

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nekonvenční metody obrábění při výrobě malých otvorů

Autor: **Libor Suchánek**
Vedoucí práce: **Ing. Ivana Česáková**

Akademický rok 2013/2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Libor SUCHÁNEK**
Osobní číslo: **S13B0222K**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Nekonvenční metody obrábění při výrobě malých otvorů**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vhodné metodiky obrábění
4. Závěr

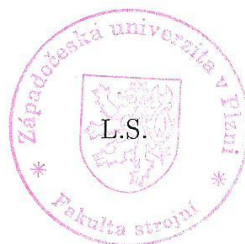
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

Astakhof, Viktor P., Tribology and interface engineering series, Elsevier, 2006, ISBN 0-444-52881-4
Shaw, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3
Juneja, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7
Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Česáková**
Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Ivana Česáková**
Katedra technologie obrábění

Datum zadání bakalářské práce: **6. února 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. listopadu 2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ivaně Česákové za odbornou pomoc při řešení experimentální části, za cenné připomínky a podněty poskytnuté během vypracovávání zvoleného tématu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení SUCHÁNEK	Jméno Libor	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie-technologie obrábění		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. ČESÁKOVÁ	Jméno Ivana	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Nekonvenční metody obrábění při výrobě malých otvorů		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	62	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

STRUČNÝ POPIS	První část bakalářské práce popisuje nekonvenční metody obrábění vhodné pro vrtání malých otvorů. Druhá část práce je praktická. Obsahuje výsledky vyvrtaných otvorů čtyřmi různými metodami do ocelového vzorku. Vytvořené otvory jsou porovnány z různých hledisek.
KLÍČOVÁ SLOVA	Laser, Vodní paprsek, EDM, EMJ, Vrtání

SUMMARY OF BACHELORWORK

AUTHOR	Surname SUCHÁNEK	Name Libor
FIELD OF STUDY	Department of Machining Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. ČESÁKOVÁ	Name Ivana
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Unconventional methods of machining in the production of small holes	
	Delete when not applicable	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2014
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	62	GRAPHICAL PART	0
BRIEF DESCRIPTION	First part of bachelor thesis contains a description of unconventional methods of small holes machining. Second part of the thesis includes results of drilling holes. Each hole was drilled by different method to the same steel blank. Holes are compared from different aspects.				
KEY WORDS	Laser, Water jet, EDM, EMJ, Drilling				

Obsah

Obsah	8
Seznam zkratk	10
1 Úvod[24,25,26,27]	11
2 Rozbor současného stavu – vhodné metody	12
2.1 Vodní parsek[1]	12
2.1.1 Historie[1].....	12
2.1.2 Výhody[1,2].....	13
2.1.3 Ekologie[1]	13
2.1.4 Nevýhody[3]	14
2.1.5 Rozdíly mezi čistým vodním paprskem a abrazivním paprskem[1,2]	14
2.1.6 Kvalita řezu[3]	15
2.1.7 Abrazivo[5,17,18].....	16
2.2 Laserový paprsek[7]	18
2.2.1 Historie[6,7].....	18
2.2.2 Konstrukce laseru[7,8].....	19
2.2.3 Rozdělení laserů[7,9,12,13,14]	20
2.2.4 Vrtání laserem[10]	23
2.3 LMJ – Laser Micro Jet[15,16]	25
2.4 EDM - Electric Discharge Machining	28
2.4.1 Historie[22,23].....	28
2.4.2 Princip metody[22,23,24]	28
2.4.3 Části technologie[23,24].....	29
3 Návrh vhodných metod obrábění – vrtání do ocelového vzorku	31
3.1 Vrtání laserem.....	31

3.1.1	Detaily horní a dolní části otvorů - laser	32
3.2	Vrtání vodním paprskem	34
3.2.1	Detaily horní a dolní části otvorů – vodní paprsek.....	36
3.3	Vrtání EDM	37
3.3.1	Detaily horní a dolní části otvorů - EDM	38
3.4	Vrtání vrtákem	39
3.4.1	Detaily horní a dolní části otvorů – vrták HSS.....	39
3.5	Skeny otvorů	40
3.6	Měření otvorů	42
3.6.1	Princip měření dotykovou sondou[19,20,21]	42
3.6.2	Měření průměrů otvorů v dolní a horní části	44
3.7	Měření na přístroji Infinite Focus G4 (IFM)	49
3.7.1	Měření drsnosti povrchu	50
3.7.2	Odchyly od povrchu ideálního válce otvorů.....	52
3.7.3	Ekonomická náročnost.....	53
3.7.4	Shrnutí výhod a nevýhod při vrtání do daného vzorku.....	55
4	Závěr.....	56
5	Seznam použité literatury.....	58
6	Seznam obrázků	60
7	Seznam grafů.....	61
8	Seznam tabulek	61

Seznam zkratek

TOO	-	Tepelně ovlivněná oblast
LMJ	-	Laser Micro Jet (Laserový mikro paprsek)
EDM	-	Electric Discharge Machining (Elektroerozivní obrábění)
Ra	-	střední aritmetická hodnota profilové drsnosti [μm]
Rz	-	maximální výška profilu [μm]
Sa	-	střední aritmetická hodnota plošné drsnosti [μm]
Sz	-	maximální výška plochy [μm]
Sq	-	střední kvadratická hodnota plošné drsnosti [μm]
\varnothing	-	průměr [mm]
n	-	otáčky [min^{-1}]
f	-	posuv [mm/min]
v	-	řezná rychlost (rychlost posunu trysky laseru a vody) [mm/min]
HSS	-	High speed steel (rychlořezná ocel)
Kč	-	Koruna česká
p	-	tlak [bar]
R	-	poměrná odrazivost [-]
t	-	čas [s]
$\varnothing\text{Dd}$	-	průměr trysky u LMJ [mm]
$\varnothing\text{Ds}$	-	průměr paprsku LMJ [mm]
Horní část (\varnothing) otvoru	-	vstupní část (\varnothing) otvoru
Dolní část (\varnothing) otvoru	-	výstupní část (\varnothing) otvoru
I.	-	první vyvrtaný otvor jednotlivými metodami
II.	-	druhý vyvrtaný otvor jednotlivými metodami
Laser MAX	-	řezná rychlost posunu paprsku $v = 2600$ [mm/min]

1 Úvod[24,25,26,27]

Tato bakalářská práce se bude zabývat výrobou malých otvorů pomocí nekonvenčních metod obrábění. Při vrtání otvorů nekonvenčními metodami, nevzniká klasická tříska, jako při vrtání vrtákem. K úběru materiálu není využíváno silové působení na obrobek, ale materiál je odstraňován účinky tepelnými, chemickými, abrazivními nebo jejich kombinací. Mezi nekonvenční metody obrábění patří: elektroerozivní obrábění, elektrochemické a chemické obrábění, obrábění laserem, obrábění vodním paprskem, obrábění ultrazvukem, obrábění plazmou, obrábění paprskem elektronů[25]. Význam nekonvenčních metod obrábění postupem času významně stoupá, což je ovlivněno několika důvody. Jedním z důvodů je schopnost obrábění těžkoobrobitelných materiálů, které se využívají v průmyslu stále častěji. Dalšími důvody rozmachu nekonvenčních metod jsou: možnost obrábění složitých tvarů, výroba miniaturních součástí nebo možnost plně automatizovat obrábění. Nekonvenční metody nahrazují obrábění řeznými nástroji tehdy, když řezné nástroje nejsou schopné daný tvar nebo materiál obrobit nebo nejsou výhodné z ekonomického hlediska.

Pokroky v oblasti zdravotnických zařízení, optiky, elektroniky, počítačů a dalších průmyslových odvětví vytvořily potřebu výroby otvorů, které budou rovnější, přesnější, kvalitnější a v mnoha případech budou mít menší průměr než lidský vlas. Těchto otvorů s vysokými nároky na rozměrovou přesnost, kvalitu a dalšími nároky lze dosáhnout díky nekonvenčním metodám.

Cíl této bakalářské práce je popsat vhodné nekonvenční metody pro vrtání malých otvorů. Další cíl práce je experimentální vyvrtání malých otvorů do vybraného materiálu různými nekonvenčními metodami podle dostupnosti. Po vyvrtání otvorů bude úkol stanovit kvalitu otvorů na základě měření různých parametrů jako např.: \varnothing otvorů, kruhovitosti, sousostí nebo drsnosti uvnitř otvorů. Kvalitu otvorů není možno stanovit jen z naměřených hodnot, proto k celkovému posouzení kvality využijeme i vizuální pohled na snímky otvorů pořízených mikroskopem a přístrojem IFM. Při výběru metody vrtání do obrobku v technické praxi je nutné zvážit i ekonomické hledisko a ne jen kvalitu otvorů. Proto je třeba zjistit i cenovou náročnost jednotlivých metod vrtání.

2 Rozbor současného stavu – vhodné metody

Pro výrobu malých otvorů jsou vhodné následující metody: vodní paprsek, laserový paprsek, EDM, LMJ. V této kapitole budou jednotlivé metody představeny podrobněji a to zejména jejich principy, výhody, nevýhody, rozdělení a zmíněna bude i historie jednotlivých metod.

2.1 Vodní paprsek[1]

Vodní paprsek je průmyslový nástroj schopný obrábět široké spektrum materiálů, za použití vysokotlakého proudu vody nebo směsi vody a abrazivní látky. Abrazivní látky se využívá při obrábění tvrdých materiálů. Pro řezání vodním paprskem bez přidaného abraziva se používá pro řezání měkkých materiálů, jako jsou dřevo, guma, polystyren.

Často se používá při výrobě strojních součástí. Je to výhodný způsob pro obrábění, když je materiál obráběné součásti náchylný na vysoké teploty. Používá se v různých odvětvích průmyslu: strojírenství, letectví, důlní průmysl. Je to nástroj pro různé operace a to zejména pro tvarování, vrtání, ale nejběžnější operací je dělení materiálu.

Základ metody je ve stlačení vody v čerpadlech. Stlačenou vodu potrubí dopraví do trysky. Princip činnosti je tedy jednoduchý. Obzvláště složitá je však technologie materiálů a konstrukce trysky. [2] Voda je po použití zachycena spolu s abrazivem ve vaně pod obráběným materiálem.

2.1.1 Historie[1]

Využití tlaku vody pro vymílání se datuje k roku 1800 v důlním průmyslu pro vytváření dolů. Od roku 1930 se začal vodní paprsek objevovat v strojním průmyslu jako řezací zařízení. Společnost na výrobu papíru ve Wisconsinu vyvinula stroj na měření, odvíjení a řezání papírů vodním paprskem. To se datoval rok 1933 a byl to počátek řezání vodním paprskem s malým tlakem, tudíž byl využitelný pro měkké materiály, jako je právě papír. Základní idea přidávání abraziva do paprsku začalo roku 1935.

K rozvoji technologie vodního paprsku došlo v poválečném období, kdy výzkumní pracovníci hledali nové metody efektivního dělení materiálů. Rozvoj závisel na vývoji vysokotlakých čerpadel. Roku 1956 Carl Johnson vyvinul metodu pro dělení plastů pomocí tenkého vysokotlakého proudu paprsku. Další milník byl v roce 1958, kdy Billie Schwacha

vyvinul parsek využívající ultra vysokého tlaku paprsku o hodnotě 6900[bar] a dokázal řezat slitiny železa.

Nová technologie přišla v roce 1962, kdy byl vyvinut pulzující vodní parsek (3450bar), který mohl řezat kovy, kámen a další materiály. Zaměření vývoje bylo hlavně na ideální tvar trysky pro vysokotlaký parsek. V sedmdesátých letech minulého století se výzkum upínal ke zvýšení životnosti trysek. Vedli jej Ray Chadwick, Michael Kurko a Joseap Corriveau, kteří použili korund jako abrazivo a docílili zvýšení životnosti trysky a celkovému vylepšení metody. K životnosti trysky úpravou vody přispěli John Olsen, Georg Hurlburt a Louis Kapesandy. Dalším posunem v sedmdesátých letech bylo vyvinutí trysky s $\varnothing 0,05[\text{mm}]$ s $p = 4830[\text{bar}]$ Normanem Franzem. Vytvoření řízeného pohybu paprsku, jeho polohy, rychlosti řezání parsku a změny polohy paprsku bylo na počátku roku 1990.

2.1.2 Výhody[1,2]

Významným přínosem vodního paprsku je obrábění materiálu, aniž by se porušila jeho struktura, protože nevzniká TOO. Minimalizací tepelných účinků se tedy zaručují neměnné vnitřní vlastnosti materiálů.

Vodní parsek je schopen díky řídicím systémům a 3D obráběcím hlavám (ne všechny stroje) obrábět také složité tvary.

Šířka řezu je ovlivnitelná volbou trysky nebo také materiálu a velikosti abraziva. Řezná drážka při použití abraziva je v rozmezí 1,016 – 1,27[mm]. Správnou volbou abraziva a trysky však lze dosáhnout i šířky 0,508mm. Vodní parsek bez abraziva má šířku řezu podstatně menší: jedná se o rozmezí 0,178-0,33mm, ale umí vytvořit šířku jen 0,076mm, což je šířka lidského vlasu. Vodní trysky jsou schopny dosáhnout přesnosti +/-0,2mm.

Proces obrábění je snadno naprogramovatelný, může se řezat jak tenký materiál, tak i materiál o tloušťce 254mm, to ale také závisí na typu čerpadla – velká univerzálnost. Využívá se řezání materiálu ve svazcích – úspora času = peněz. Mezi další výhody patří: nenáročné upnutí obrobku, nízké rezné síly (4,5 N), nastavení abrazivního paprsku pro všechny operace stejně, malé nebo žádné otřepy.

2.1.3 Ekologie[1]

Metoda vodního paprsku je také mj. velmi ekologická, což patří mezi další velké výhody. Úzký řez při dělení materiálu produkuje menší odpadní materiál než tradiční metody. Za jednu minutu se spotřebují přibližně dva litry vody. Záleží však na velikosti tlaku paprsku

a šířce trysky. Oba tyto parametry je možno měnit. Další výhodou z ekologického pohledu je recyklace již použité vody, tak že může být použita opakovaně. To samé platí o abrazivu, které je možno také recyklovat a navíc je netoxické. Když už nejde dále využít je uloženo na skládce. Obrábění vodním paprskem produkuje minimální množství prachových částic, kouře, výparů a znečišťujících látek, tím pádem ani obsluha stroje není vystavena nebezpečným látkám.

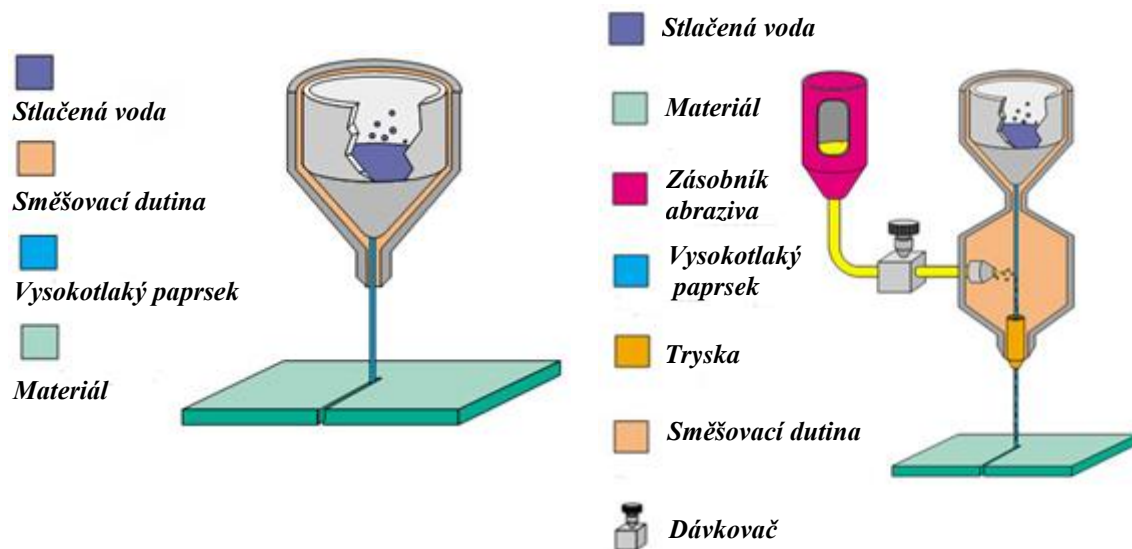
2.1.4 Nevýhody[3]

Kromě velkého množství výhod má metoda i několik nevýhod. Tím že dochází ke kontaktu mezi obrobkem a vodou s abrazivem může dojít k rychlému nástupu povrchové koroze. Té se dá zabránit vhodným ošetřením povrchu po dokončení operace. Při obrábění materiálů, které mají velkou pórovitost, dojde k nasáknutí a pak se musí vysušovat. Působením vodního paprsku také může dojít ke změně barvy nebo k znečištění. Složitě je obrábět malé obrobky – špatná možnost uchycení.

2.1.5 Rozdíly mezi čistým vodním paprskem a abrazivním paprskem[1,2]

Výběr použití jednoho či druhého paprsku je jednoduché. Závisí totiž na druhu opracovávaného materiálu. Pro měkké materiály jako jsou: papír, jednorázové pleny, vybavení interiérů automobilů, izolace ze skelných vláken, guma, polystyren, kůže, potraviny (jotka) se využívá čistý vodní parsek. Možná je k podivení se, že papír nebo pleny se řezou “vodou“, ale faktem je, že na materiálech vzniká méně vlhkosti, než když se jich dotknete nebo na ně dýchnete. Řezání s abrazivem se využívá pro práci s tvrdými materiály, jako jsou: kovy, kámen, kompozity, keramika a další. Jsou i materiály, s kterými si vodní parsek neporadí: tvrzené sklo, diamanty a některé velmi tvrdé keramiky. Paprsek s abrazivem je výkonnější než vodní parsek až tisíckrát. Změna jednotlivých druhů paprsků se děje velmi rychle.

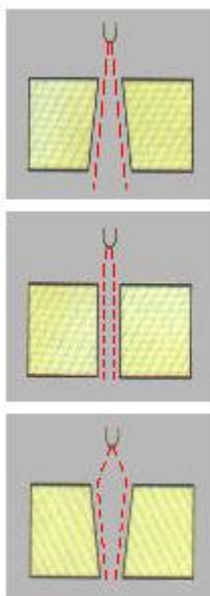
Odstraňování materiálu čistým vodním paprskem je využito jen vody o nadzvukové rychlosti. U abrazivního paprsku je odstranění materiálu dosaženo jen abrazivem nikoliv vodou. Ta jen pomáhá k urychlení pohybu abrazivních částic.



Obrázek 1: a) Čistý vodní paprsek; b) Vodní paprsek s abrazivem [4]

2.1.6 Kvalita řezu[3]

Vodní paprsek může vytvořit v řezaném materiálu různé tvary. Tyto tvary jsou ovlivněné jednak materiálem a tloušťkou obrobku a pak také rychlostí řezu paprsku. To můžeme vidět na následujícím obrázku.



- Zde je vidět tvar, který vznikne při velmi pomalém řezu a navíc v měkkém materiálu. Paprsek tedy vytvoří kužel.
- Tvar řezu v druhém obrázku je ideální. Nastává rovnováha mezi rychlostí řezu, odolností a tloušťkou materiálu. Celou dobu řezu je paprsek udržen jako válec.
- Poslední tvar řezu vzniká, když je vysoká řezná rychlost a zároveň je materiál odolný. Pak znovu vzniká kuželovitost, ale obrácená - kužel se uzavírá. Materiál se nestihne probrousit.

Obrázek 2: Typy řezů - vodní paprsek[3]

Kuželovitost není závislá jen na materiálu a rychlosti řezu. Další ovlivňující faktory jsou především: množství abraziva, tvar řezu (rovný, kruhový) a šířka obrobku.

Existuje stupňování kvality řezu v pěti stupních, což je zobrazeno na dalším obrázku.



Obrázek 3: Stupně kvality řezu[3]

V tabulce jsou dosažené přibližné hodnoty jednotlivých řezů. Dosažené hodnoty znovu záleží na materiálu, tlaku, abrazivu, tloušťce obrobku, rychlosti řezu.

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra* v horní kontuře	Drsnost Ra* ve spodní kontuře	Tvarová přesnost (mm)* v horní kontuře	Tvarová přesnost (mm)* ve spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	Většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q2	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

Tabulka 1: Hodnoty řezů[3]

2.1.7 Abrazivo[5,17,18]

Pro různé metody opracování materiálu se používají jiné materiály abraziva. Různé materiály abraziva, jejich uplatnění a vlastnosti jsou v souhrnu níže.

- Přírodní granát

Je to nejpoužívanější abrazivo pro tryskání a řezání vodním paprskem. K řezání s tímto abrazivem dochází i při malých tlacích, díky jeho velké měrné hmotnosti - hustotě. To

se projeví také příznivě na spotřebě, která je až o 75% menší ve srovnání s ostatními abrazivy.

Je to přírodní nekovový materiál, stoprocentně ekologický, bez toxických příměsí. Nezatěžuje tedy životní prostředí. Bezpečnost práce vůči pracovníkům je na vysoké úrovni a to ovlivňuje i schopnost práce při nízkých tlacích, čímž se dosahuje nízké hlučnosti.

Typické vlastnosti přírodního granátu jsou:

- Vysoká tvrdost – 7,5 – 8 Mohsovy stupnice tvrdosti
- Pevnost
- Nízká drobivost
- Vysoká hustota – 4 g/cm³

Částečně ostré zrna jsou díky těmto vlastnostem použitelná několikrát opakovaně – snížení nákladů.

Při experimentu, který byl v rámci této práce proveden, byl jako abrazivní materiál použit právě přírodní granát typ MASH80 (viz kapitola 3.2). MESH je stupnice velikosti zrn sypkých hmot. Používá se v americké a britské praxi. 80ka vyjadřuje počet děr v sítu u čtverečního palce. Velikost zrna této stupnice je 0,18[mm].



Obrázek 4: Abrazivo – granát[17]

- Ocelový granulát – ocelové kuličky (broky)

Tento materiál má optimální odrazovou pružnost a odolnost proti únavě materiálu. Používá se k čištění a je vrhán pomocí metacích kol. Má velkou životnost, která je dána odolností vůči rázům. Všechny abrazivní materiály mají různé rozměrové velikosti. Ocelový granulát má největší kuličky v rozmezí 4000-4750[μm] a nejmenší 500-850[μm].

- Ocelová drť – ostrohranné ocelové abrazivo

Má různé tvrdosti a každá vyhovuje jinému typu operace. Používá se především k čištění od okují, nebo zdrsnění povrchu. Podle tvrdosti se také ostré hrany drti postupně zakulacují. Největší rozměr drti je 1700-2000[μm] a nejmenší 300-420[μm].

- Korund (oxid hlinitý)

Je vhodný pro odstraňování materiálu, jelikož jeho charakteristické vlastnosti je vysoká tuhost a tvrdost. Lze mnohokrát recyklovat a tím snižovat náklady obrábění. Oproti ocelovým abrazivům je lehčí a na obráběnou část působí velmi agresivně. Velikosti zrn: největší možný je 2000-1400[μm] a nejmenší 180-125[μm].



Obrázek 5: Abrazivo – korund[5]

- Balotina (skleněné kuličky)

Využití pro jemné leštění, které se uskutečňuje bez poškození materiálu. Velikosti zrn jsou největší 570-700[μm] a nejmenší 70 – 100[μm].

- Nerezové abrazivo

Vhodné pro dočištění nekovových materiálů, ocelových odlitků a výkovků a je to jedeno z nejekologičtějších abraziv.

- Zirblast – keramické abrazivo na tryskání

2.2 Laserový paprsek[7]

LASER. Toto slovo je zkratka počátečních písmen Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. V českém překladu zesilovač světla pomocí stimulované emise záření. Laser má mnoho druhů a ty se dělí podle určitých kritérií. Více v kapitole 2.2.3. U laserového parsku budou zmíněny zejména polovodičový a CO₂ laser a to z důvodu, že tyto dva typy se dodávají do stroje TruLaser, na kterém byly vyvrtány otvory.

2.2.1 Historie[6,7]

U zrodu laseru byl v roce 1917 Albert Einstein. Ten přišel s novým objevem stimulované emise a její teorií, na níž je laser postavený. To bylo na dlouhou dobu vše. Reálné zařízení založené na principu stimulované emise, bylo vyvíjeno ve čtyřicátých a padesátých letech minulého století. Toto zařízení vytvářeli Charles Townes, Joseph Weber, Alexander Prochorov a Nikolai Basov.

Vědečtí pracovníci vytvářeli tzv. MASER. Přístroj, který byl předchůdcem laseru. Maser je zesilovač mikrovln pomocí stimulovaných emisí záření. Vědci věřili, že jsou schopni

vytvořit i optický maser, který by generoval výkonné parsy světla. To se povedlo roku 1960, kdy byl vyvinut pevnolátkový laser s aktivním prostředím z krystalů rubínu.

Vyvinutí laseru bylo mezníkem v dějinách vědy a techniky. Začal se vyrábět zcela nový systém, který měl potenciál k využití v různých oborech. Tento potenciál byl využit. Na počátku šedesátých let také bylo vynaloženo mnoho úsilí k vývoji jednotlivých parametrů laseru zahrnujících vysoký výkon plynu. Laser byl použit v průmyslu, ale i obraně. Vysoký výkon laserů byl hlavním důvodem pro rychlý vývoj a rozšiřování se. V dnešní době je laser používán v širokém spektru aplikací a nejen pro obrábění materiálů. S laserem se můžeme setkat u laserové tiskárny, ukazovátka, laserové čtečky čárových kódů, v astronomii pro měření vzdáleností, v ekologii pro měření částic v ovzduší, čtení a zápisu na CD, ve zbrojním průmyslu jako označování cílů. Velkou roli hraje laser i ve zdravotnictví. S jeho pomocí se operuje oční sítnice nebo se odstraňují pigmentové skvrny.

2.2.2 Konstrukce laseru[7,8]

Přestože existuje celá řada typů laserů jejich konstrukce je velmi podobná. Obecnou konstrukci laseru můžeme vidět na obrázku níže. Laser se skládá ze čtyř hlavních částí: zdroje energie, aktivního prostředí, laserového parsku a rezonátoru.



Obrázek 6: Konstrukce laseru[8]

Rezonátor je soustava dvou zrcadel, které jsou rovnoběžné a kolmé na osu laseru. Slouží k zesilování světelné energie. Zrcadla jsou rovinná nebo zakřivená. Jedno zrcadlo je téměř dokonale odrazivé a jeho poměrná odrazivost $R=0,99[-]$. Je z leštěného zlata nebo dielektrického zrcadla. Druhé zrcadlo je polopropustné a vychází přes něj laserový parsek ve

formě fotonů s vysokou energií. Polopropustné zrcadlo propustí jen ty fotony, které dosahují určité hodnoty energie.

Zdroj záření produkuje fotony, které při vstupu do aktivního prostředí dodávají energii elektronům – zvyšují jeho energetickou hladinu. Podle charakteru aktivního prostředí se volí také zdroj záření, který produkuje různé formy energie – optické, chemické, termické nebo elektrické.

Aktivní prostředí laseru může být tvořeno různými látkami, které určují vlnovou délku světelného záření. V aktivním prostředí vzájemně na sebe působí fotony a elektrony, mění svůj energetickou hladinu.

Poslední část je laserový paprsek, skládající se z fotonů. Ty dosáhli určité energie, srovnali se tak, že jsou kolmé na rezonátor a následně jsou propuštěny polopropustným zrcadlem. Paprsek má dvě základní vlastnosti: nerozbíhá se do šířky a má jednu barvu.

Laser je složen z dalších mnoha součástí a nejen z těchto čtyřech hlavních. Mezi další díly, které patří do zařízení laseru je chladič, který se používá zejména při vysokých výkonech, aby chránil proces. Dále pak měřič výkonu, kalibrační přístroje, nelineární krystal měnící vlnovou délku.

2.2.3 Rozdělení laserů[7,9,12,13,14]

Jak je uvedeno výše, laser je velmi složité zařízení, které má několik částí a z toho důvodu je dělení laserů na několik okruhů, které jsou uvedené v následujícím textu. U odrážky na začátku řádky jsou hlavní okruhy dělení a odsazené odrážky jsou jejich konkrétní typy:

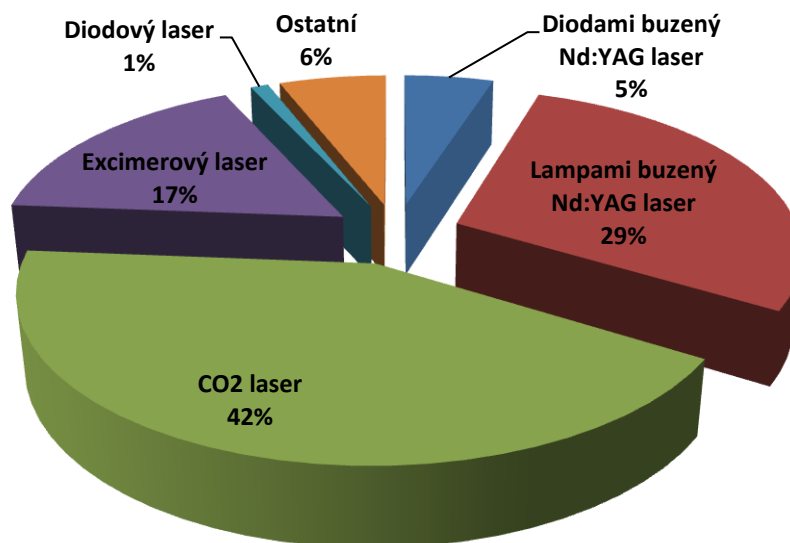
- Aktivní prostředí
 - Plynové lasery
 - Kapalinové lasery
 - Pevnolátkové lasery
 - Polovodičové/diodové lasery
- Vlnová délka záření
 - Infračervené lasery
 - Lasery viditelného pásma
 - Ultrafialové lasery
 - Rentgenové lasery

- Délka generovaného impulsu
 - Kontinuální lasery
 - Pulzní ns
 - Pulzní ps/fs
- Typ kvantových přechodů
 - Molekulární lasery
 - Elektronové lasery
 - Jaderné lasery
- Typ čerpání (buzení)
 - Opticky (pro pevnolátkový YAG)
 - Elektrickým výbojem (pro plynový CO₂ laser)
 - Elektrickým proudem (pro diodový laser)
 - Chemicky
 - Elektronovým svazkem
 - Tepelnými změnami
 - Rekombinací

Pevnolátkový laser

Z jeho názvu vyplývá, že v aktivním prostředí se budou nacházet pevné částice. Konkrétně krystaly různých látek. Nejvíce známé je používání krystalů rubínu. Tento typ laseru byl i první vynalezený laser v roce 1960. Avšak už je překonán jinými novějšími materiály krystalů. Důvod je ten, že tyto lasery mají velký výkon, ale musí být v krátkých pulzech, protože spojitě záření krystaly rubínu nevydrží a jsou zničeny.

Proto byl vyvinut krystal, který by vydržel i spojitě záření. Není jen jeden, ale nejpoužívanější je Nd:YAG. Je to zkratka materiálů, ze kterých je krystal složen: Yttrium, Hliník (Aluminium) a Granát dopovaný ionty neodymu Nd. Tento druh laseru je velmi využíván (viz graf 1). Nejpoužívanější zdroj buzení je optický (lampami), ale používá se i čerpání diodami.



Graf 1: Procentuální vyjádření používání typů laserů[14]

CO₂ laser

Jeho aktivní prostředí je plyn (oxid uhličitý), takže je bez krystalů. Je to jeden z nejvyužívanějších laserů zejména v průmyslu a medicíně. Produkuje pulzní parsek, ale i spojité. K čerpání se používá elektrický výboj.

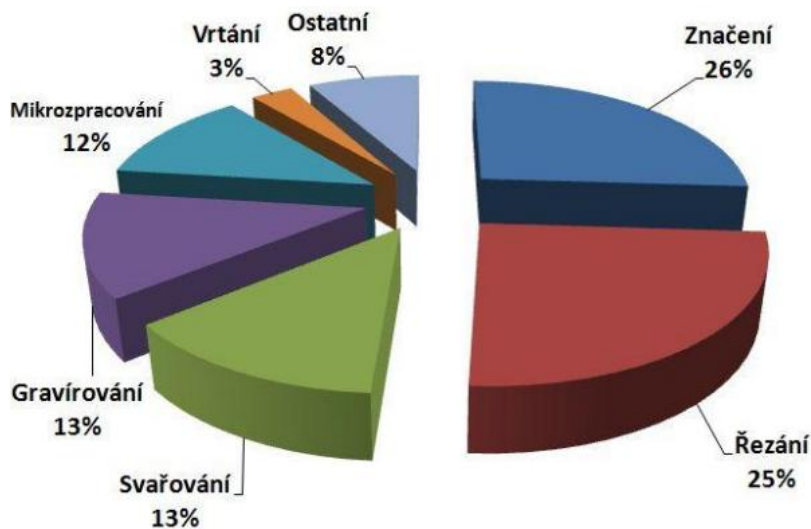
Na webových stránkách prodejce laserových zařízení Trumpf jsou uvedeny rozdíly použití pro CO₂ laser a pevnolátkový laser při řezání. Je vyhodnocena jejich produktivita, flexibilita a náklady.

	CO ₂ laser	Pevnolátkový laser
Produktivita		
Konstrukční ocel (O ₂)	Silný v jakýchkoli tloušťkách	Silný v jakýchkoli tloušťkách
Nerezová ocel, konstrukční ocel (N ₂)	Specialista pro silné plechy	Specialista pro tenké plechy
Hliník (N ₂)	Silný v jakýchkoli tloušťkách	Specialista pro tenké plechy
Barevné kovy (O ₂ / N ₂)	Nevhodný	Specialista na barevné kovy
Flexibilita		
Výkon laseru	do 8 kW	do 6 kW
Náročnost na kvalitu plechu	++	+
Náklady		
Energetická úspornost	+	++
Náročnost na spotřební díly	++	++
Náročnost na náhradní díly	++	++
Hodnocení: + Dobrý, ++ Výborné		

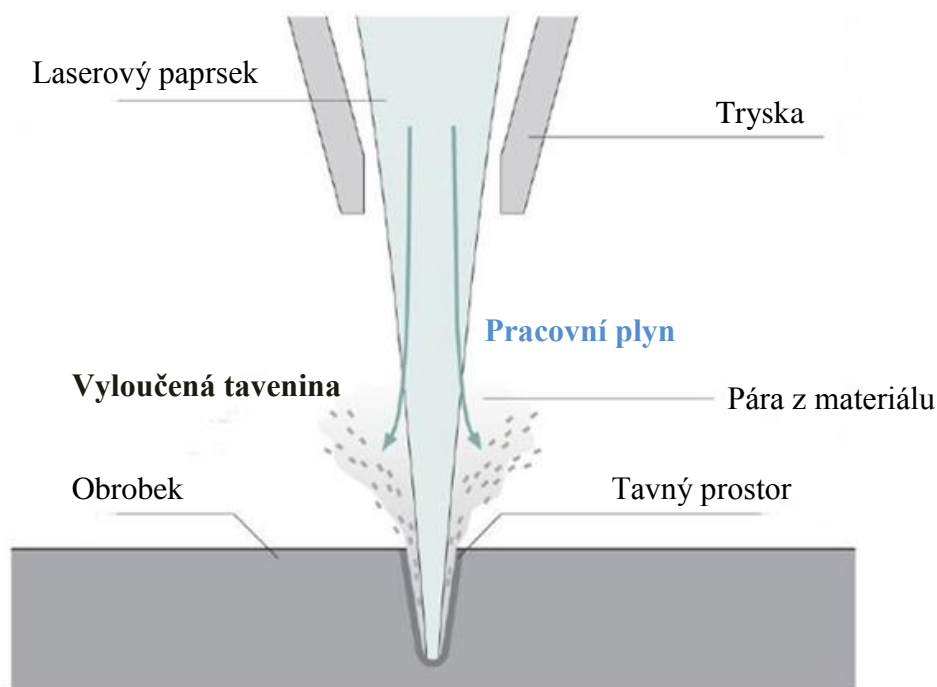
Tabulka 2: Hodnocení produktivity, flexibility, nákladů[12]

2.2.4 Vrtání laserem[10]

Vrtání je jedna z mnoha operací, ke kterým lze laser využít. Z grafu 2 je vidět, že tato operace laserem se používá zřídka a můžeme na něm vidět mnoho dalších technologií, ke kterým se laser používá. Nejčastějším úkonům laseru vévodí dělení materiálů, především tenkých plechů a v podobném množství i značení dílů.



Graf 2: Procentuální podíl technologií využívajících laseru[11]



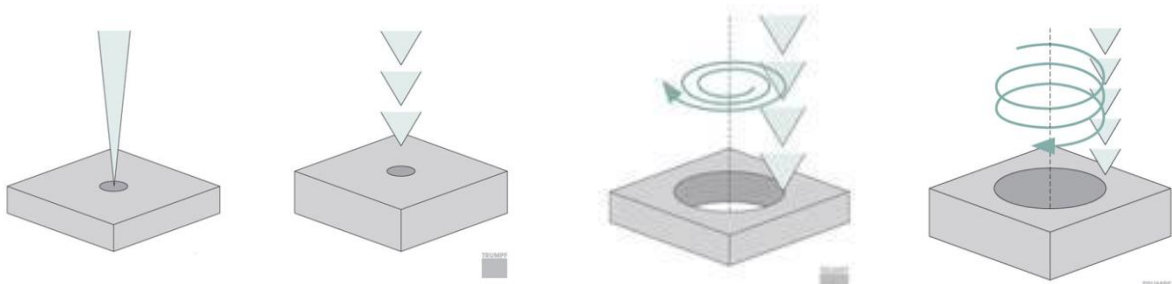
Obrázek 7: Vrtání laserem[10]

Na materiál dopadá laserový paprsek, který jej taví a vypařuje. Dochází k natavení materiálu, který začne expandovat díky tlaku a vzniklým parám ven z otvoru. Začíná se

utvářet kuželovitý otvor, tak jako u vodního paprsku, který závisí na stejných parametrech (šířka materiálu, rychlost prostupu paprsku, druhu materiálu, typu paprsku). Rychlost postupu paprsku je závislá na rychlosti odpařování materiálu. Rychlost odpařování závisí na výkonu paprsku.

Nejlépeší možností je vrtat díry laserem s ultra krátkým impulsem. Ten totiž materiál nenataví, ale rovnou jej vypaří. Netvoří se tedy nežádoucí struska a vrtaný obrobek ani není zahříván, tudíž se nevytvoří TOO, nebo jen minimální.

Existují tři různé metody pohybu paprsku při vrtání otvorů. Ty dokážou vytvořit jak velké díry, tak i malé. Velikost nejmenšího rozměru \varnothing se odvíjí od šířky vygenerovaného paprsku. Naopak velikost největšího \varnothing od velikosti pracovní plochy stroje.



Obrázek 8: a) vrtání jedním impulsem, b) nárazové vrtání, c) trepanační vrtání d) spirálové vrtání[10]

Na obrázku jsou vidět čtyři různé metody vrtání otvorů. V částech a),b) jsou vidět metody vyvrtávají otvory, jejichž velikost závisí na \varnothing paprsku. Je tedy vyvrtán nejmenší možný průměr otvoru. Otvor lze vytvořit tedy buď jedním spojitým impulsem paprsku, nebo množstvím impulsů, které jdou rychle za sebou. Výhodnější je nárazová metoda, kde paprsek nemá takovou energii jako spojitý. Nedochozí pak k tepelnému ovlivnění obrobku v takové míře jako od spojitého paprsku, který má větší energii. Otvor vyvrtaný nárazovou metodou má větší rozměrovou přesnost a i celková kvalita otvoru je vyšší. Další výhodou nárazového vrtání oproti vrtání jedním impulsem je možnost vrtání hlubších otvorů a vytvoření menších \varnothing .

Trepanační vrtání je způsob, pro výrobu otvorů, které mají větší \varnothing než nejmenší možný dosažený laserem. Po vyvrtání počátečního otvoru se paprsek laseru pohybuje po kružnicích, vzdalující se od osy až na požadovaný \varnothing . Natavený materiál opouští otvor při zvětšování průměru spodem.

Spirálové vrtání je druhá možnost vyvrtání otvoru s rozměrem vyšším, než je nejmenší možný vyvrtaný. Je to princip, kdy se nenavrtá prvotní otvor, ale hloubka díry se zvyšuje

postupně. Laser tedy vykonává kruhový pohyb po stejném (požadovaném) \varnothing . Tím natavuje materiál a po každém projetí se dostává hlouběji. Roztavený materiál expanduje u otvoru horní částí. Expanze je daná vysokým tlakem a vznikem par uvnitř vrtu. Po vyhloubení otvoru může parsek přidat ještě několik obkroužení po otvoru, aby jej v dolní části rozšířil a minimalizoval kuželovitost a začistil povrch. Je lepší pro velké otvory než trepanační vrtání, protože už rovnou vrtá na požadovaném \varnothing . Pokud je požadovaný \varnothing opravdu velký, trepanační metoda by spotřebovala velké množství času než by dosáhla tohoto \varnothing .

2.3 LMJ – Laser Micro Jet[15,16]

Laser Micro Jet je poměrně nová technologie, která slučuje dohromady dvě významné, přesto dost odlišné technologie. Je to spojení paprsků vody a laseru. Tuto metodu se snažilo vyvinout mnoho vědců a institutů. Povedlo se to až na začátku devadesátých let Federálnímu Institutu Techniky ve švýcarském Lausane.

Hlavní řezný parsek je laser. Vodní paprsek má nízký tlak a slouží k vedení laseru do místa obrobku. Po vyzáření paprsku z trysky je laserový parsek uvnitř vodního. Laser je veden pomocí úplných odrazů (žádná propustnost) na rozhraní voda/vzduch. Princip je podobný jako u optického kabelu.

Přítomnost vody v místě řezu má dopad na všechny negativní vlivy při řezání samotným laserem. Jelikož voda představuje v řezu chladivo, minimalizují se vlivy jako tepelné poškození materiálu, deformace, oxidace, vznik mikrotrhlin a zvyšuje rozměrovou přesnost. Dále minimalizuje nečistoty a pomáhá k odplavování nečistot z místa řezu.

Pulzní laser má pevnolátkové prostředí Nd:YAG, čerpání je výbojkou nebo diodou. Pulz probíhá v rozsahu mikro nebo nano sekund a má vlnovou délku 1064[nm], 532[nm] nebo 355[nm]. Průměrný výkon laserového parsku je 10-200[W].

Voda použitá pro LMJ je filtrovaná a demineralizovaná s malým tlakem v rozmezí 20-500[bar]. Paprsek je tenký jako lidský vlas, proto spotřeba vody je velmi malá. Při tlaku 300[bar] je za hodinu spotřebován jeden litr vody.

Tryska se vyrábí o $\varnothing D_D$ v rozmezí 25-120[μ m]. Materiál trysek je velmi drahý: safír nebo diamant. Jejich tvrdost umožní generovat stabilní paprsky po dlouhou dobu, aniž by je bylo třeba měnit. Tyto materiály podstatně zvyšují celkové pořizovací náklady.

Kromě již zmíněných pozitivních účinků vody, výrobce uvádí i další výhody: velmi úzký řez, jemné povrchové úpravy, vysoce přesné zpracování tenkých obrobků citlivých na

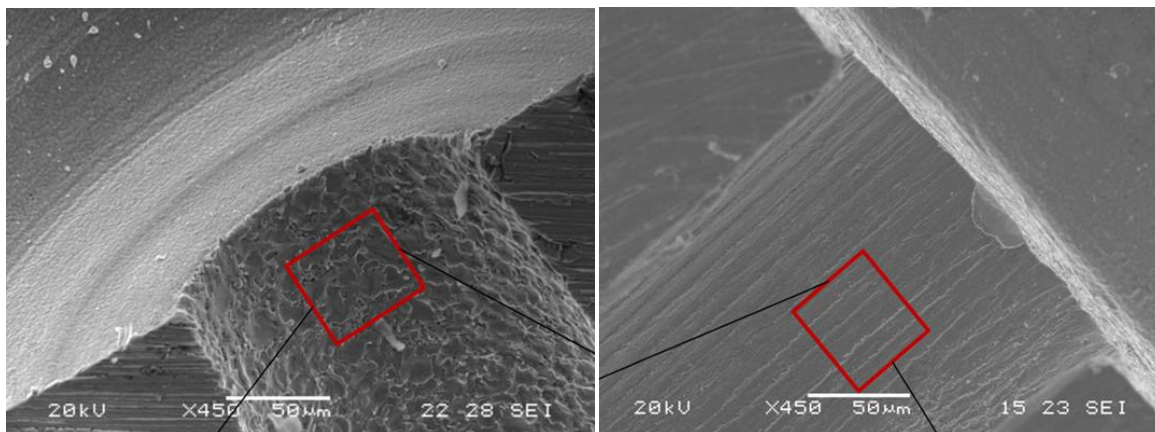
Vzhledem k rozsahu vyráběným tryskám může být pracovní délka maximálně 25-120[mm]. Pak vodní parsek ztrácí spjitost a laserový paprsek se rozběhne.

Podle výrobce této technologie, který se již dvacet let zabývá výzkumem a vývojem této metody, bude LMJ stále více nahrazovat klasické lasery pro mnoho aplikací. Pronikání na trh je stále nízké. Společnost Synova se domnívá, že k výraznému rozšíření metody dojde do deseti let. Vysvětluje to tím, že všechny inovativní technologie potřebují čas k proniknutí na trh.

V dalších řádcích se uvede experiment, kde se vrtaly a porovnávaly otvory pomocí EDM a LMJ. Jsou to výsledky, které se nedají dobře porovnávat se vzorkem z této práce, přesto si tento pokus představíme.

Vrtalo se do nerezové oceli typu AISI 440C, která se používá pro výrobu vstříkovacích ventilů v automobilovém průmyslu. Šířka vzorku byla 300[μm] a \varnothing otvorů byl 180[μm]. Jediný porovnatelný parametr s naším vzorkem jsou tedy poměry D/L, které jsou si blízké. Vrtalo se celkem dvacet pět otvorů.

Výsledek byl, že LMJ dokázal vyvrtat otvory s lepší kvalitou. Tuto kvalitu vyjadřuje průměrná hodnota plošných drsností $S_q = 150[\text{nm}]$ oproti průměrné hodnotě u EDM $S_q = 450[\text{nm}]$ a dokazují to také snímky otvorů.



Obrázek 11: EDM-vlevo, LMJ-vpravo[16]

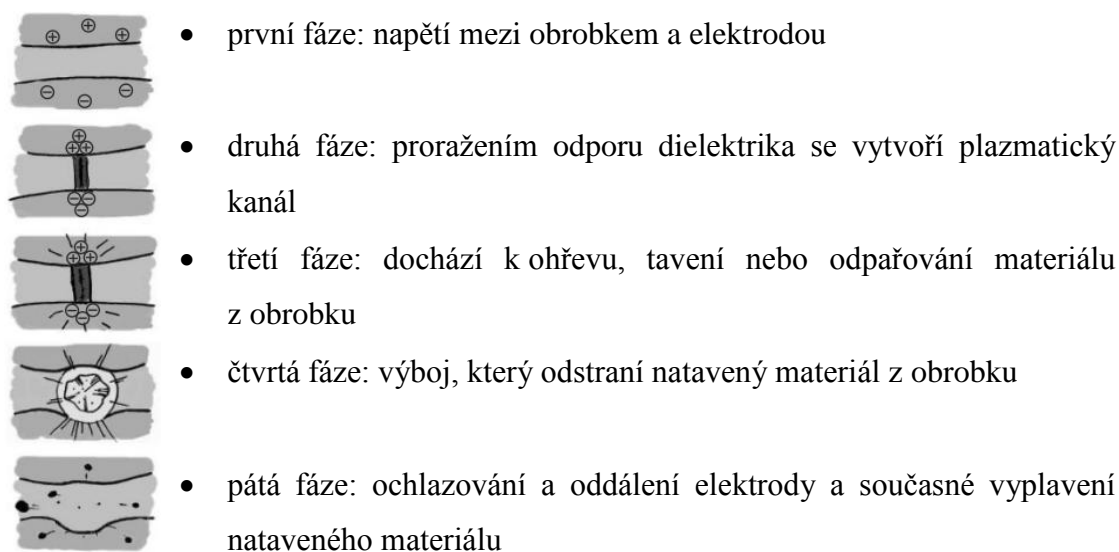
2.4 EDM - Electric Discharge Machining

2.4.1 Historie[22,23]

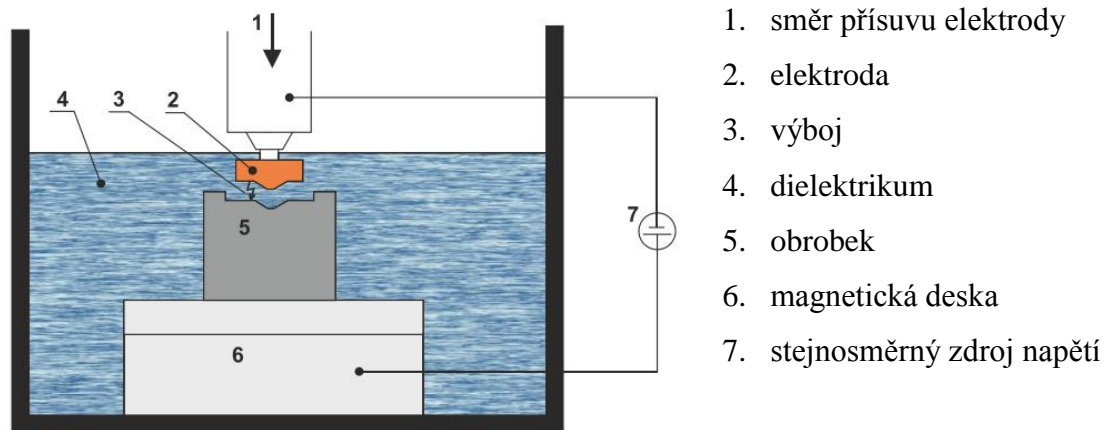
První zmínka o odebrání materiálu pomocí vyjiskřování materiálu v dielektriku se datuje k roku 1770 od anglického fyzika Josepha Priestleyho. K největšímu rozmachu technologie dochází během 2. světové války, kdy byl sestaven stroj pro elektroerozivní úběr materiálu. Zasloužili se o to roku 1943 ruští vynálezci Boris a Natalie Nazarenkovi. Byly položeny základy pro další vývoj EDM a v roce 1954 se tato metoda dočkala prvních strojů určených k prodeji. Vyvinula je švýcarská firma Agie – Charmillies.

2.4.2 Princip metody[22,23,24]

Pracovní prostor, ve kterém je obráběn obrobek, se zaplní dielektrikem. Úběr materiálu probíhá pomocí elektrických výbojů, které vznikají přiblížením obrobku a elektrody, připojených k elektrickému proudu. Obrobek je připojen na kladný pól a elektroda na záporný pól zdroje a v dielektriku, které vyplňuje mezeru mezi obrobkem a elektrodou, dochází k ionizaci a následným výbojům, které jsou náhodné (obrázek 12). Když dojde k výboji, materiál obrobku se odtaví nebo vypaří a na obrobku se vytvoří mikro krátery. Současně se vypařuje i dielektrikum a vznikají vzduchové bubliny, které míří směrem k hladině. Elektroda se po výboji oddálí od obrobku, aby se vyplavil odštěpený materiál a zároveň se do vyhloubeného otvoru dostalo čisté dielektrikum. Pak se proces opakuje posuvem elektrody k obrobku.



Obrázek 12: Princip procesu odstranění materiálu[23]



Obrázek 13: Zapojení EDM se zdrojem stejnosměrného napětí[23]

Výhodou této metody je obrábění velmi tvrdých materiálů, avšak musí být vodivé. Další výhodou je obrábění složitých tvarů např. lisovací nástroje, tvarové obráběcí nástroje atd. Nevýhodou je pomalý odběr materiálu a energetická náročnost.

2.4.3 Části technologie[23,24]

Elektroda

U elektrod je důležité, aby si zachovaly svůj tvar a rozměrovou přesnost. Proto jsou elektrody vyráběné z materiálů o těchto vlastnostech:

- dobrá elektrická vodivost
- dobrá tepelná vodivost
- vysoký bod tání
- odolnost proti opotřebení
- odolnost proti elektrické erozi

Otvor má pak vysoce přesné hodnoty \varnothing , minimální kruhovitost a souosost. Jako materiály elektrody se používají dráty z čistého grafitu, wolframu, karbidu wolframu, mosazi nebo čisté mědi. Volba materiálů elektrod závisí na materiálu obrobku nebo také na požadovaném \varnothing . Nejmenší \varnothing elektrod je k dostání od 0,01[mm].

Napájení

Používá se stejnosměrný zdroj napětí, pro připojení k elektrodě a obrobku. Nastavení napájení je možné měnit, tak aby byly splněny požadavky každého obrábění. Vyšší stupeň napájení umožňuje agresivnější vrtání (více děr za hodinu). Menší stupeň napájení umožní vyšší rozměrovou přesnost a lepší povrchovou úpravu díry. Například při leštění se sníží výkon na nepatrné množství.

Dielektrikum

Je to kapalina a k nejčastěji využívaným se řadí:

- demineralizovaná voda
- petrolej
- transformátorový olej

Funkce, které zastává při procesu obrábění:

- odizolování prostoru mezi elektrodou a obrobkem
- chlazení v místě hloubení
- odvod nataveného materiálu z místa hloubení
- zabránění usazení nataveného materiálu na elektrodě
- ohraničuje místo výboje

Vlastnosti, které by měla splňovat dielektrika:

- vysoký elektrický odpor
- bod vzplanutí minimálně 60°C
- ekologičnost
- cenová nenáročnost

3 Návrh vhodných metod obrábění – vrtání do ocelového vzorku

V praktické části se vrtaly otvory $\varnothing 3$ [mm] do konstrukční oceli 12 050 o tloušťce 6,2[mm]. U každé metody byly vytvořeny dva otvory, z důvodu spolehlivosti jednotlivých metod. Při vrtání laserem se vrtalo otvorů šest, přičemž se vrtalo při třech různých řezných rychlostech v . Řezná rychlost v u paprsku laseru a vody znamená rychlost posunu (pohybu) jejich trysky. Vrtalo se nekonvenčními metodami za pomoci již zmíněného laseru, vodního paprsku, EDM a pro srovnání se vyvrtaly i dva otvory vrtákem z HSS. Kvalita vyvrtaných otvorů bude hodnocena vizuálním pohledem na mikroskopu – jejich kvalita na horní a dolní straně vzorku a skenech povrchů v otvorech. Dále se na kvalitu bude nahlížet podle naměřených hodnot \varnothing otvorů, kruhovitosti, souososti a hodnot drsností.

3.1 Vrtání laserem

Vrtání laserem bylo zajištěno ve firmě TOROTECH sídlící ve Zručí-Senci. Otvory byly vyvrtány strojem TruLaser 3030 s plynovým laserem, konkrétně CO₂. Tento stroj měl nastavené parametry:

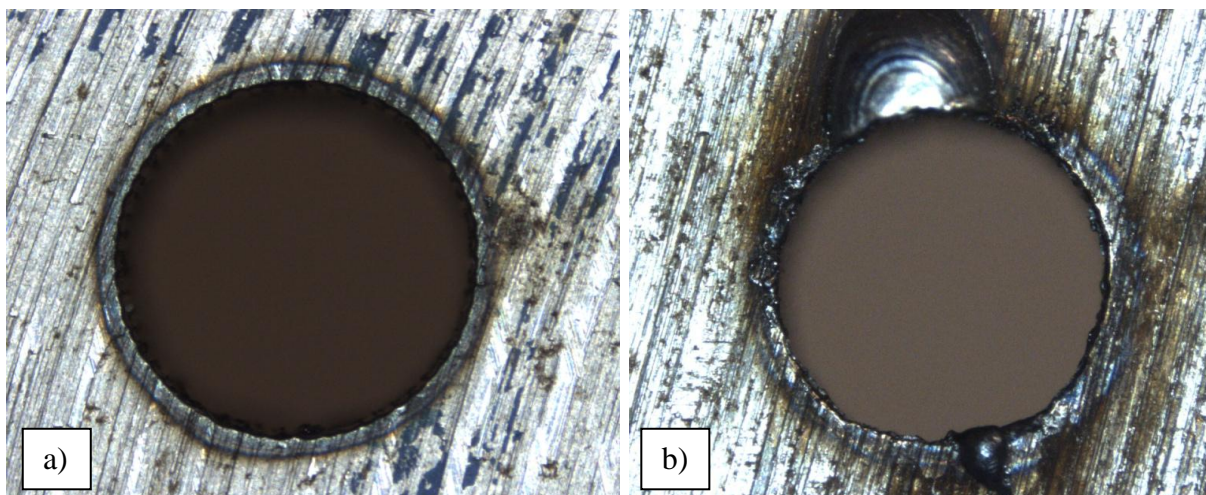
- výkon paprsku: 3200[W]
- frekvence: 20000[Hz]
- tlak plynu 0,6[b]
- vzdálenost od obrobku: 1[mm]
- průměr paprsku: 0,8[mm]

Pro vrtání byl zvolen pulzní paprsek. Jediným proměnným parametrem je řezná rychlost. Při vyvrtání prvních dvou děr byla použita maximální řezná rychlost (posun paprsku) $v_1 = 2600$ [mm/min]. Kvůli neuspokojivému výsledku byly vyvrtány otvory, jak je již zmíněno výše, s různými řeznými rychlostmi. Konkrétně s $v_2=100$ [mm/min] a $v_3=50$ [mm/min]. V tabulce níže jsou zaznamenány řezné rychlosti a časy výroby jednoho otvoru. Zde je vidět předpokládaný vývoj, kdy při nižších řezných rychlostech je delší délka výroby jedné díry.

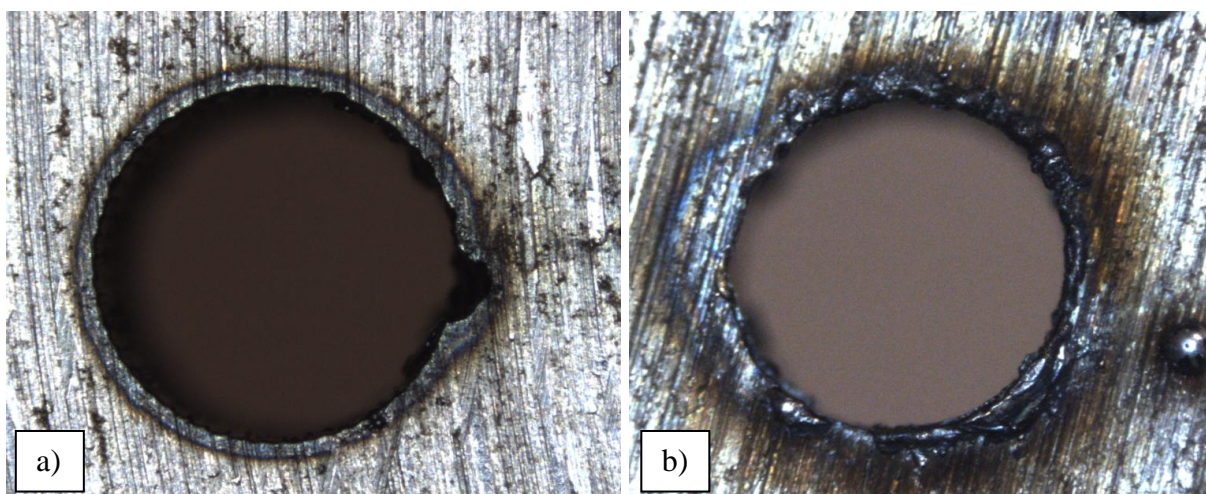
Řezná rychlost v [mm/min]	Čas výroby otvoru t [s]
$v_1 = 2600$	$t_1 = 7$
$v_2 = 100$	$t_2 = 10$
$v_3 = 50$	$t_3 = 14$

Tabulka 3: Časy výroby otvorů laserem při různých řezných rychlostech

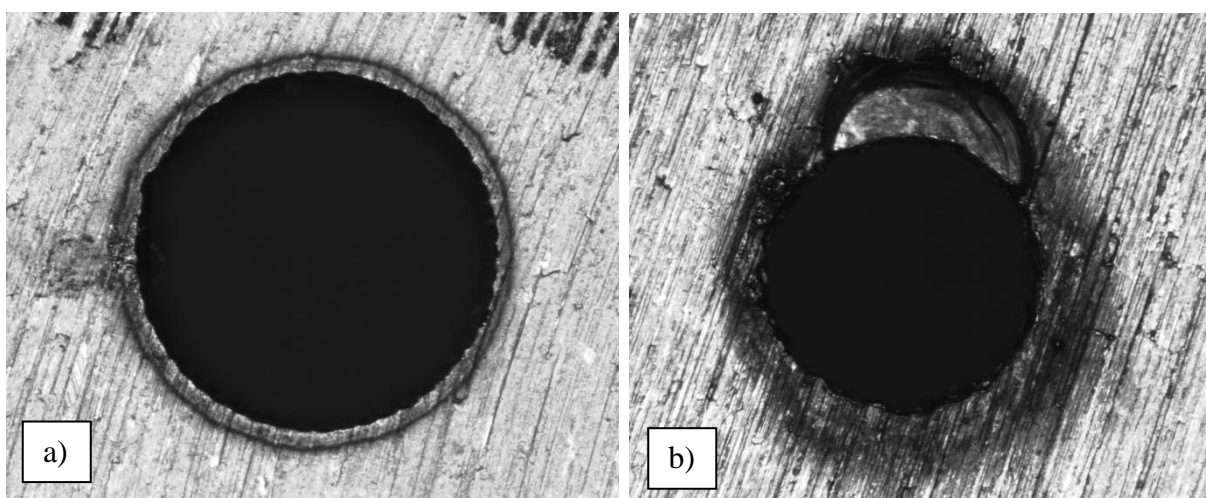
3.1.1 Detaily horní a dolní části otvorů - laser



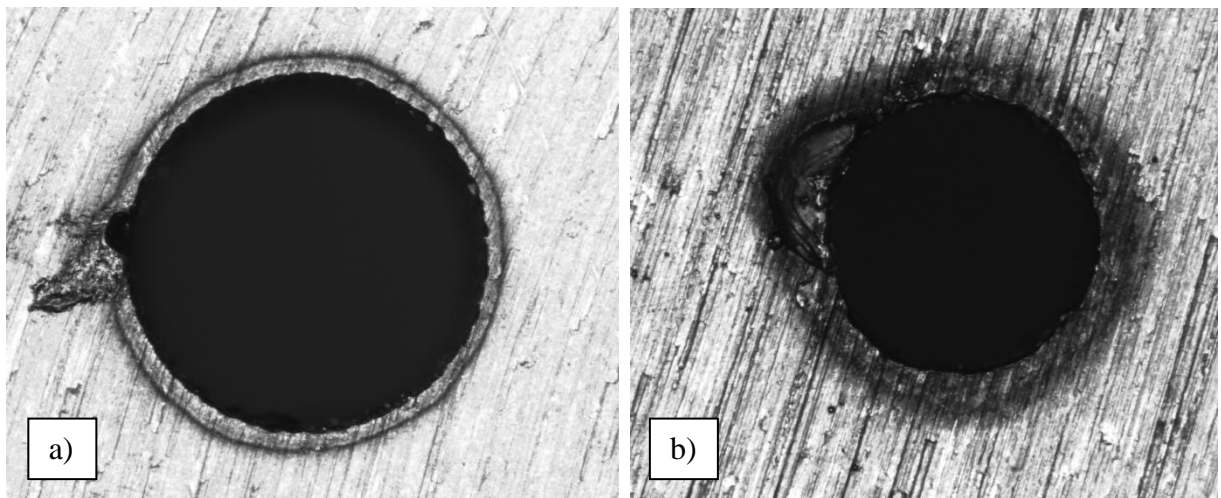
Obrázek 14: $v_1=2600\text{mm/min}$, I. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu



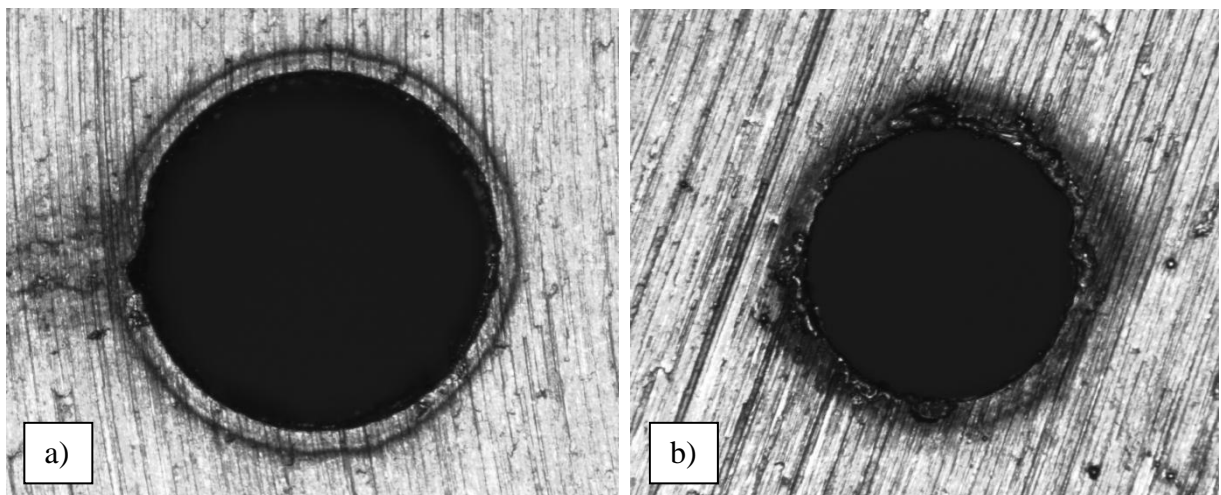
Obrázek 15: $v_1=2600\text{mm/min}$, II. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu



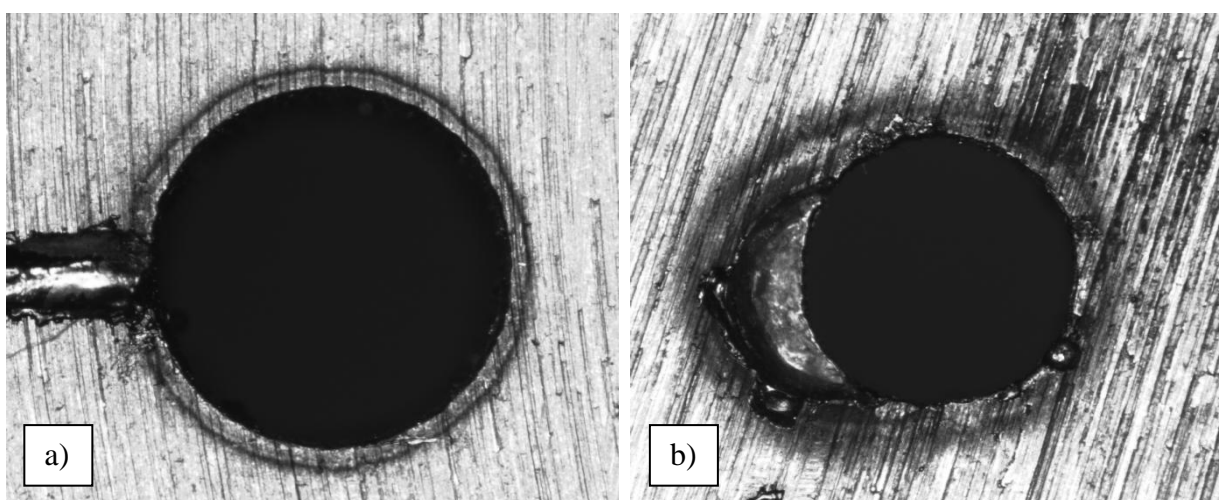
Obrázek 16: $v_2=100\text{mm/min}$, I. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu



Obrázek 17: $v_2=100\text{mm/min}$, II. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu



Obrázek 18: $v_3=50\text{mm/min}$, I. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu



Obrázek 19: $v_3=50\text{mm/min}$, II. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu

Na všech spodních částech otvorů, kromě I. otvoru při $v_3=50[\text{mm/min}]$, se vytvořily nataveniny, které jsou na okrajích otvorů nebo i v okolí otvoru. Při nižších řezných

rychlostech se vytvořily nataveniny i na horním povrchu. To je dáno zřejmě delším působením paprsku v otvoru. Řezání otvoru proběhlo spirálovitě s nájezdem od středu a \varnothing paprsku 0,8 [mm]. Paprsek může mít různé průměry od 0,8 až 2,7[mm](na daném laseru) – vyměnitelná koncovka trysky.

Upnutí vzorku nebylo žádné, jen se položil na rošt. Roštem propadne veškerá struska na dopravník, který jí transportuje do zadní části stroje, tak aby nepřekážela v pracovním prostoru.

3.2 Vrtání vodním paprskem

Vrtání vodním paprskem bylo uskutečněno ve firmě AWAC. Operace byla provedena na stroji AquaCut. Výkon vodního paprsku byl nastaven na 75% z celkového výkonu paprsku. Průměrná řezná rychlost (rychlost posunu trysky) byla u prvního otvoru 69[mm/min] a u druhého 74[mm/min]. Tlak vodního paprsku byl 3800 bar. Tento tlak je nastaven pro všechny operace, které probíhají na stroji. Tryska měla \varnothing 0,8mm. Abrazivo byl granát konkrétně typ MESH80. Přidané množství abraziva do vodního paprsku bylo 350 g/min.

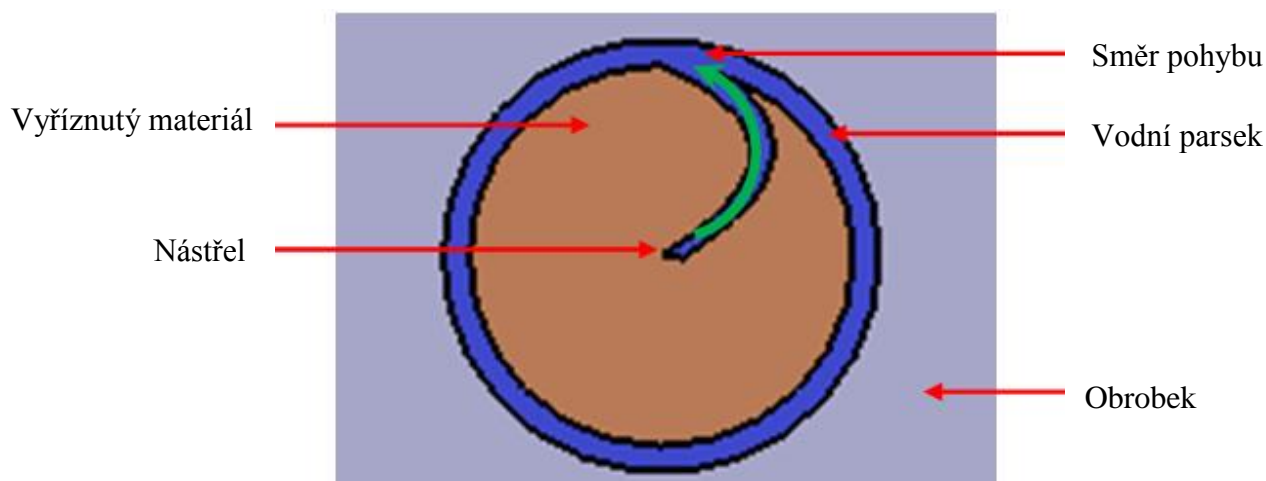
První pokus o vyvrtání otvorů se nezdařil, jelikož vodní paprsek měl maximální posun a ve vzorku se udělaly jen jakési zdeformované otvory. Po tomto pokusu se zredukovala řezná rychlost paprsku. Na obrázku níže je zachyceno uchycení obrobku (vzorku). Ten byl umístěn na podložku, která ležela na ocelové mříži. Ta kopíruje hladinu vodní nádrže. Na obrázku je vodní hladina pokrytá polystyrenem, což byl materiál předchozího obrobku. Náš vzorek je zatěžkán co nejvyšší možnou hmotností, aby pod tlakem vodního paprsku nedošlo k jeho uvolnění a následnému ponoření na hladinu vodní nádrže.



Obrázek 20: Upnutí obrobku - vodní paprsek

Na obrázku 22 je vidět, jakým principem dochází k vyvrtání otvoru. Operace začne tzv. nástřelem. Paprsek je veden k okolí pomyslné kružnice budoucího otvoru. U křehkých materiálů se nástřelí paprsek přesně na střed, aby lom, který se vytvoří, nezasáhl až do části obrobku, v kterém chceme vyříznout otvor. Obrobek se nemusí nutně prostřelit až na spodní část obrobku, ale stačí vyhloubit otvor (neprůchozí). Poté tryska začne konat posun k požadovanému rozměru průměru po křivce a nemusí čekat, až se obrobek prostřelí.

Tento náběh je důležitý, protože vytvořená drážka odvádí vodu a abrazivo. U prostřeleného vzorku je voda odváděna spodem a je zpomalována vodou ve vaně. Pro kvalitní řez je tedy nevhodné rovnou řezat na požadovaném průměru. Po přejetí kružnice je dobré ještě obkroužit otvor, aby se zmenšila kuželovitost.



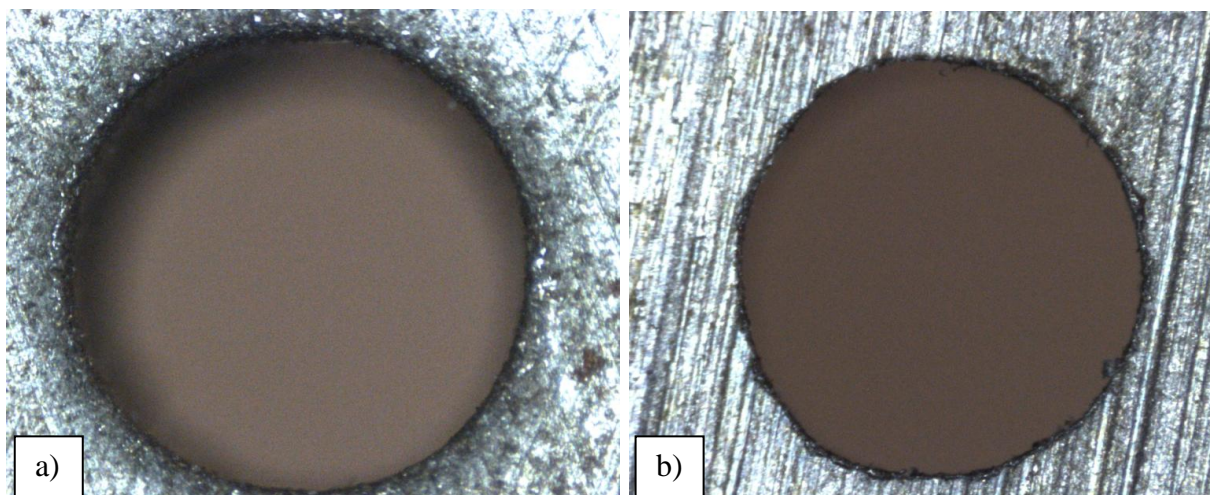
Obrázek 22: Princip vrtání otvorů - vodní paprsek

Doba vyvrtání obou otvorů, tj. čistě doba operace výroby otvorů, byla 36 sekund. Přičemž časy byly rozděleny následovně: první otvor $t_1 = 19$ [s] a druhý otvor $t_2 = 17$ [s]

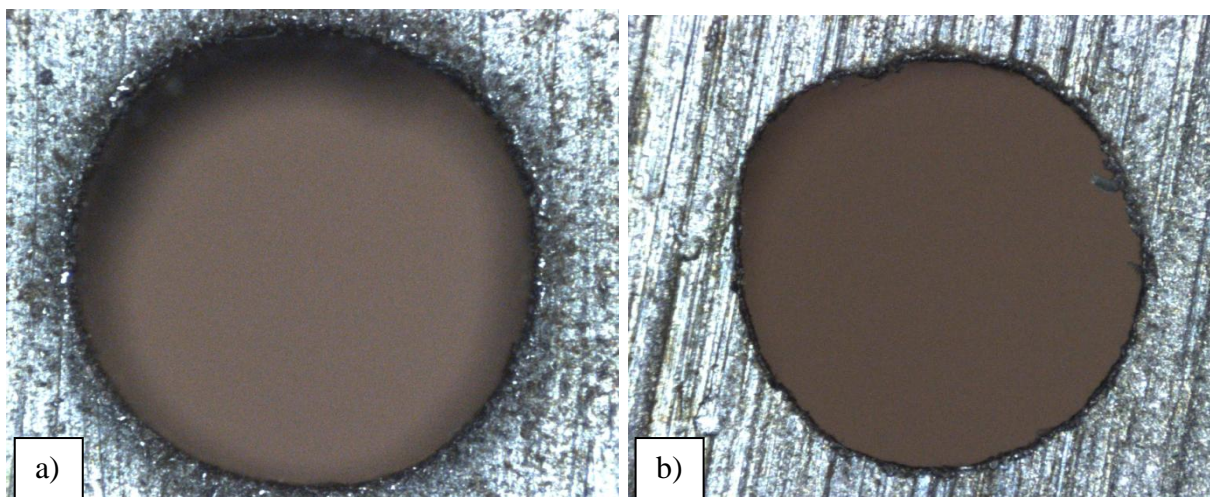
Řezná rychlost v_x [mm/min]	Čas výroby otvoru t_x [s]
$v_1 = 69$	$t_1 = 19$
$v_2 = 74$	$t_2 = 17$

Tabulka 4: Časy výroby otvorů - vodní paprsek

3.2.1 Detaily horní a dolní části otvorů – vodní paprsek



Obrázek 23: Vodní paprsek, I. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu



Obrázek 24: Vodní paprsek, II. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu

Již na první pohled je vidět, že otvory ve spodní části vzorku mají menší průměr než otvory na počátku vrtu, což bude i dokázáno měřením průměrů. Otvory oproti laseru nemají TOO, což je logické, protože se k odstranění materiálu nepoužívá tepelná energie, nýbrž odstranění materiálu probíhá díky vysoké kinetické energii dopadajícího vodního paprsku s abrazivem. Dále otvory nemají téměř žádné otřepy, i když se také najdou, ale pouze ve spodní části. To je vidět na snímcích b). Je třeba si také povšimnout, že v dolní části mají otvory horší kruhovitost než na horní straně. Otvory připomínají "šišatý" tvar, zejména pak u II. otvoru. Přesto jsou vyvrtané otvory kvalitní, i s přihlédnutím na časovou nenáročnost vrtů.

3.3 Vrtání EDM

Vyvrtání otvorů pomocí elektrody proběhlo ve firmě PILSEN TOOLS. Materiál byl odstraňován na stroji Erottech Modulo GFX CNC. Materiál elektrody byla čistá měď a při jejím upnutí se musí dbát na kolmost k obrobku. Tato metoda byla na výrobu děr z časového hlediska nejnáročnější. Výroba prvního otvoru trvala 47 minut. Výroba druhého otvoru byla o dvě minuty kratší, při stejné zadaném programu. Pracovník obsluhy stroje má tu zkušenost, že pokud se nasadí novou elektrodu, tak vždy výroba trvá delší čas. Poté se elektroda opálí a proniká do materiálu snadněji. Kromě dlouhé doby vrtání je nutno vzít v potaz i další zdržení. Prostor pro jiskření se musí vyplnit elektrolytem před vrtáním a vypustit po vrtání. To zabere zhruba pět minut (obě operace). Vzorek byl upnut pomocí magnetické desky.

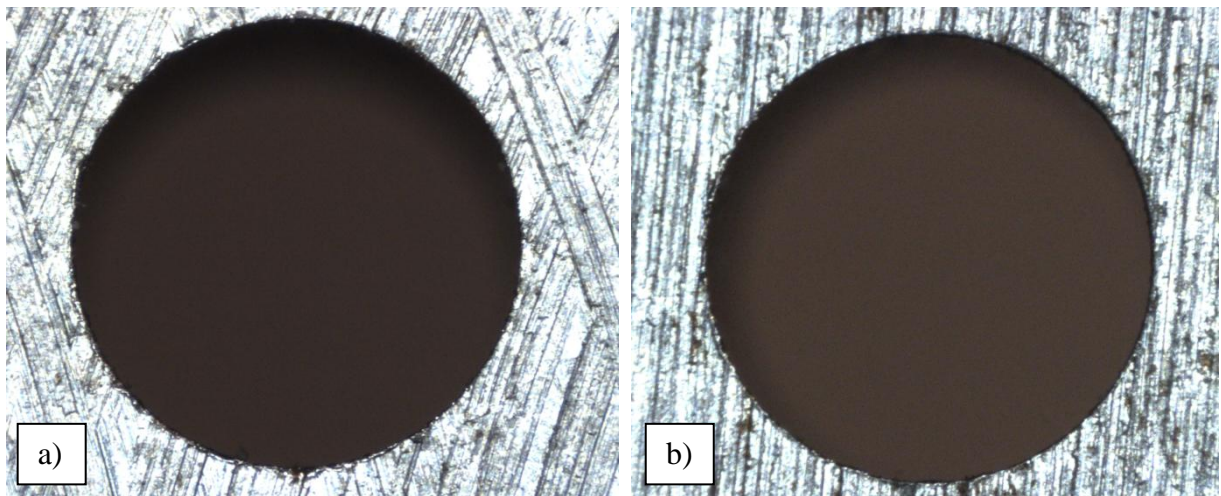
I. otvor	$t_1 = 47[\text{min}]$
II. otvor	$t_2 = 45[\text{min}]$

Tabulka 5: : Časy výroby děr – EDM

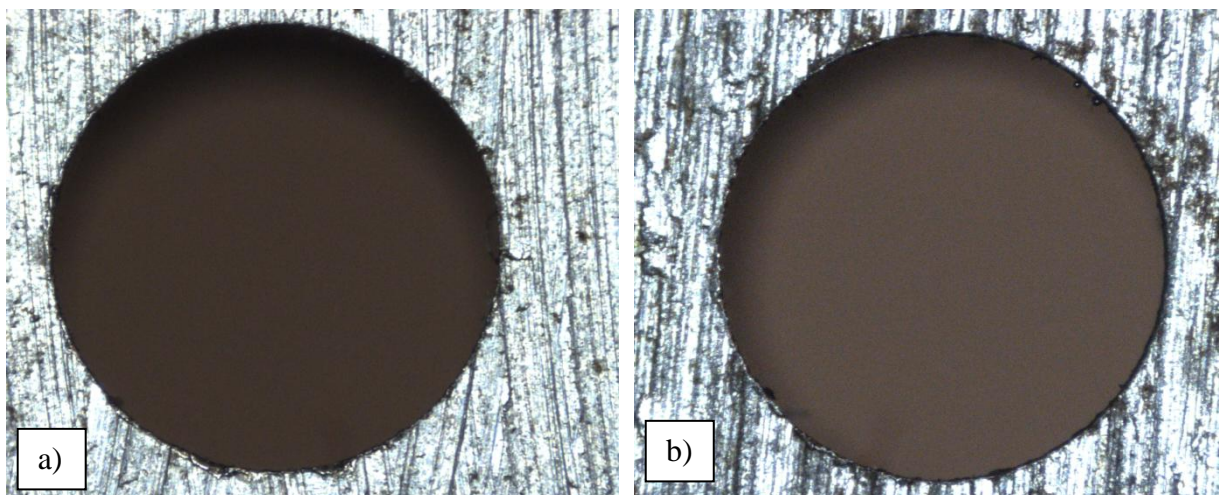


Obrázek 25: Vrtání EDM

3.3.1 Detaily horní a dolní části otvorů - EDM



Obrázek 26: EDM, I. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu



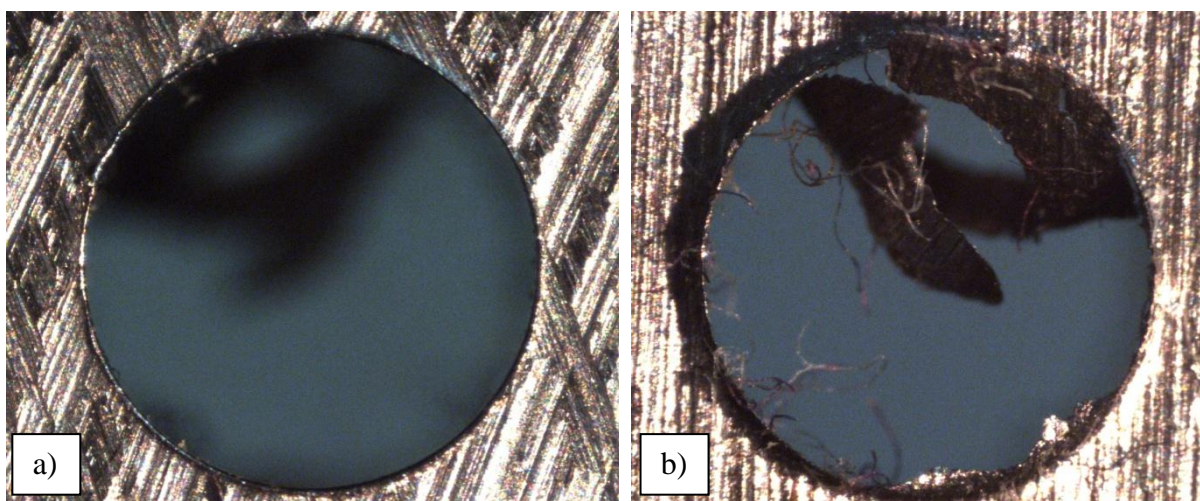
Obrázek 27: EDM, I. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu

Ze snímků je vidět, že se zatím jedná o největší kvalitu děr, alespoň ze snímků mikroskopu na horním a dolním povrchu. Dokonalá kruhovitost, bez odštěpů, pouze u okrajů malé nerovnosti spojené s vniknutím a vyjetím elektrody. Tato dokonalost otvorů je však spojena s časově a finančně velmi náročnou výrobou.

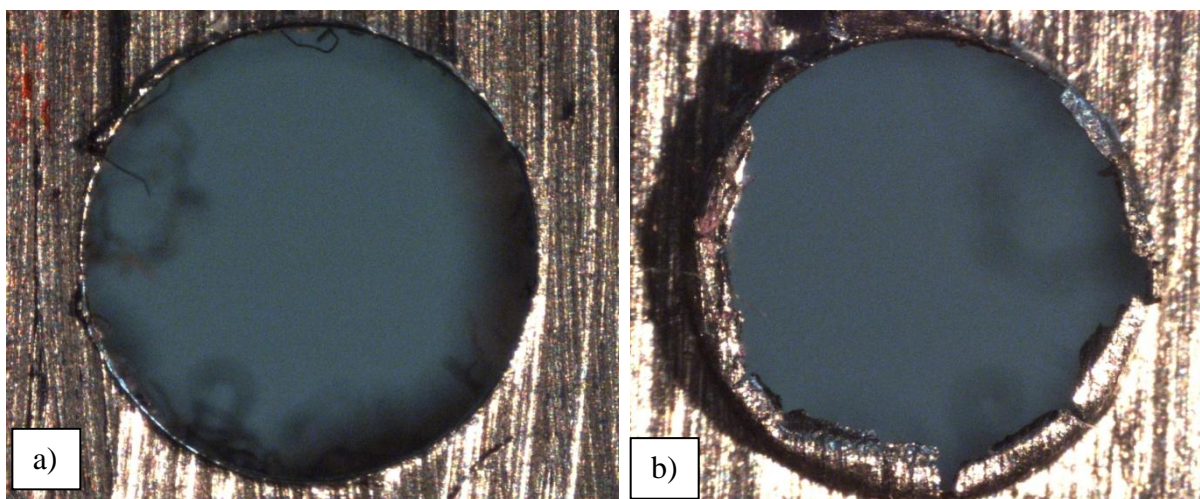
3.4 Vrtání vrtákem

Dva otvory se vyvrtaly pomocí vrtáku z rychlořezné oceli (HSS) o $\varnothing 3$ [mm]. Vrtákem se vrtalo z důvodu porovnání s nekonvenčními metodami. Výroba otvorů proběhla v dílnách KTO na ZČU. Vrtání proběhlo na stroji MCV 750A od výrobce Kovosvit MAS. Upnutí a srovnání vzorku do svěráku zabralo řádově minuty. Posuv vrtáku byl $f = 100$ [mm/min] při otáčkách $n=2652$ [min^{-1}]. Jeden otvor byl vyvrtán za $t = 12$ [s].

3.4.1 Detaily horní a dolní části otvorů – vrták HSS



Obrázek 28: Vrták HSS, I. otvor a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu



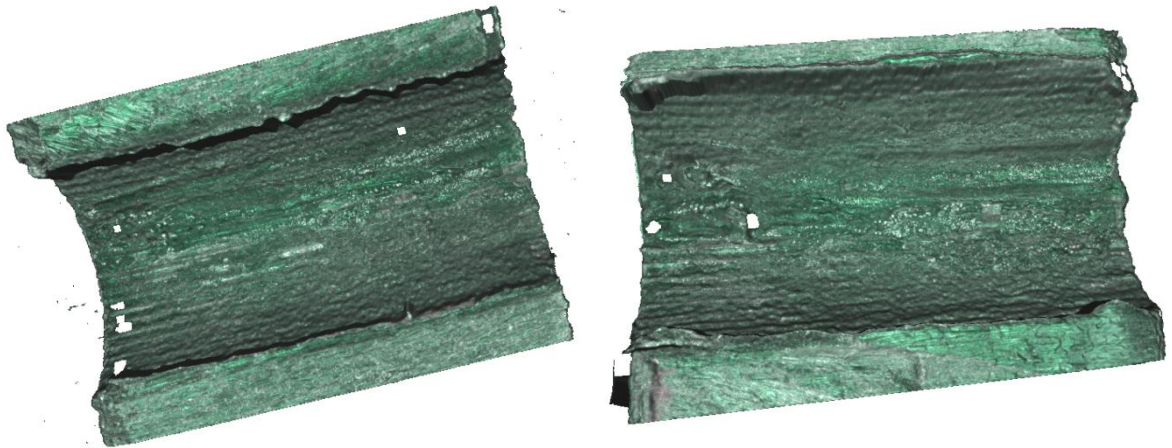
Obrázek 29: Vrták HSS, II. otvor a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu

V horní části jsou otvory dobře kruhové, bez odštěpů. V dolní části jsou vidět nežádoucí ocelové třísky. U I. otvoru je vidět jedna velká tříška a spousta malých mikro-třískových vláken. To u II. otvoru zůstaly třísky téměř okolo celého obvodu dolní části. Při

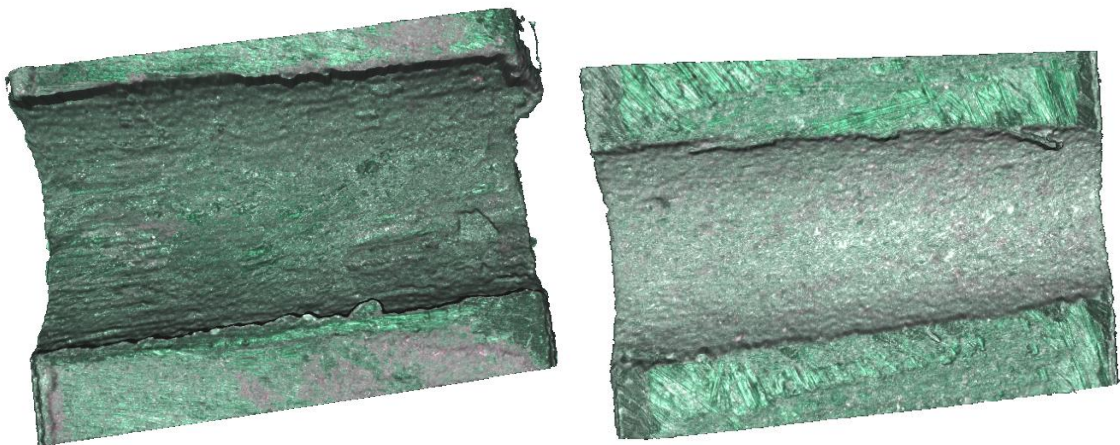
stejných řezných podmínkách tedy vznikly dvě odlišné vady v dolní části. Jsou to však vady, které je možno upravit pilníkem.

3.5 Skeny otvorů

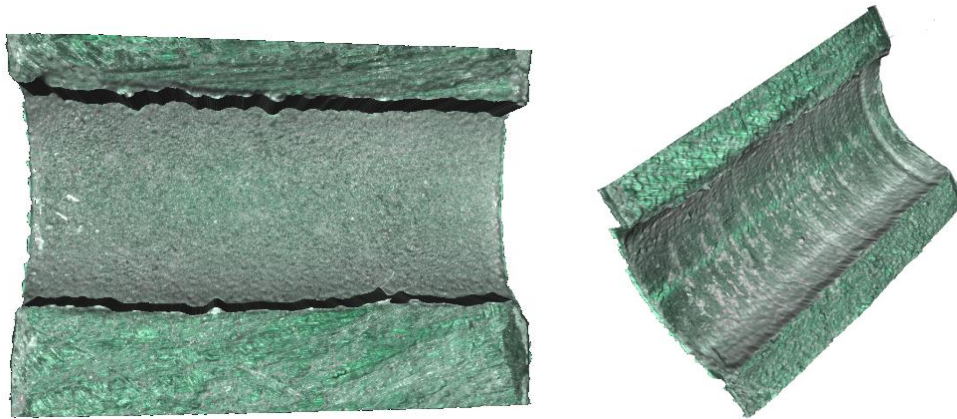
Na snímcích jsou vidět naskenované povrchy otvorů v celé délce vrtu (6,2mm).



Obrázek 30: Sken – vlevo Laser 2600[mm/min], vpravo Laser 100[mm/min]



Obrázek 31: Sken - vlevo Laser 50[mm/min], vpravo Vodní parsek



Obrázek 32: Sken vlevo EDM, vpravo Vrták HSS

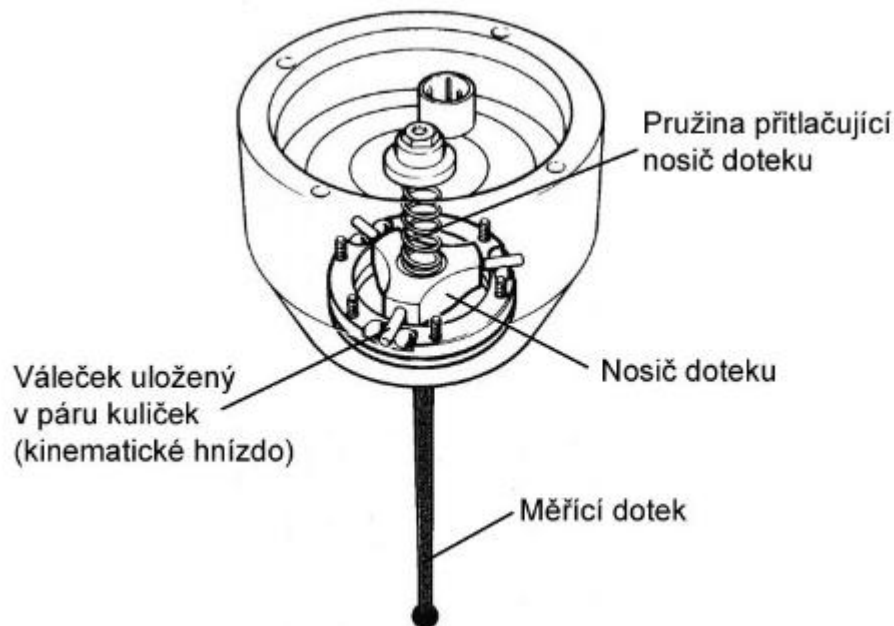
Z vizuálního pohledu jsou vidět rozdílné textury povrchu uvnitř otvorů, vrtaných různými metodami. U otvorů vyvrtaných laserem jsou podélné rýhy způsobené paprskem laseru. Není vidět žádný rozdíl zjemnění rýh mezi jednotlivými řeznými rychlostmi. Uvnitř otvoru vyvrtaného vodním paprskem se nacházejí mikro krátery nesourodě umístěné. Povrch se zdá být jemnější než u laseru a nejsou na něm vidět žádné stopy od paprsku jako na obrázku 3, takže kvalita řezu je úroveň Q5. Vrtání vrtákem způsobilo také rýhování ovšem kolmé na směr posuvu vrtáku. Tyto rýhy jsou vytvořené od hrany ostří. Jednoznačně nejkvalitnější povrch byl vytvořen metodou EDM s jemnou zrnitou texturou.

3.6 Měření otvorů

3.6.1 Princip měření dotkovou sondou[19,20,21]

Jelikož v průmyslových odvětvích je vyžadována, čím dál větší rozměrová přesnost a rozmanitost různých tvarů jednotlivých dílů, musí i měřicí přístroje a systémy držek krok s tímto neustálým zpřesňováním.

Při kontaktu doteku sondy s měřeným dílem se vytváří síla. Ta se zvyšuje až do hodnoty nastavení. Po dosažení této hranice se vygeneruje spínací signál, který vede k zaznamenání souřadnic. Druhy snímacích sond jsou odvozeny od typu vyvolání spínacího signálu: odporové, tenzometrické, piezoelektrické. Konkrétně se měřilo s typem sondy Renishaw PH9.

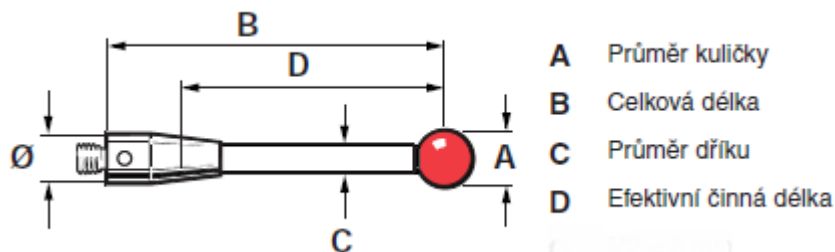


Obrázek 33: Schéma kinematické sondy[20]

Na obrázku 33 je schéma dotekové sondy, kde je kinematické uspořádání. To se skládá ze třech tzv. kinematických hnízd. Hnízdo je tvořeno jedním válečkem a dvěma kuličkami, které jsou k sobě přitlačovány pružinou. Při působení síly tento mechanismus umožní vychýlení doteku. Když síla přestane působit, tedy ke kontaktu už nedochází, zajistí mechanismus vrácení doteku do výchozí polohy.

Mechanismus je zapojen do elektrického obvodu a po vychýlení doteku dochází i k vychýlení elektrických kontaktů. Poté v elektrické soustavě dochází ke zvýšení elektrického odporu. Tato změna odporu je spojena ve vyhodnocovacím zařízení jako kolize

s měřeným dílem a jsou zaznamenány souřadnice pohybu sondy v jednotlivých osách. Díky přepjatosti mechanismu pružinou je docíleno dobré opakovatelnosti měření.



Obrázek 34: Dotek sondy[21]

Kvalita měření je z velké části ovlivněna dotykem. Je to jedna z částí měřicího systému. Zajišťuje kontakt mezi měřeným dílem a sondou, po kterém dochází k sepnutí v mechanismu sondy. Nejdůležitější vlastností doteku je maximální tuhost doteku a dokonalá kruhovitost hrotu. Proto jsou stopky doteků vyráběny na CNC obráběcích strojích s nejvyšší možnou kvalitou.

Upevnění mezi kuličkami a stopkami je takové, aby spoj měl vysokou celistvost a neporušitelnost. Chybovost měření je velmi pravděpodobná při použití doteku s nepřesnou kruhovitostí hrotu, nesprávným umístěním kuličky, nepřesným závitem nebo konstrukcí, která umožňuje příliš velký ohyb. Pro měření je možno si zvolit z různých druhů dotyků v závislosti na měřené součásti. Mezi jednotlivé druhy dotyku patří: přímé doteky, hvězdicové doteky, diskové doteky, válcové doteky. Délku těchto doteků lze zvětšit prodlužovacím nástavcem, což zvýší možnost se dostat k méně přístupným místům, ale zase může docházet k méně přesným výsledkům, jelikož soustava doteku s nástavcem je méně tuhá. Proto se doporučuje **mít délku dotyku co nejkratší**, jelikož dochází k minimálnímu ohybu. Dále pro co nejmenší chybu měření je třeba snížit počet spojů na minimum, protože každý spoj doteku a prodlužovacího nástavce se stává zdrojem možných deformací a bodů ohybu. Takže je vhodné snížit na minimum počet dílů, z kterých je dotek složený. Další ovlivnění měření může způsobit **velikost průměru kuličky**. Pro co nejpresnější výsledek, je třeba volit kuličku s co největším průměrem a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem je maximální mezera mezi kuličkou a stopkou doteku. Tím se zmenší pravděpodobnost sepnutí po kontaktu stopky s hranou měřeného dílu. Druhým důvodem je že kvalita povrchu např. vysoká drsnost neovlivní výsledek měření.

Další otázkou pro přesné měření je **volba materiálu kuličky doteku**. Jako jeden z nejčastěji používaných materiálů je **rubín**, který se vyznačuje velkou tvrdostí. Dokonce je to jeden z nejtvrdších materiálů. Avšak existují případy, kdy rubín pro měření není vyhovující. Jedním z případů je přejíždění po hliníkových materiálech, kdy dochází k adheznímu otěru a hliník se usazuje na povrchu kuličky. Lepší materiál pro měření hliníkových dílů je **nitrid křemíku**. Nitrid křemíku je materiál tvrdý, odolný vůči opotřebení a je možno jej zpracovat na velmi přesné kruhovitě tvary a lze jej leštit, takže má velmi hladký povrch. Jeho použití je ideální právě pro hliník, jelikož nedochází mezi těmito materiály k adheznímu otěru. Nemůže být však používán pro měření ocelových součástí, protože právě mezi nimi vzniká otěr. Další materiál, při jehož měření nelze použít rubínová kulička jsou litinové materiály, kdy také dochází k adheznímu otěru. Pak se používá kulička z **oxidu zirkoničitého**, což je keramický materiál. Jeho vlastnosti jsou velice podobné vlastnostem rubínu.

3.6.2 Měření průměrů otvorů v dolní a horní části

Průměry jednotlivých otvorů byly měřeny jak v horní tak dolní části. V první řadě byly změřeny průměry na mikroskopu, metodou označení tří bodů na obvodu kružnic. Tato metoda není zcela přesná a to ze dvou hlavních důvodů:

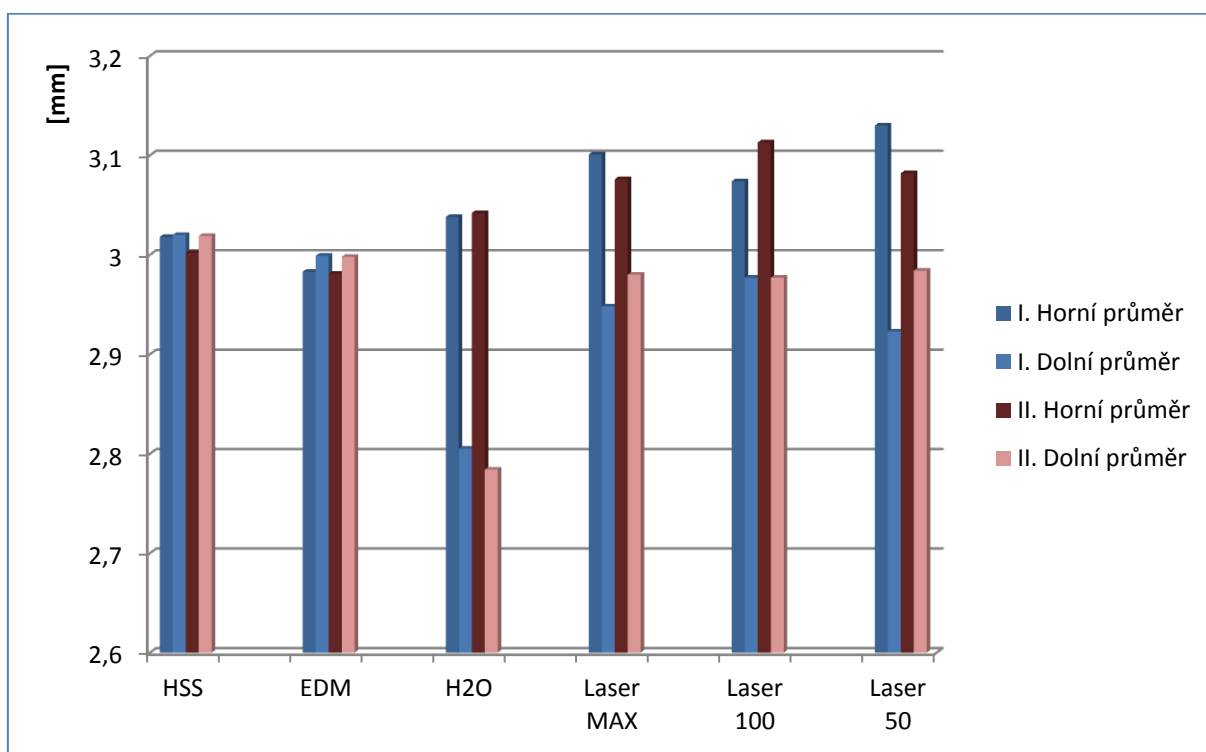
- Povrchy vstupů a výstupů otvorů jsou pokryty vadami (nataveniny, třísky), proto není možné přesně zachytit okraj otvoru, což při měření s přesností na setiny je zcela zásadní
- Po zadání třech bodů na obvodu se vytvoří ideální kružnice, která však nezachytí různé odchylky, které jsou po obvodech vstupů a výstupů otvorů.

Proto se hodnoty průměrů změřily dotykovou sondou ve firmě ASTRO-KOVO. Kromě průměrů se dotykovou sondou změřila kruhovitost a sousost otvorů. Měření probíhalo ve hloubce $h_1=0,6\text{mm}$ a $h_2=5\text{mm}$ od horního povrchu vzorku. To je z toho důvodu, aby se nepoškodila jak kulička dotyku, tak i stopka sondy. Byla použita kulička o $\varnothing 2[\text{mm}]$ z rubínu, délka dřívku byla $20[\text{mm}]$. Celkově proběhlo tedy na dvanácti otvorech čtyřiadvacet měření sondou, což trvalo zkušenému pracovníkovi z oddělení kontroly půl hodiny.

Jelikož byly naměřené hodnoty na mikroskopu a na sondě, změřily se ještě průměry digitálním posuvným měřítkem. Při měření drsnosti na přístroji IFM se naměřily hodnoty průměrů i čtvrtou metodou a následně tyto hodnoty různých metod porovnal (Graf 6,7).

		Sonda		Mikroskop		Posuvné měřítko		IFM	
		Horní \emptyset	Dolní \emptyset	Horní \emptyset	Dolní \emptyset	Horní \emptyset	Dolní \emptyset	Horní \emptyset	Dolní \emptyset
Vrták HSS	I.	3,018	3,02	3,045	3,012	2,99	2,92	3,0248	3,0408
	II.	3,002	3,019	3,04	3,024	2,97	2,84		
EDM	I.	2,983	2,999	2,999	2,988	2,92	2,92	2,998	3,0096
	II.	2,981	2,998	2,999	2,992	2,95	2,94		
Vodní paprsek	I.	3,038	2,805	3,075	2,753	2,97	2,58	3,0796	2,7442
	II.	3,042	2,784	3,052	2,704	3	2,65		
Laser MAX	I.	3,101	2,948	3,23	3,005	3,08	2,95	3,1594	3,1442
	II.	3,076	2,98	3,205	3,004	3,04	2,89		
Laser 100	I.	3,074	2,977	3,2196	2,991	3,03	2,88	3,1056	3,0792
	II.	3,113	2,977	3,232	2,949	3,05	2,84		
Laser 50	I.	3,13	2,923	3,221	2,962	3,08	2,94	3,1082	3,0576
	II.	3,082	2,984	3,21	3,005	3,07	2,89		

Tabulka 6: Naměřené průměry různými metodami

Graf 3: Rozměrová přesnost \emptyset jednotlivých metod vrtání – hodnoty sondy

V tabulce 7 jsou všechny hodnoty naměřené sondou v horní a dolní části vzorku, různými metodami a laseru s různými řeznými rychlostmi. Je zřejmé, že nejbližší požadovanému průměru je metoda klasická tedy vrtákem HSS a metoda EDM. Vrták má hodnoty lehce přes hranici tří milimetrů. To je logické, jelikož při přesném rozměru $\emptyset 3$

vrtáku nemůže být průměr díry menší, ale naopak bude vždy větší. V tomto případě se jedná o malou výchylku maximálně o dvě setiny. U EDM jsou naopak hodnoty menší než požadovaný \varnothing . To může být dáno tím, že elektroda o $\varnothing 3$ [mm] byla již použita a částečně opotřebena (musí být vyměněna za novou po třiceti otvorech), ale mluvíme zde o maximální (zanedbatelné) výchylce lehce přes jednu setinu.

U otvorů vyvrtaných vodním parsem jsou vidět u obou otvorů značné rozdíly rozměrů (0,23mm) v horní a dolní části. To ukazuje na značnou kuželovitost uvnitř otvoru. Kuželovitost je dobře vidět i na skenu z IFM.

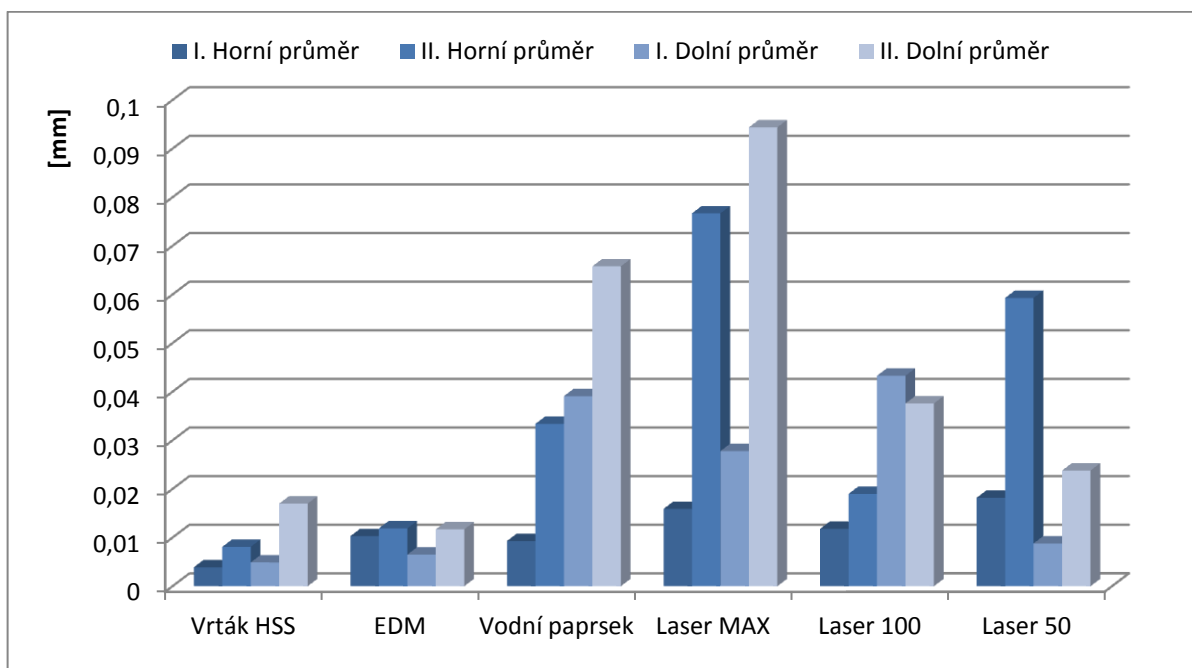
Otvory vrtané různými posuvy laseru vykazují podobné rozdíly průměrů horní a dolní části, i když to nejsou rozdíly tak markantní. **Zajímavé je, že rychlost řezné rychlosti neměla vliv na přesnost rozměrů \varnothing a naopak nejpomalejší posuv má nejvyšší nepřesnost.**

Pro metody využívající parsek tj. paprsky vody a laseru je šířka vzorku příliš velká k vyrobení otvoru na požadovaný průměr.

Další parametr naměřený sondou je kruhovitost jednotlivých otvorů. Hodnoty nalezneme v tabulce níže.

	I. Horní \varnothing	II. Horní \varnothing	I. Dolní \varnothing	II. Dolní \varnothing
Vrták HSS	0,0039	0,0081	0,0049	0,017
EDM	0,0103	0,0119	0,0065	0,0117
Vodní paprsek	0,0093	0,0334	0,0391	0,0658
Laser MAX	0,0159	0,0767	0,0278	0,0944
Laser 100	0,0118	0,019	0,0433	0,0376
Laser 50	0,0182	0,0593	0,0088	0,0238

Tabulka 7: Hodnoty kruhovitosti

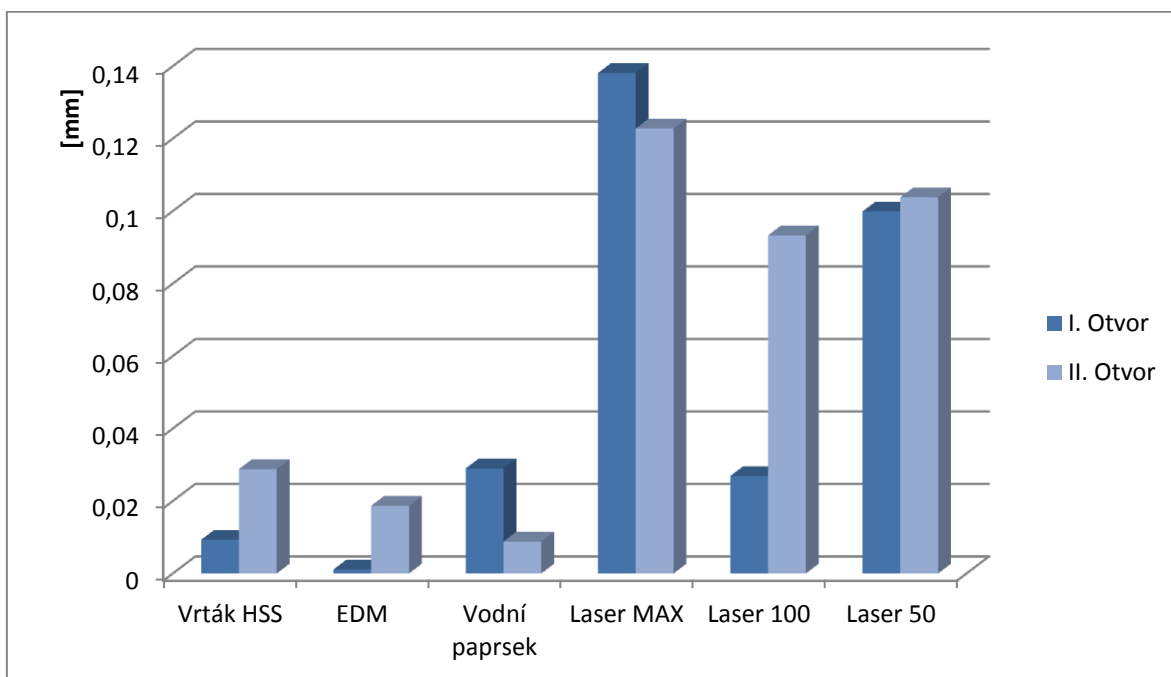


Graf 4: Kruhovitost

Jak bylo již k vidění ze snímků mikroskopu na otvorech jednotlivých metod, je prokázáno i hodnotami. Hodnoty vzdalující se nejvíce od ideální kruhovitosti má dolní část II. otvoru při vrtání vodním paprskem a pak druhý otvor maximální řezné rychlosti u laseru. Otvory vyrobené vrtákem a EDM se stejně jako u rozměrů \varnothing , nejvíce blíží ideální hodnotě – nule.

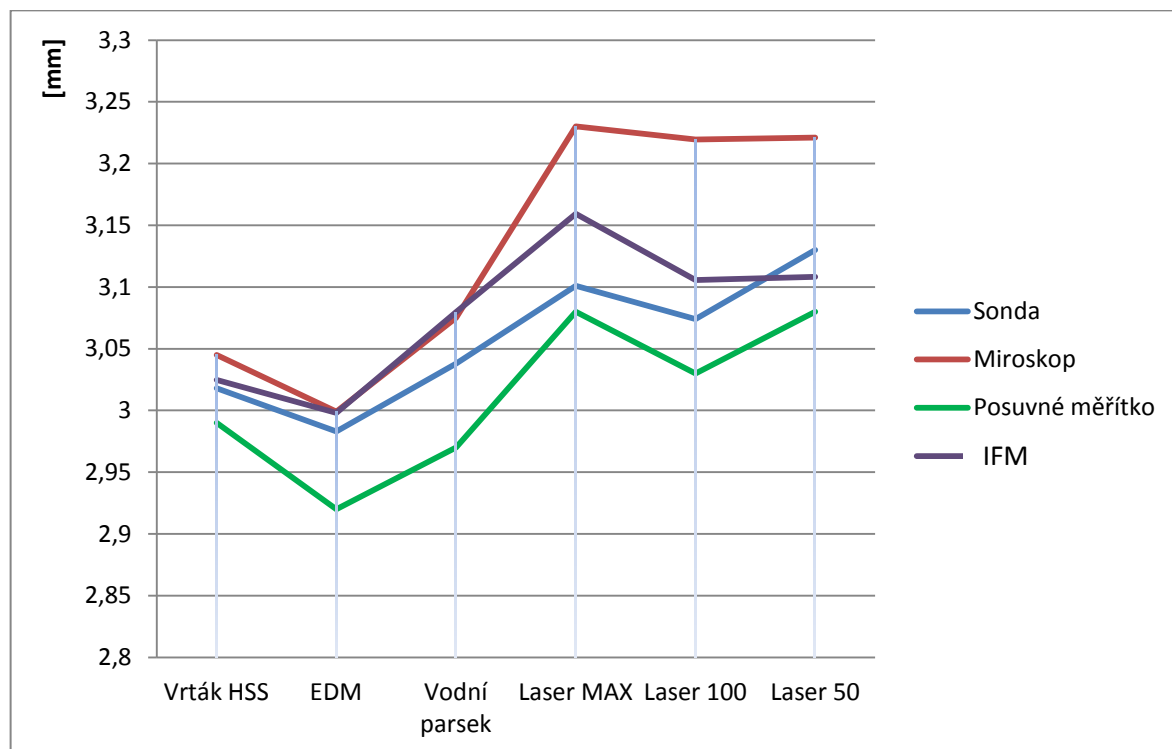
	I. Otvor	II. Otvor
Vrták HSS	0,0093	0,0288
EDM	0,0011	0,0187
Vodní paprsek	0,029	0,0088
Laser MAX	0,1381	0,1228
Laser 100	0,0269	0,0933
Laser 50	0,0999	0,1038

Tabulka 8: Hodnoty souososti

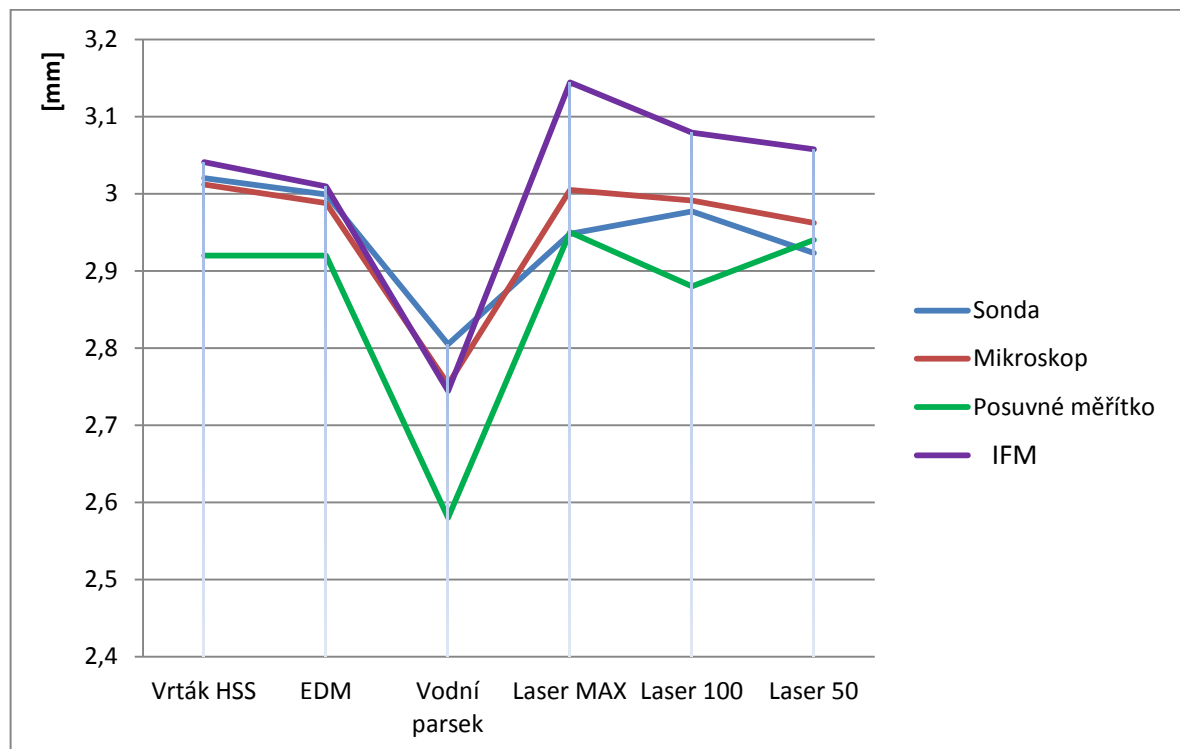


Graf 5: Souosost

Nepřesnější souosost v daných místech měření se dosáhlo metodou EDM u prvního otvoru. Velmi souosé jsou i otvory vyvrtané vodním paprskem a vrtákem. Naopak kružnice průměrů u otvorů vyvrtaných jednotlivými posuny laseru mají vyosení okolo jedné desetiny.



Graf 6: Porovnání naměřených hodnot, různé metody měření – horní Ø



Graf 7: Porovnání naměřených hodnot, různé metody měření – dolní Ø

V grafech výše jsou srovnány hodnoty \emptyset , naměřené různými metodami v horní a dolní části vzorku. Srovnány jsou I. otvory u všech druhů vrtání. Jako nejdůvěryhodnější hodnoty považují ty, které byly naměřeny sondou, i když nebyly naměřeny přímo na povrchu. Hodnoty \emptyset naměřené sondou, optickým mikroskopem a IFM jsou u otvorů vyvrtaných vrtákem a EDM rozdílné o jednu až tři setiny. Malé rozdíly jsou dány celkovou kvalitou díry. Hrany jsou ostré bez různých natavenin, a proto se daly při měření mikroskopem zachytit body kružnice přesně. Kruhovitost těchto otvorů je taky minimální, proto ideální vytvořená kružnice jak mikroskopem, tak IFM kopíruje kružnici průměrů otvorů. Otvory po vodním parseku jsou sice ostré bez vad, ale kruhovitost je vysoká proto také rozdílné hodnoty u různých metod. Velké rozdíly naměřených hodnot v řádech desetin milimetru jsou pak u otvorů vytvořených laserem. Je to dáno vyšší kruhovitostí i nataveninami na povrchu. Hodnoty naměřené posuvným měřítkem jsou celkově menší o 0,15 až 0,05 mm. Z celkového hlediska jsou průběhy hodnot z měření podobné.

3.7 Měření na přístroji Infinite Focus G4 (IFM)

Pro měření na tomto přístroji musely být otvory rozříznuty, tak aby přístroj naskenoval otvory v celé délce. Rozřezávali se jen I. otvory. Snaha byla, aby řezy vedly středy otvorů.

Jelikož otvory nebyly vyvrtány v jedné rovině, ne vždy se povedl řez středem. Na IFM se provedly následující operace:

- Měření drsnosti povrchů
- Sken průřezu otvorů
- Odchyly od ideální válcovitosti
- Měření \varnothing otvorů

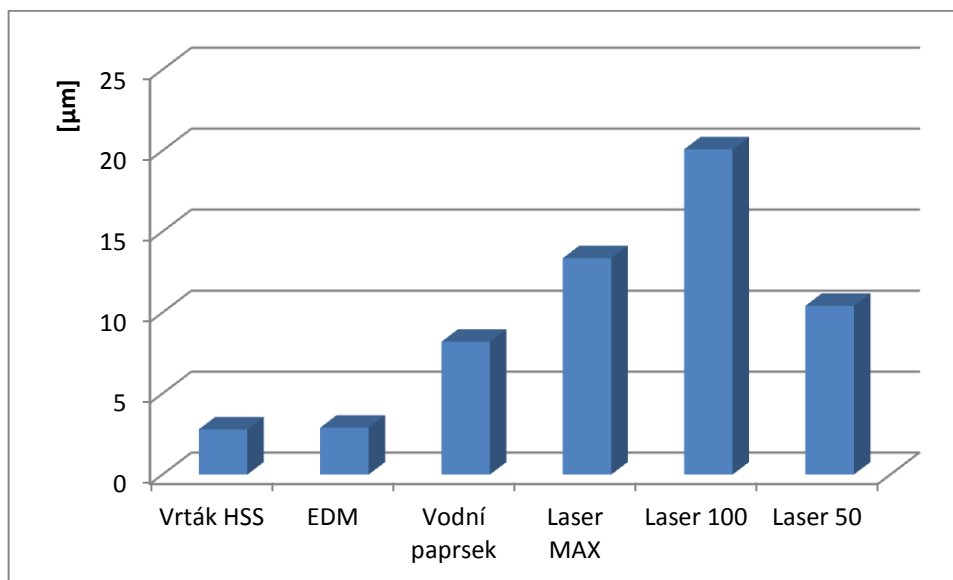
3.7.1 Měření drsnosti povrchu

U jednotlivých otvorů se budou porovnávat plošné drsnosti S_a , S_z , S_q . Při zkoušce měření profilové drsnosti u laseru ve třech různých místech otvoru byly naměřeny rozdílné hodnoty, proto by porovnání profilových drsností R_a , R_z nemělo žádnou vypovídající hodnotu. Naměřily se proto hodnoty plošné drsnosti S_a , S_z , S_q . Měření drsností proběhlo po celé ploše otvorů. Z grafů vidíme, že nejlepší hodnoty vykazují otvory po vrtáku a EDM.

Drsnost u laseru není ovlivněná rychlostí řezu.

	Vrták HSS	EDM	Vodní paprsek	Laser MAX	Laser 100	Laser 50
S_a [μm]	2,7905	2,8929	8,2024	13,3605	20,0826	10,4191

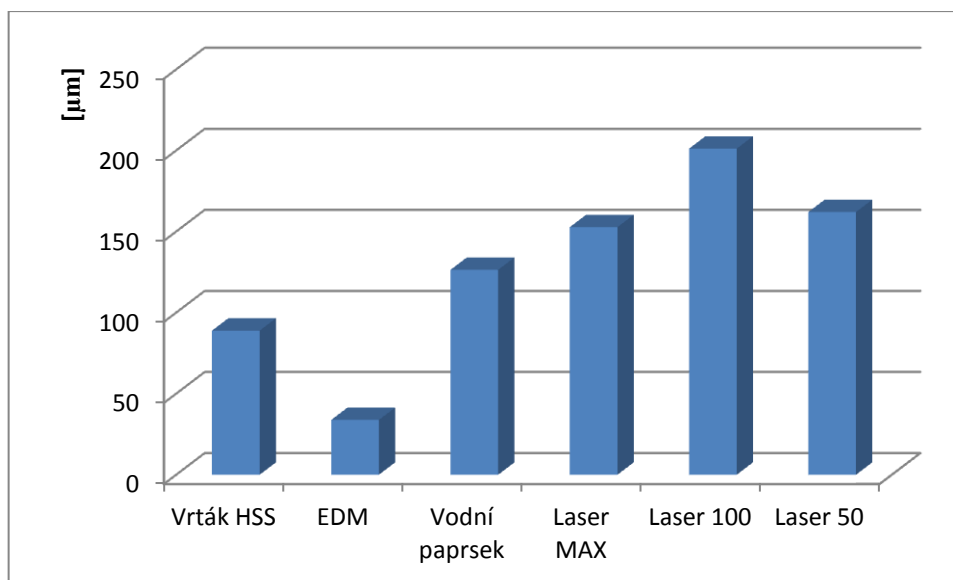
Tabulka 9: Hodnoty S_a



Graf 8: Plošné drsnosti S_a

	Vrták HSS	EDM	Vodní paprsek	Laser MAX	Laser 100	Laser 50
Sz[μm]	88,8609	33,8078	126,3624	152,6817	201,0945	161,9939

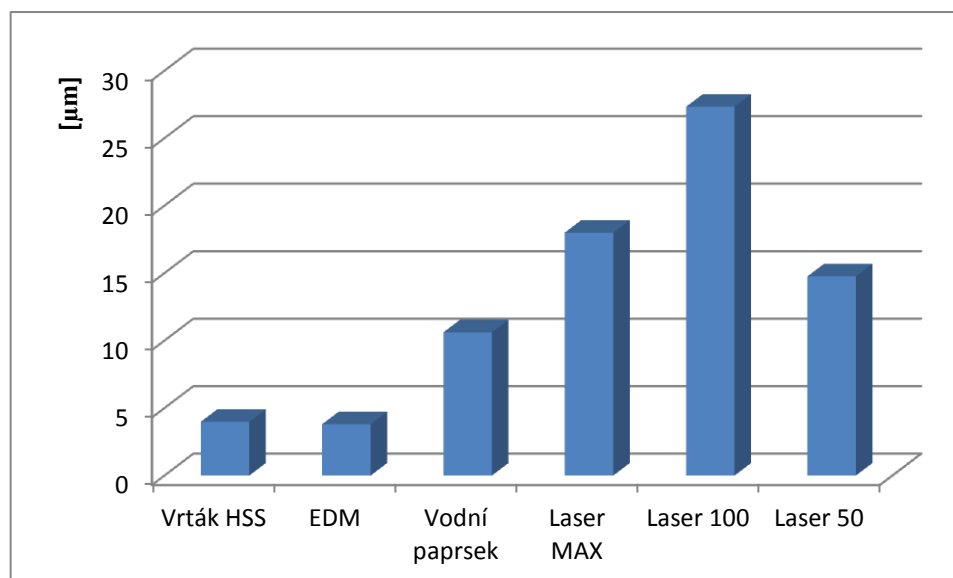
Tabulka 10: Hodnoty Sz



Graf 9: Plošné drsnosti Sz

	Vrták HSS	EDM	Vodní paprsek	Laser MAX	Laser 100	Laser 50
Sq[μm]	3,9869	3,8048	10,6152	18,0021	27,3286	14,7582

Tabulka 11: Hodnoty Sq

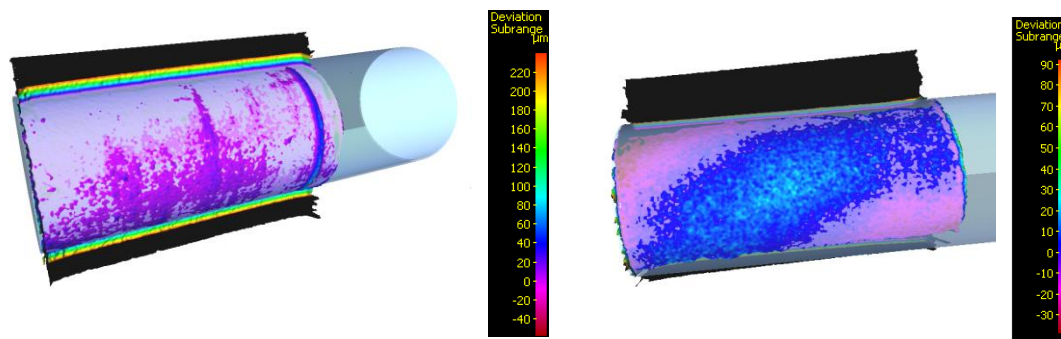


Graf 10: Plošné drsnosti Sq

3.7.2 Odchyly od povrchu ideálního válce otvorů

Jednotlivé otvory byly proloženy ideálním válcem o $\varnothing 3$ [mm]. Na následujících snímcích jsou dobře vidět odchyly od ideální válcovitosti u jednotlivých metod. Tyto odchyly byly naskenovány na přístroji IFM.

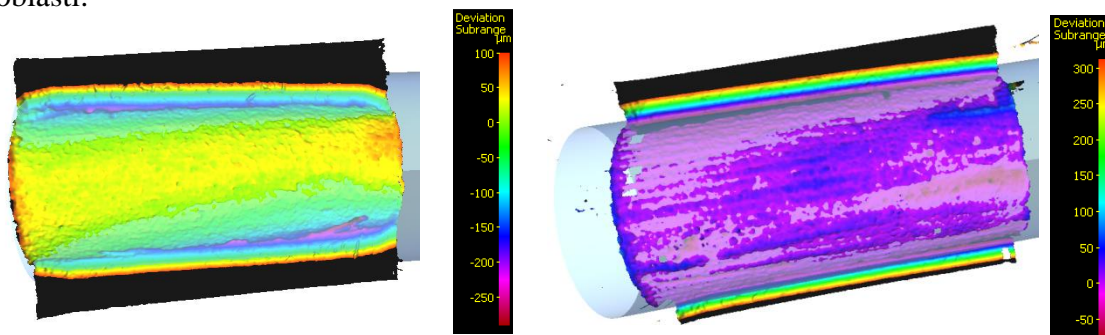
Na snímcích jsou odchyly a jejich velikosti dány barvami, které mají na stupnici přiřazené velikosti. U každého snímku je stupnice, podle které máme přehled o jejich velikosti. Každá stupnice má pro velikosti odchylek různé barevné zabarvení a její hodnoty jsou v μm .



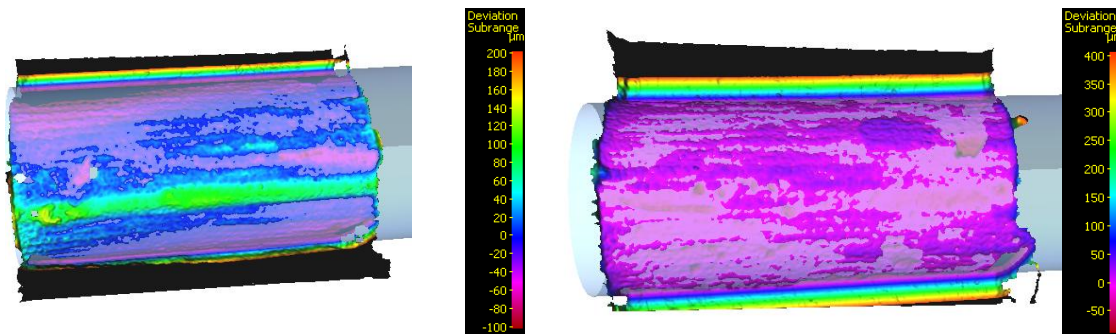
Obrázek 35: Odchyly - vlevo vrták HSS, vpravo EDM

U vrtáku je vidět oblast odchyly okolo $10 \mu\text{m}$ částečně přecházející na modrou oblast $20 \mu\text{m}$. Výrazná je rýha v dolní části vrtu sahající až k $90 \mu\text{m}$ odchylce (bledě modrá). To mohlo být zapříčiněno například uvíznutím nějaké nečistoty mezi vrtákem a materiálem.

Uvnitř otvoru vrtaného pomocí EDM jsou v této polovině otvoru dvě části odchylek. Jedna část (modrá) je odchylka nad nulou okolo $10 \mu\text{m}$ částečně i $20 \mu\text{m}$. Druhá část je s odchylkou $-10 \mu\text{m}$. Různé odchyly mohou být dané menším nebo větším zajištěním v dané oblasti.



Obrázek 36: Odchyly – vlevo vodní parsek, vpravo laser 2600[mm/min]



Obrázek 37: Odchylky – vlevo laser 100[mm/min], vpravo laser 50[mm/min]

U vodního parsku je odchylka od ideálního povrchu uvnitř otvoru $40\ \mu\text{m}$. To je vidět v horní části otvoru. Dále se odchylka snižuje až po $0,2\text{mm}$, ale to je odchylka od válcovitosti a znázorňuje kuželovitost a ne povrchové odchylky.

U laseru $2600[\text{mm}/\text{min}]$ jsou odchylky v rýhách okolo $50\ \mu\text{m}$. Při řezné rychlosti $100\text{mm}/\text{min}$ se vytvořila velká rýha. Která má odchylku až $120\ \mu\text{m}$. Při nejnižší řezné rychlosti byla odchylka okolo $40\ \mu\text{m}$.

3.7.3 Ekonomická náročnost

Byla vznesena žádost na jednotlivé firmy, aby nacenily vrtání do ocelového vzorku. Jednak vyvrtání jednoho otvoru a pak vyvrtání sta otvorů do jednoho dílu se stejnými parametry (materiál, šířka, \varnothing otvoru) jako má náš vzorek.

Ve firmě Awac by vyšlo vyvrtání jedné díry na $3,60\ \text{Kč}/\text{ks}$ plus $1\ \text{Kč}/\text{ks}$ (sto otvorů) za nastavení programu. Celkem by tedy vyšlo vyvrtání sta otvorů do jednoho obrobku o parametrech našeho vzorku na $460\ \text{Kč}$. Vyvrtání jednoho otvoru by vyšlo pak na $150\ \text{Kč}$.

Vrtání pomocí vrtáku HSS by zákazníka vyšlo na $3,50\ \text{Kč}/\text{ks}$ za sto otvorů do jednoho obrobku. Celkově tedy na $350\ \text{Kč}$. Jedna díra by vyšla na $150\ \text{Kč}$ stejně jako u vodního parsku, z důvodu seřízení stroje a upnutí obrobku.

Vyšší cena za jeden otvor by byla při výrobě laserem: $6\ \text{Kč}/\text{ks}$ při výrobě 100 otvorů. Celková cena by pak byla $600\ \text{Kč}$. Za jeden otvor by bylo třeba zaplatit $100\ \text{Kč}$

Jiskření elektrodou by se trochu prodražilo... Důvodů je hned několik. Začneme tedy výrobou jednoho otvoru, která v našem případě zabrala 47 minut (1. důvod). 2. důvod je napuštění a vypuštění vany dielektrikem trvá dalších pět minut. Samozřejmě se musí započítat i další časové ztráty (příprava programu, upnutí obrobku, příprava elektrody, najetí na pozici)

což zabere cca 30 minut. Firma si účtuje za hodinovou sazbu stroje (HSS) přibližně 500 Kč. Sečteno a podtrženo výroba jednoho otvoru vyjde na 708 Kč. Při nacenění výroby sto otvorů je navíc třeba uvažovat opotřebení elektrody, kterou je třeba vyměnit po třiceti otvorech. S tím je spojeno vypuštění a napuštění vany. V době vypuštění vyměnit elektrodu a seřídít. Celková doba výměny elektrody je tedy 15 minut. Výměnu bude nutné provést minimálně dvakrát. Celkový součet časů tedy je $T_c = 100 \cdot 50 (\text{otvory} \cdot \text{čas výroby}) + 2 \cdot 15$ (dvě výměny elektrody) + 5 (napuštění a vypuštění na začátku) + 30 (příprava obrobku) = 5065 minut (84,4 hodin). Poté tedy výroba sta otvorů vyjde na 42 208 Kč

Vrták HSS	EDM	Vodní paprsek	Laser
150	460	150	100

Tabulka 12: Ceny vyvrtání jednoho otvoru v Kč

Vrták HSS	EDM	Vodní paprsek	Laser
350	42200	460	600

Tabulka 13: Ceny pro 100 otvorů vyvrtaných do jednoho obrobku v Kč

3.7.4 Shrnutí výhod a nevýhod při vrtání do daného vzorku

	Výhody	Nevýhody
Vodní parsek	Rychlost Cena Čistý řez bez nečistot Dosažená drsnost Souosost Změna řezné rychlosti má vliv na kvalitu	Velká kuželovitost Kruhovitost otvorů v dolní a horní části
Laser	Cena Rychlost Bez časových ztrát upnutí (položení na rošt)	Kuželovitost (ale menší než u VP) Nesouosost Velké hodnoty drsností Žádné zlepšení kvality při redukci řezné rychlosti TOO Nataveniny v oblasti otvorů
EDM	Vysoká přesnost všech naměřených hodnot Nízké hodnoty drsností Otvory z vizuálního hlediska dokonale kruhové, bez nečistot Nejvyšší dosažená kvalita otvoru	Cena více otvorů Doba výroby a celkového seřízení stroje (napuštění a vypuštění elektrolytu, upnutí elektrody)
Vrták HSS	Cena Rychlost Naměřené hodnoty blízké hodnotám EDM (i drsnosti)	Třísky a ořepy na dolní straně obrobku Delší upnutí a seřízení než u laseru a vodního parsku

Tabulka 14: Výhody a nevýhody jednotlivých metod pro daný vzorek

Vodní paprsek	19 [s]
Laser 2600	7 [s]
Laser 100	10 [s]
Laser 50	14 [s]
EDM	47 [min]
Vrták HSS	12 [s]

Tabulka 15: Přehled časové náročnosti výroby jednoho otvoru

4 Závěr

V teoretické části byly popsány principy čtyř nekonvenčních metod, které jsou vhodné pro výrobu malých otvorů: vodní paprsek, laserový paprsek, EDM, LMJ. Pro český trh je neznámá metoda LMJ, která je kombinací dvou významných nekonvenčních metod – parsku laseru a paprsku vody. Tato technologie se postupně rozvíjí a je dostupná v několika zemích světa. V této technologii může být skryta budoucnost nekonvenčních technologií pro výrobu malých otvorů, ale i pro další obrábění materiálu jako je řezání. To se projeví v následujících letech, jak rychle bude metoda expandovat do různých zemí a rozvíjet se.

V praktické části dokázaly vyvrtat otvory (do materiálu 12 050, $\varnothing 3\text{mm}$, tloušťce 6,2mm) všechny následující zvolené nekonvenční metody: vodní paprsek, paprsek laseru i EDM. Pro srovnání se vyvrtaly otvory konvenční metodou, tedy vrtákem z HSS na obráběcím centru. Kvalita otvorů je vyjádřena naměřenými hodnotami jako \varnothing otvorů v horní a dolní části vzorku, kruhovitost, souosost, plošné drsnosti Sa, Sq, Sz. Kvalita otvorů je dána i vizuálními snímky z mikroskopu a snímky povrchu v otvorech z IMF.

Kvalita otvorů vyvrtaných metodou EDM, byla jednoznačně nejlepší ze všech posuzovaných hledisek. Nejvíce se kvalitě otvorů EDM blíží otvory vyvrtané vrtákem z HSS, a to zejména naměřené hodnoty. Na snímcích z mikroskopu jsou však vidět nedokonalosti a to zejména třísky a odštěpy v dolní části otvorů.

Vrtání pomocí parsků nepřineslo tak dobré výsledky, jako předchozí dvě metody. Laserem se po prvním vrtání při maximální řezné rychlosti $v = 2600[\text{mm}/\text{min}]$ vyzkoušely pomalejší rychlosti $v = 100$ a $50 [\text{mm}/\text{min}]$. Ovšem ani zredukování řezné rychlosti nepřineslo žádné zlepšení z hlediska kvality otvorů. Změny rychlostí posunu neměly žádný vliv na naměřené číselné hodnoty a z vizuálního pohledu jsou otvory ještě méně kvalitní. Natavenin v oblasti otvorů bylo více, takže zredukovaná řezná rychlost měla vliv negativní. Otvory vyvrtané vodním parskem jsou z vizuálního pohledu kvalitní. Jsou bez TOO v okolí otvoru, bez třísek a otřepů, ale i z vizuálního pohledu je patrný rozdíl v rozměrech \varnothing v dolní a horní části, což je dokázáno měřením – velká kuželovitost otvoru. Ve srovnání s laserem však vykazuje lepší hodnoty drsnosti, souososti i kruhovitosti.

Při volbě vrtání otvorů jednotlivými metodami je však důležité zvážit i ekonomické hledisko výroby. To je v našem případě úměrné kvalitě otvorů vyvrtaných EDM. Tyto otvory mají dražší výrobu, což se výrazně projeví při výrobě většího počtu otvorů. Je to dané také

vysokou časovou náročností výroby. EDM je vhodné pro kusovou výrobu děr, kde je požadovaná vysoká rozměrová přesnost a celková kvalita. Při vrtání do obrobku o podobných parametrech se z celkového hlediska jeví nejlepší volba vrtání vrtákem z HSS. Vrtání vodním paprskem malých otvorů by bylo velmi platné pro plechy s menší šířkou. To by pak nevznikla kuželovitost, která je největší vadou otvorů v tomto vzorku, při vrtání vodním paprskem. Pro laser platí to samé jako pro vodní paprsek, ovšem okraje budou vznikat i nadále.

5 Seznam použité literatury

- [1] Water jet cutter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2014 [cit. 2014-06-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter
- [2] *Flow water jet* [online]. 2014 [cit. 2014-06-18]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ>
- [3] Vodní paprsek. *INNET | VŠB - Technická univerzita Ostrava* [online]. 12.1.2010 [cit. 2014-06-19]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>
- [4] About Water Jet Cutting. *Forton* [online]. 2014 [cit. 2014-06-19]. Dostupné z: <http://www.fortron.uk.com/water-jet-cutting.php>
- [5] Abrasivní materiály pro úpravu povrchů. *Spolmont* [online]. 2011 [cit. 2014-06-19]. Dostupné z: http://www.spolmont.cz/sortiment/abrasiva-na-tryskani_cz.html
- [6] History Of Lasers. *World of Lasers* [online]. 16.1.2014 [cit. 2014-06-21]. Dostupné z: <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>
- [7] *Laser* [online]. 2013 [cit. 2014-06-21]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/>
- [8] Světlo, Laserové záření. *Terapie pro 21. století* [online]. 2009 [cit. 2014-06-21]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/laserove-zareni.php>
- [9] Rozdělení laserů. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2000-2014 [cit. 2014-06-21]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>
- [10] Vrtání. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-06-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
- [11] Obrábění vodním paprskem a laserem. In: *Speciální metody obrábění* [online]. 2014 [cit. 2014-06-21]. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_SMO_PR_14_CZE_Popov-Jersak_Obrabeni_vodnim_paprskem_a_laserem.pdf
- [12] CO2 nebo pevnolátkový laser? Vaše volba. *TRUMPF Česká republika* [online]. 2014 [cit. 2014-06-22]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/co2-nebo-pevnolatkovy.html>
- [13] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064nm Infra red. *Leonardo technology: Automatizace průmyslového značení* [online]. 2005-2013 [cit. 2014-06-22]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=12>
- [14] Obrábění paprskem fotonů – laserem. *Nekonvenční metody obrábění* [online]. 19.3.2008, č. 4 [cit. 2014-06-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html> [15] The patented Laser MicroJet principle. In: *SYNOVA* [online]. [cit. 2014-06-22]. Dostupné z: http://www.synova.ch/fileadmin/user_upload/pdf/Laser_microJet_technology_brochure.pdf
- [16] Water jet guided laser as an alternative to EDM for micro-drilling of fuel injector nozzles: A comparison of machined surfaces. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2013 [cit. 2014-06-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S152661251300087X>
- [17] Přírodní granát - GARNET. *Abranova* [online]. 2007 [cit. 2014-06-23]. Dostupné z: <http://www.abranova.cz/brusne-materialy/prirodni-granat-garnet.htm#>
- [18] Tabulka MESH a MIKRON. [online]. 2014 [cit. 2014-06-23]. Dostupné z: <http://www.ohnostroje-zvonek.cz/index.php/tabulka-mesh-a-mikron>

- [19] Slovníček práce se sondami a terminologie. *Renishaw* [online]. 2001-2014 [cit. 2014-06-17]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/slovnicek-prace-se-sondami-a-terminologie--12479>
- [20] *INTEGRACE MĚŘENÍ DO CNC OBRÁBĚNÍ*. Brno, 2010. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28397
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [21] Technické parametry: Doteky a příslušenství. In: *Doteky a příslušenství* [online]. 2002-2012 [cit. 2014-06-17]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/cs/details/technicke-parametry-doteky-a-prislusenstvi--45939>
- [22] Elektrojiskrové obrábění. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2013 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrojiskrov%C3%A9_obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD
- [23] *VÝROBA VYSOKOTLAKÉHO ZÁSOBNÍKU S VYUŽITÍM ELEKTROEROSIVNÍHO OBRÁBĚNÍ* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51248.
Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE.
- [24] Non-Traditional Methods for making small holes. In: *COHERENT* [online]. 2002 [cit. 2014-06-25]. Dostupné z: <http://www.coherent.com/Downloads/NonTraditionalMethodsforMakingSmallHolesRev2.pdf>
- [25] FYZIKÁLNÍ (NEKONVENČNÍ) TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ. [online]. [cit. 2014-06-26]. Dostupné z: <http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>
- [26] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. 2007 [cit. 2014-06-26]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni.html>
- [27] Nekonvenční metody obrábění. In: [online]. [cit. 2014-06-26]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=33789&instance=2>.

6 Seznam obrázků

Obrázek 1: a) Čistý vodní paprsek; b) Vodní paprsek s abrazivem [4].....	15
Obrázek 2: Typy řezů - vodní paprsek[3].....	15
Obrázek 3: Stupně kvality řezu[3].....	16
Obrázek 4: Abrazivo – granát[17].....	17
Obrázek 5: Abrazivo – korund[5].....	18
Obrázek 6: Konstrukce laseru[8].....	19
Obrázek 7: Vrtání laserem[10].....	23
Obrázek 8: a) vrtání jedním impulsem, b) nárazové vrtání, c) trepanační vrtání d) spirálové vrtání[10].....	24
Obrázek 9: Princip metody LMJ[15].....	26
Obrázek 10: Paprsek LMJ[15].....	26
Obrázek 11: EDM-vlevo, LMJ-vpravo[16].....	27
Obrázek 12: Princip procesu odstranění materiálu[23].....	28
Obrázek 13: Zapojení EDM se zdrojem stejnosměrného napětí[23].....	29
Obrázek 14: $v_1=2600\text{mm/min}$, I. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu.....	32
Obrázek 15: $v_1=2600\text{mm/min}$, II. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu.....	32
Obrázek 16: $v_2=100\text{mm/min}$, I. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu.....	32
Obrázek 17: $v_2=100\text{mm/min}$, II. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu.....	33
Obrázek 18: $v_3=50\text{mm/min}$, I. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu.....	33
Obrázek 19: $v_3=50\text{mm/min}$, II. otvor, a) horní část, b) dolní část vrtu.....	33
Obrázek 20: Upnutí obrobku - vodní paprsek.....	34
Obrázek 21: Princip vrtání vodním parskem.....	35
Obrázek 22: Princip vrtání otvorů - vodní paprsek.....	35
Obrázek 23: Vodní paprsek, I. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu.....	36
Obrázek 24: Vodní paprsek, II. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu.....	36
Obrázek 25: Vrtání EDM.....	37
Obrázek 26: EDM, I. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu.....	38
Obrázek 27: EDM, I. otvor, a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu.....	38
Obrázek 28: Vrták HSS, I. otvor a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu.....	39
Obrázek 29: Vrták HSS, II. otvor a) horní část vrtu, b) dolní část vrtu.....	39
Obrázek 30: Sken – vlevo Laser 2600[mm/min], vpravo Laser 100[mm/min].....	40

Obrázek 31: Sken - vlevo Laser 50[mm/min], vpravo Vodní parsek.....	40
Obrázek 32: Sken vlevo EDM, vpravo Vrták HSS	41
Obrázek 33: Schéma kinematické sondy[20]	42
Obrázek 34: Dotek sondy[21].....	43
Obrázek 35: Odchylky - vlevo vrták HSS, vpravo EDM	52
Obrázek 36: Odchylky – vlevo vodní parsek, vpravo laser 2600[mm/min].....	52
Obrázek 37: Odchylky – vlevo laser 100[mm/min], vpravo laser 50[mm/min]	53

7 Seznam grafů

Graf 1: Procentuální vyjádření používání typů laserů[14]	22
Graf 2: Procentuální podíl technologií využívajících laseru[11].....	23
Graf 3: Rozměrová přesnost \varnothing jednotlivých metod vrtání – hodnoty sondy	45
Graf 4: Kruhovitost.....	47
Graf 5: Souosost	48
Graf 6: Porovnání naměřených hodnot, různé metody měření – horní \varnothing	48
Graf 7: Porovnání naměřených hodnot, různé metody měření – dolní \varnothing	49
Graf 8: Plošné drsnosti Sa.....	50
Graf 9: Plošné drsnosti Sz.....	51
Graf 10: Plošné drsnosti Sq	51

8 Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty řezů[3].....	16
Tabulka 2: Hodnocení produktivity, flexibility, nákladů[12].....	22
Tabulka 3: Časy výroby otvorů laserem při různých řezných rychlostech	31
Tabulka 4: Časy výroby otvorů - vodní paprsek	35
Tabulka 5: : Časy výroby děr – EDM.....	37
Tabulka 6: Naměřené průměry různými metodami	45
Tabulka 7: Hodnoty kruhovitosti	46
Tabulka 8: Hodnoty souososti	47
Tabulka 9: Hodnoty Sa	50

Tabulka 10: Hodnoty Sz	51
Tabulka 11: Hodnoty Sq	51
Tabulka 12: Ceny vyvrtání jednoho otvoru v Kč	54
Tabulka 13: Ceny pro 100 otvorů vyvrtaných do jednoho obrobku v Kč	54
Tabulka 14: Výhody a nevýhody jednotlivých metod pro daný vzorek.....	55
Tabulka 15: Přehled časové náročnosti výroby jednoho otvoru.....	55