při řezání oběma technologiemi došlo k vzniku nežádoucí tepelně respektive deformačně ovlivněné zóny u laseru (při nejnižší posuvové rychlosti) respektive vodního paprsku (při řezném programu *extra drsný*);
- na základě změny řezných parametrů je možné tepelně i deformačně ovlivněnou zónu minimalizovat či úplně eliminovat;
- snímky mikrostruktury neukazují přesnou strukturu v okolí místa řezu, je tam však vidět odlišná reakce na leptání, což nám umožnilo vidět tloušťku ovlivněné oblasti.

Pro další výzkum doporučuji řezat plechy stejných nebo podobných tloušťek při stejných parametrech, jako jsou v této práci (z důvodu možnosti srovnání), měnit tlak plynu při řezání laserem či vodním paprskem, nebo u laseru měnit fokus. Naopak by bylo možné řezat plechy o větší tloušťce (např. 5 až 20 mm) a sledovat přesnost a ovlivněnou vnitřní strukturu. Musel by však být použit jiný stroj pro řezání laserem než ten, kterým byly řezány výrobky v této práci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [2] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [3] VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Vyd. 1. Ostrava: Ámos, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [4] HLA VATÝ, Ivo. VŠB – Technická univerzita Ostrava [online][cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>
- [5] Castle metals. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.castlemetalsuk.com/cutting-profiling/laser-cutting/>.
- [6] HIREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1.vyd. Jirí Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [7] KUBÁTOVÁ, Jitka a Ivo LUKEŠ. *Laserové technologie opracování kovových materiálů*. Dobrá u Frýdku-Místku: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1988, 36 s.
- [8] NASA. [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/>.
- [9] Flow [online]. 2011 [cit. 2011-01-15]. History. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>.
- [10] Direct industry: Winbro group technologies. [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/winbro-group-technologies/5-axis-cnc-laser-drilling-machines-22993-396058.html>.
- [11] PTV: Vysokotlaký vodní paprsek. [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/jnp/cz/produkty/>.
- [12] OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. OPUS – Vzdělanostní síť I výrobním technologiím. *Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz>.
- [13] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [14] KOCMAN, K a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1992-2.
- [15] HUMÁR, Anton. *Technologie I-Technologie obrábění-3.část* [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf.
- [16] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi* WJM. 1. Vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [17] KULEKCI, Mustafa Kemal. *Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications*: . International Journal of Machine Tools and Manufacture. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550200069X>.
- [18] Talpa-rfv.: Řezeme vodou. [online]. [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>.
- [19] HONEYWELL: Aerospace Olomouc s.r.o. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://honeywell.com/Products-Services/Pages/aerospace-defense.aspx>.
- [20] DVOŘÁK, Jaromír a Jana DVOŘÁKOVÁ. Glassrevue: Technika, technologie. [online]. 15/2008. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>.

- [21] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. ISBN A240494.
- [22] SOCHOR, Václav. *Lasery a koherentní svazky*. 1. vyd. Praha: Academia, 1990, 195 s. ISBN 80-200-354-1.
- [23] BENKO, B., et al. *Laserové technologie*. 1. vyd. Bratislava: Tribun EU s.r.o. 2011. 107 s. ISBN 978-80-7399-379-5.
- [24] LaserArt. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://laserart.wbs.cz/Historie-laseru.html>.
- [25] VRBOVÁ, Miroslava, Petr GAVRILOV a Helena JELÍNKOVÁ. *Úvod do laserové techniky*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1994, 233 s.
- [26] ŘASA, Jaroslav, Vladimír GABRIEL a Přemysl POKORNÝ. *Strojírenská technologie 3*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2001, 221 s. ISBN 80-7183-227-8.
- [27] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. MM Průmyslové spektrum. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>.
- [28] Norma ČSN EN 12584 (05 3402), *Vady při řezání kyslíkem, laserem, plasmou – terminologie*, duben 2001.
- [29] Teskolaser: Laser division. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: http://www.teskolaser.com/waterjet_cutting.html.
- [30] Abrasive waterjet cutting: Application and Capability. [online]. [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.accustream.com/pdf/waterjet-cutting-white-papers.pdf>.
- [31] DVOŘÁK, Milan et al. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [32] ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>.
- [33] NOVÁK, Miroslav. MM Průmyslové spektrum. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vlaknove-lasery-v-prumyslovem-znaceni.html>.
- [34] Bit Tooth Energy. [online]. [cit. 2014-04-07]. Dostupné z: http://bittooth.blogspot.cz/2012_12_01_archive.html.
- [35] ŠULC, J.: *Lasery a jejich aplikace*. [online]. [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>.
- [36] MIČETOVÁ, A.; MAŇKOVÁ, I.; VELIŠEK, K. *Top trendy v obrábění V : Fyzikálne technologie obrábania*. Žilina : Medial/ST s.r.o., 2007. 232 s. ISBN 8096895472.
- [37] KUSALA, Jaroslav. Lasery kolem nás [online]. ČEZ a.s., 2004 , [cit. 2008-04-05]. Dostupný z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>.
- [38] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. MM Průmyslové spektrum. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>.
- [39] ZATLOUKAL, Petr. *Laserové svařování* [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://welding.cz/laser/svarovani.htm>.
- [40] BOUDA, Luděk. MM Průmyslové spektrum. [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
- [41] Centrum laserových a automatizačních technologií: Rozdělení laserů. [online]. [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Jednotka	Popis
Al_2O_3	[-]	oxid hlinitý (korund)
AWJ	[-]	abrazivní vodní paprsek
CAM	[-]	computer Aided Manufacturing, (počítačová podpora obrábění)
Cd	[-]	kadmium
CD – ROM	[-]	nepřepisovatelné optické záznamové médium
CNC	[-]	computer numeric control (počítačové číslicové řízení)
CO	[-]	oxid uhelnatý
CO_2	[-]	oxid uhličitý
Cr	[-]	chrom
Er:YAG	[-]	erbium: yttrium–aluminium–granát
HAZ	[-]	tepelně ovlivněná zóna
He-Ne	[-]	helium neonový
LED	[-]	light-Emitting Diode (dioda emitující světlo)
NASA	[-]	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku v USA
NC	[-]	numeric kontrol (číslicové řízení)
Nd:YAG	[-]	neodym: yttrium–aluminium–granát
Nd:YLF	[-]	neodym: lithium–yttrium–fluorid
PAA	[-]	polyakrylamid
Pb	[-]	olovo
PEO	[-]	polyetyloxid
Se	[-]	selen
Sn	[-]	cín
WJM	[-]	vodní paprsek
Zn	[-]	zinek
p-n	[-]	oblast na typu P a polovodiče typu N
s.r.o.	[-]	společnost s ručením omezeným

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
E_F	[J]	energie dopadajícího fotonu
E_1	[J]	stabilní energetický stav
E_2	[J]	nestabilní energetický stav
L	[mm]	vzdálenost mezi zrcadly
P	[kW], [W]	příkon
P	[kW], [W]	výkon
Q	[dm ³ .min ⁻¹]	průtok
R_a	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
S	[m ²], [dm ²], [cm ²], [mm ²]	činná plocha
S'	[m ²], [dm ²], [cm ²], [mm ²]	činná plocha
T	[°C]	teplota
d	[cm], [mm]	délka, tloušťka
F	[Hz]	frekvence fotonu
h	[J.s]	Planckova konstanta ($\sim 6,62606896 \cdot 10^{-34}$ J.s)
M	[kg]	hmotnost
n	[-]	přirozené číslo
p	[MPa], [Pa], [bar]	tlak
p'	[MPa], [kPa], [Pa], [bar]	tlak
t	[s]	čas
v_a	[g.min ⁻¹]	rychlost přivádění abraziva
v_c	[m.min ⁻¹], [m.s ⁻¹], [mm.min ⁻¹]	řezná rychlost, posuvová rychlost
η_M	[-]	koeficient ztrát pro výpočet tlaku
λ	[nm]	vlnová délka

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Kompletní fotodokumentace z mikroskopu a zvětšovací optiky (CD)