



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra aplikované fyziky a techniky

Diplomová práce

Pokrokové metody dělení materiálů
se zaměřením na laser, vodní paprsek,
elektroerosivní řezání drátem a hloubení

Vypracoval: Jana Janová
Vedoucí práce: PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
České Budějovice Rok 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou diplomovou práci na téma „Pokrokové metody dělení materiálů se zaměřením na laser, vodní paprsek, elektroerosivní řezání drátem a hloubení“ jsem vypracovala samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

Dále prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích 25. 4. 2017

.....

Anotace

V úvodní části práce je provedena teoretická rešerše pokrokových metod dělení materiálů. Zvolenými metodami jsou laser, vodní paprsek a elektroerozivní řezání a hloubení drátem. Popsána je historie, princip dělení a klasifikace.

V praktické části jsou tyto metody rozebrány podrobněji s důrazem na jejich využití v praxi. Text je doplněn názornými ukázkami výrobků. Závěr práce je zaměřen na komparaci popisovaných metod. Celkově je práce pojatá jako metodický text použitelný ve výuce daného tématu.

Klíčová slova:

dělení materiálu, laser, vodní paprsek, elektroerozivní obrábění, elektroerozivní řezání, elektroerozivní hloubení

Abstrakt

In the introductory part of the work carried out the theoretical research of advanced methods of cutting. Chosen methods are laser, water jet and EDM wire cutting and trenching the wire. There is described the history, the principle of separation and classification.

The practical part of these methods are discussed in detail with emphasis on their use in practice. The text is supplemented with illustrative examples of products. Finally, the work focuses on the comparison of the described methods. Overall, the work is conceived as a methodological text useful in teaching this topic.

Keywords :

material cutting, laser, water jet, electro-erosive machining, electroerosion cutting, erosion dredging.

Poděkování

Ráda bych poděkovala PaedDr. Bedřichu Veselému, Ph.D., vedoucímu práce za odborné vedení, podnětné rady a motivaci k vytvoření mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat společnosti JOSA s.r.o. za poskytnutí informací a fotodokumentace.

Obsah

Úvod.....	7
1 Cíle práce.....	9
1.1 Teoretické cíle práce.....	9
1.2 Praktické cíle práce.....	9
Teoretická část.....	10
2 Vybrané pokrokové metody dělení materiálů.....	10
2.1 Základní pojmy z pokrokových metod.....	10
2.2 Laser.....	12
2.2.1 Historie laserů.....	12
2.2.2 Princip LASERu.....	13
2.2.3 Rozdělení a klasifikace laserů.....	15
2.2.4 Další možné využití laserů.....	22
2.3 Vodní paprsek.....	23
2.3.1 Historie vodního paprsku.....	23
2.3.2 Princip vodního paprsku.....	24
2.3.3 Rozdělení a klasifikace vodního paprsku.....	25
2.3.3.1 Čistý vodní paprsek WJM.....	25
2.3.3.2 Vodní paprsek s přísávkem abraziv.....	25
2.3.4 Další možné využití vodního paprsku.....	28
2.4 Elektroerozivní řezání a hloubení.....	29
2.4.1 Historie elektroerosivního řezání a hloubení....	29
2.4.2 Princip elektroerozivního řezání a hloubení....	29
2.4.3 Fyzikální princip elektroerozivního hloubení....	31
2.4.4 Dielektrikum.....	32
2.4.5 Dráty používané k elektroerozivnímu řezání.....	35
Praktická část.....	36
3 Řezání.....	36
3.1 Řezání laserem.....	36
3.1.1 Typy laserového řezání.....	37
3.1.2 Porovnání výhod a nevýhod při řezání laserem....	44
3.2 Řezání vodním paprskem.....	46
3.2.1 Hlavní části stroje pro AWJ.....	47
3.2.2 Jaké materiály lze dělit vodním paprskem.....	50

3.2.3	Abrázivum používané pro AWJ.....	51
3.2.4	Kvalita řezu.....	51
3.2.5	Porovnání výhod a nevýhod AWJ.....	54
3.3	Elektroerosivní řezání a hloubení.....	55
3.3.1	Elektroerozivní řezání drátem.....	55
3.3.2	Hlavní části stroje pro WEDM řezání.....	57
3.3.3	Porovnání výhod a nevýhod WEDM (drátem).....	61
3.3.4	Eletroerozivní hloubení.....	61
3.3.5	Hlavní části stroje pro EDM hloubení.....	62
3.3.6	Porovnání výhod a nevýhod při EDM hloubení.....	66
4	Řezáním LBM a AWJ ve společnosti JOSA s.r.o.....	67
4.1.1	Historie společnosti JOSA s.r.o.....	67
4.1.2	Popis stroje FARLEY LASERLAB PROFILE PLUS.....	68
4.1.3	Popis stroje AQUACUT 6001.....	71
4.2	Historie Českobudějovické společnosti.....	72
4.2.1	Popsání stroje AGIE na EDM hloubení.....	72
4.2.2	Popsání stroje značky Makino WEDM.....	73
5	Komparace dělení materiálu metodou LBM,AWJ, EDM a WEDM z různých hledisek.....	74
	Závěr.....	81
	Seznam použité literatury.....	83
	Seznam obrázků a tabulek.....	86
	Seznam příloh.....	89

Úvod

Metody dělení materiálů laserem, vodním paprskem, elektroerosivní řezání drátem a hloubení se řadí k pokrokovým technologickým postupům. Při jejich použití můžeme dělit téměř veškeré materiály se specifickými nároky na maximální tloušťku, tvrdost a pevnost materiálu a tam, kde nelze použít klasické rezné nástroje. Pokrokovými metodami rozumíme způsob úběru materiálu za určitých tepelných, elektrických a chemických nebo fyzikálních procesů, které zpravidla probíhají bez deformačních sil působících významně na obrobek. Při dělení zde nedochází ke vzniku klasických třísek, které známe z třískového obrábění. Těmito způsoby lze řezat velice přesné a složité tvary. Kvalita opracování a jeho přesnost se odvíjí od nastavení pracovních parametrů strojů, použitých metod, nástrojů, plynů a chemikálií.

V České republice se pokrokové metody dělení hojně využívají v automobilovém průmyslu, pro výrobu leteckých součástek, různých součástí pro lékařství a v mnoha dalších průmyslových odvětvích. Pokrokové metody dokáží vyhovět zvyšujícím se požadavkům těchto odvětví.

Popisy dílčích pokrokových metod nejsou stále dostatečně zažité při výuce ve stávajícím školství na třetím stupni včetně školní praxe. Zaměstnavatelé mají v této oblasti výroby trvalý nedostatek kvalifikované pracovní síly. Optimální situací by proto bylo, aby se žáci technických oborů již během studií seznámili s co nejširším počtem nových průmyslových technologií. Má diplomová práce reaguje na tuto skutečnost. [1],[2]

Pro lepší orientaci v problematice jsem vytvořila přehled základních pojmů a zařadila je na úvod teoretické části.

V samostatných podkapitolách se nejdříve zabývám technickým rozbořem laseru, vodního paprsku, elektroerosivního řezání a hloubení. Uvedené metody procházely složitým vývojem, který zdaleka není ukončen. Proto se v rámci každé kapitoly, byť jen okrajově, zmiňuji i o jejich historii.

Významným příspěvkem k dotvoření diplomové práce byla možnost navštívit strojírenské společnosti na Českobudějovicku, které popisované technologie běžně využívají.

V závěru praktické části práce se věnuji především komparaci metod dělení materiálů laserem, vodním paprskem, elektroerosivní řezání drátem a hloubení. Za účelem posouzení výhod a nevýhod jsem vytvořila tabulkové přehledy porovnatelných parametrů průmyslových strojů.[1]

1 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je vypracovat srozumitelný metodický text použitelný při výuce výkladu na téma pokrokových metod dělení materiálů zaměřených na laser, vodní paprsek, elektroerosivní řezání drátem a hloubení. K dosažení tohoto cíle je nutno splnit následující dílčí cíle:

1.1 Teoretické cíle práce

1. Provést rešerši dostupné literatury se zaměřením na vybrané metody.
2. Provést rozbor a vymezení základních pojmů z oblasti pokrokového dělení materiálů.
3. Provést rozbor a popis jednotlivých oblastí z pokrokového dělení materiálů.

1.2 Praktické cíle práce

1. Vysvětlit princip dělení materiálů pomocí technologií laseru, vodním paprskem, elektroerosivním řezáním drátem a hloubení.
2. Provést komparaci těchto metod z nejrůznějších hledisek.
3. Sestavit srozumitelný metodický pojatý text pro výklad těchto pokrokových metod dělení materiálů laserem, vodním paprskem, elektroerosivní řezání a hloubení drátem.

Teoretická část

2 Vybrané pokrokové metody dělení materiálů

2.1 Základní pojmy z pokrokových metod

Laser - zesilování paprsku světla stimulovanou emisí záření.

Koherentní světlo - světlo tvořené jednou vlnovou délkou, stejnou fází tzn. že tato vlnění jdou částečně vedle sebe a téměř se nerozbíhají

Stimulovaná emise - vybuzení atomu na vyšší energetickou hladinu, sestup na metastabilní hladinu a následný uspořádaný přeskok zpět na nižší energetickou hladinu.

Vybuzený stav - stav, ve kterém má atom energii na úrovni vyšší energetické hladiny.

Absorpce - pohlcení fotonu a přijetí jeho energie využitě k přesunu na vyšší energetickou hladinu.

Monochromatické světlo - světlo, které tvoří pouze jedna barva, tedy záření o stejné vlnové délce. [3,4],

Odráživost - je reflexe, která je určena poměrem odražené energie k dopadající.

WJM - Water Jet Machining - čistý vodní paprsek.

AWJ - Abrasive Water Jet - vodní paprsek s přidáním abrazivem.

Kavitační koroze - za určitých podmínek v kapalině vznikají bubliny se sytou párou a při jejich zániku vznikají rázy a tím dochází k vytrhávání částic z povrchu materiálu [5]

Abrazivum - jsou suroviny, nerosty a syntetické hmoty, které vynikají vysokou tvrdostí používané jako brusidlo k řezání, broušení, hlazení a podobně.

Striace - tzv. váznutí paprsku. Při řezném procesu vodního paprsku dochází pod povrchem materiálu k zpomalování vodního paprsku třením o částice obrobku.

Elektroerozivní technologie - elektrojiskrové obrábění probíhá mezi dvěma elektrodami ponořených do dielektrika.

EDM - Electric Discharge Machining - elektrojiskrové hloubení.

WEDM - elektrojiskrové drátové řezání, odnož EDM.

Dielektrikum - kapalina, plyn s vysokým elektrickým odporem.

2.2 Laser

2.2.1 Historie laserů

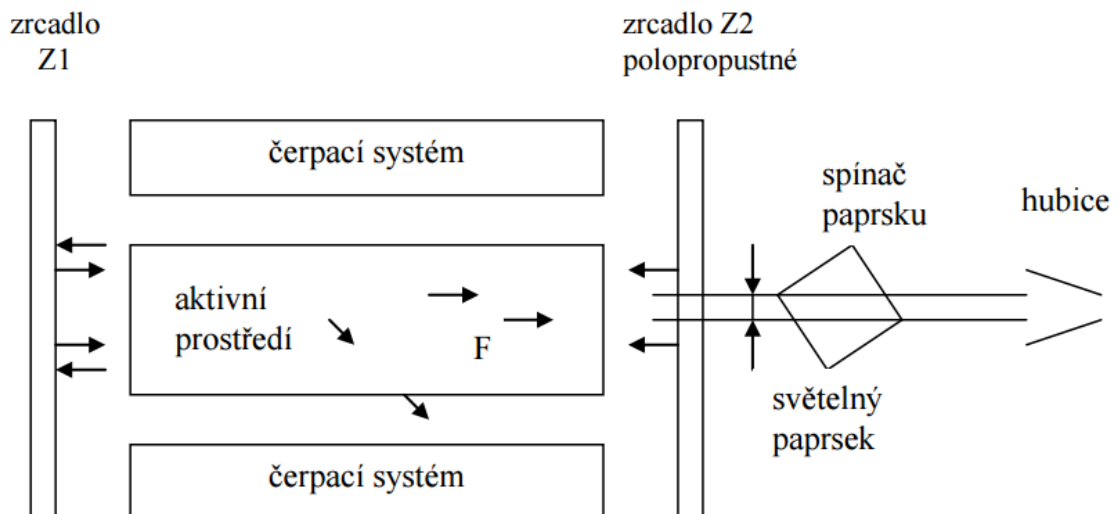
Historii laserů předpověděl teoretický fyzik a vědec Albert Einstein okolo roku 1917. Uvedl, že za vhodných podmínek, vznikne stimulovaná řízená emise. V roce 1924 R. Tolman popisuje ve svém článku negativní absorpci, záření na výstupu je koherentní na vstupním záření. Dále v roce 1928 byla pozorována v Gasu R. Ladenburgen a Kopferikantem a později využita v roce 1940 pro zesílení světla sovětským fyzikem W. A. Fabrikentem. První práce týkající se maseru pochází z roku 1953 a laserů 1958. Před samotným sestrojením laseru, jako takovým byl sestrojen Ch. Townsem první maser. Maser pracuje na stejném principu stimulované emise, ale generuje mikrovlnné záření.

Poprvé byl laserový princip experimentálně ověřen T.H. Maimanem v USA roku 1960, kde použil jako aktivní prostředí krystal rubínu se třemi energetickými hladinami, kde laser pracoval v pulzním režimu. O tři roky později 1963 C. Kumar N. Patel vynalezl plynový CO₂ laser. O rok později v roce 1964 obdrželi, N. Basov, A. Prochorov, Ch. Townes Nobelovu cenu za fyziku za výzkum v oboru kvantové elektroniky. Za výzkum, který vedl ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů pro masery a lasery. Od roku 1960 následoval nárůst různých druhů laserů, který trvá dodnes. Nejnovější lasery se používají v oblasti nanotechniky tzv. kvantové tečky. Frekvence laserů je od IR až k ultrafialovému záření. Výkony laserů jsou od zlomku mW, sem řadíme kontinuální lasery až do oblasti mimořádně výkonných laserů neboli petawatů ($10^{15}W$). [1], [3], [4], [6]

2.2.2 Princip LASERu

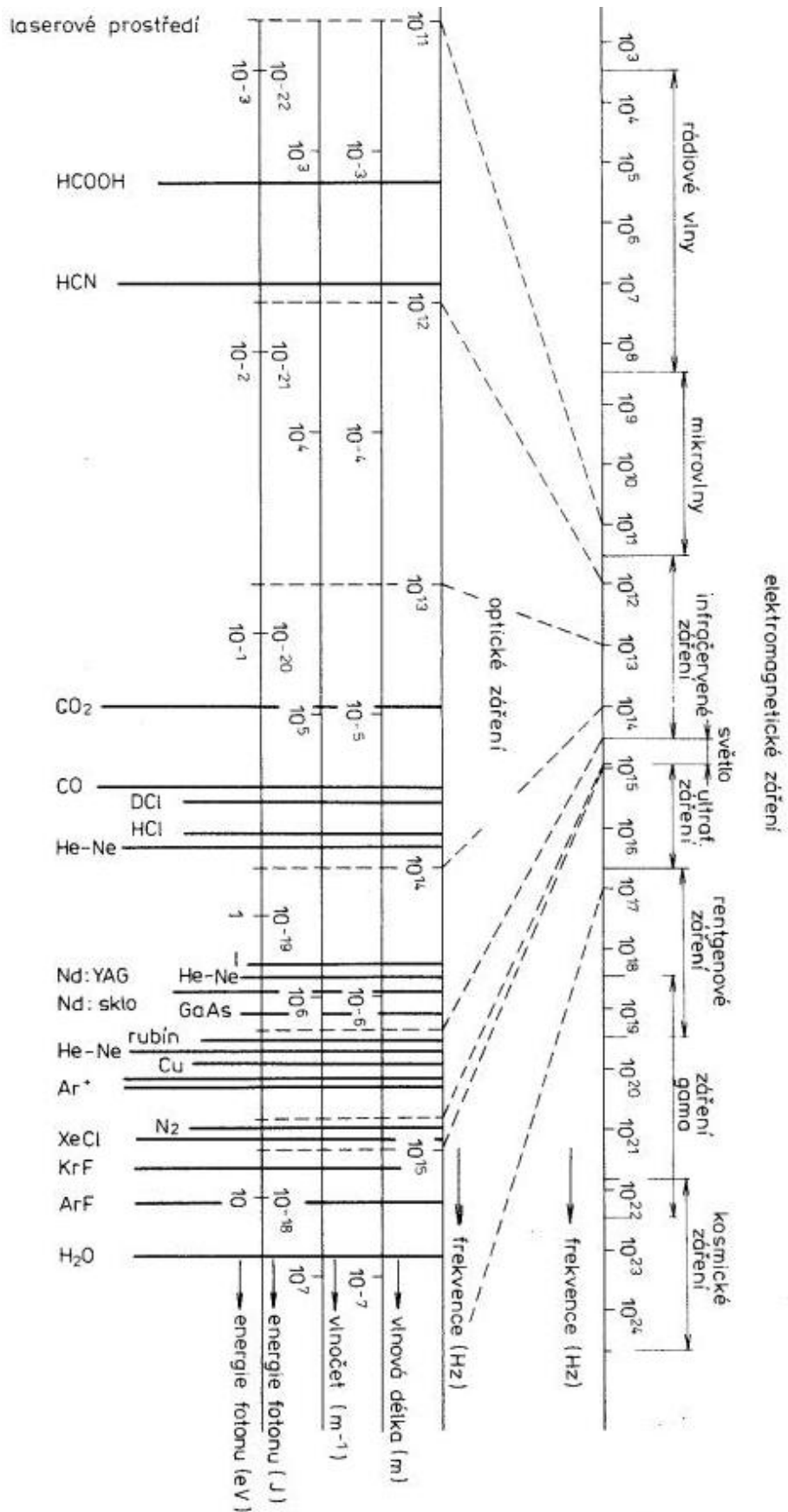
LASER zkratka složená z anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - volný překlad tohoto akronymu je zesilování světla využití stimulované emise. U nás se slovo laser obecně užívá pro označení generátoru optického záření. Názorně lze popsat princip laseru v zjednodušeném schématu na obrázku číslo 1. Elektromagnetické záření na kterém vyzařují lasery je znázorněno v obrázku číslo 2.[1]

Obrázek č. 1: Základní zjednodušené schéma laseru, převzato a upraveno z [7]



*„Foton **F** probíhající ve směru osy trubice strhne další fotony a spustí reakci ve stejném směru. Část fotonů projde polopropustným zrcadlem **Z2** a část se jich odrazí. Takto uchopí další fotony a odrazí se od zrcadla **Z1**. Děj se opakuje a světlo v aktivním prostředí se zesiluje. Fotony s jiným směrem po několika odrazech z aktivního prostředí vystoupí a děje se dál neúčastní.“*[7]str. 58

Obrázek č. 2. : elektromagnetické záření, převzato a upraveno z [4]



2.2.3 Rozdělení a klasifikace laserů

Lasery můžeme dělit dle různých hledisek [1]

A. aktivního prostředí

- pevnolátkové (rubínový)
- polovodičové (GaAs - s krystalem arsenidu gallitého)
- plynové (He-Ne, He-Cd, CO₂ laser)
- kapalinové (GaAlAS laser)
- plazmatické

B. vlnové délky viz obrázek č. 1

- infračervené
- viditelného pásma
- ultrafialové
- rentgenové

C. energetických hladin

- molekulární (rotační, rotačně - vibrační, vibrační)
- elektronové
- jaderné

D. časového režimu

- impulsní
- pulzní
- kontinuální

E. doby trvání generovaného impulsu

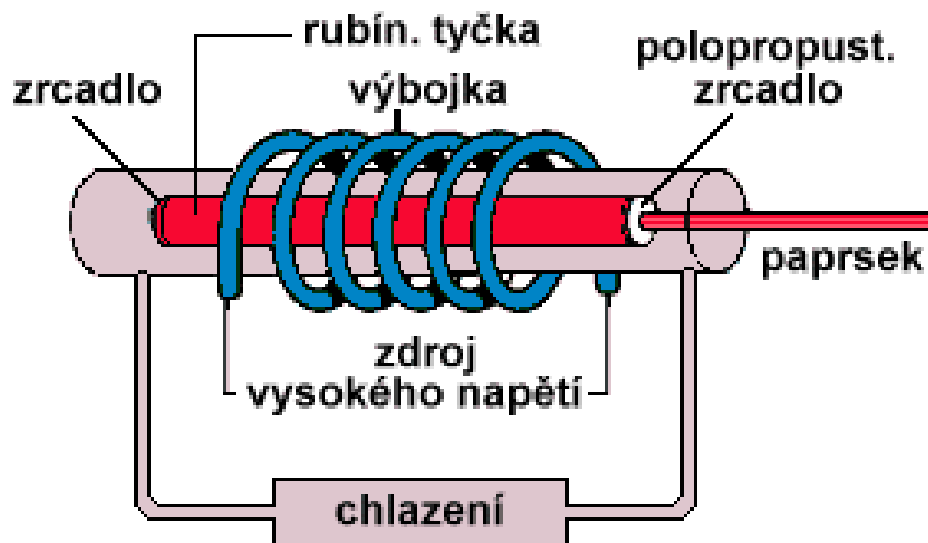
- s dlouhými impulsy
- s krátkými impulsy
- s velmi krátkými impulsy

F. typu buzení

- opticky (nekoherentně, koherentně)
- elektrickým výbojem
- elektronovým svazkem
- tepelnými změnami
- chemicky
- rekombinací
- injekcí nosičů náboje [1]

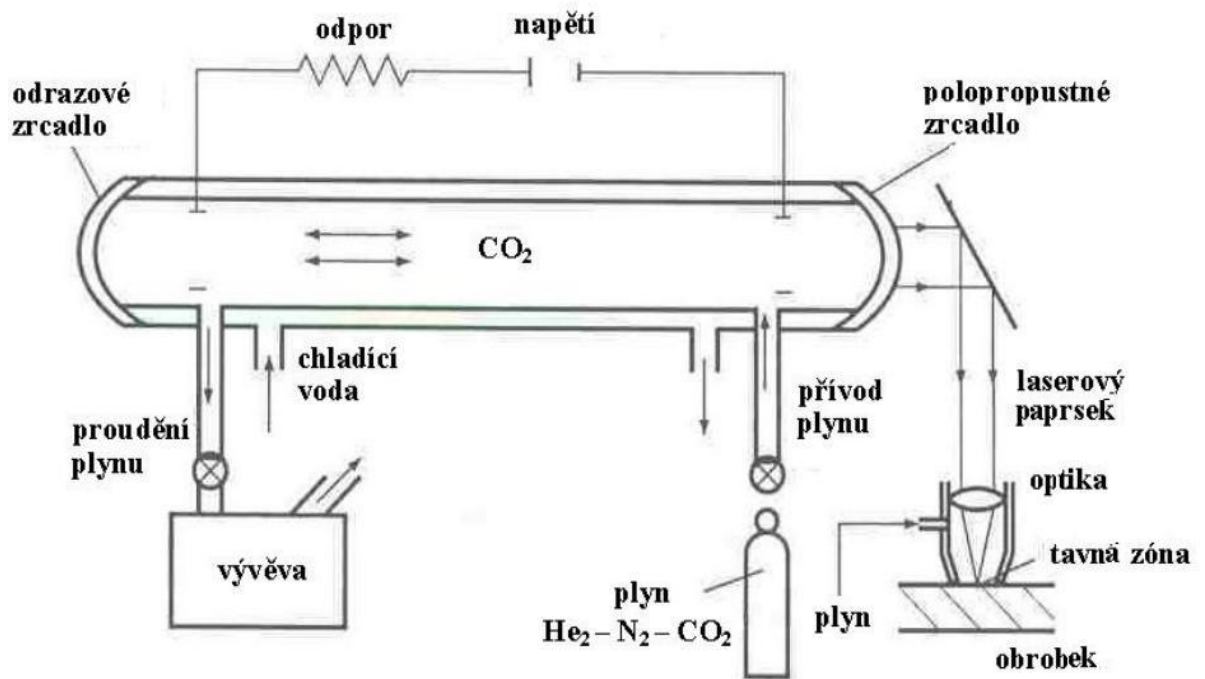
- **Pevno látkový laser** - jako zástupce jsem vybrala Rubínový laser obrázek číslo 3 (schéma Rubínového laseru) patří k nejstarším používaným laserům s pevným krystalem. Má velkou tvrdost a tepelnou vodivost. Bývá využit pro výkonné lasery a vyzařuje na 694nm.

Obrázek č. 3.: schéma Rubínového laseru převzato a upraveno z [8]



- **plynový laser** jako zástupce jsem vybrala CO_2 na obrázku č. 4, (schéma plynového laseru), který patří k nejpoužívanějším laserům ve strojírenství.

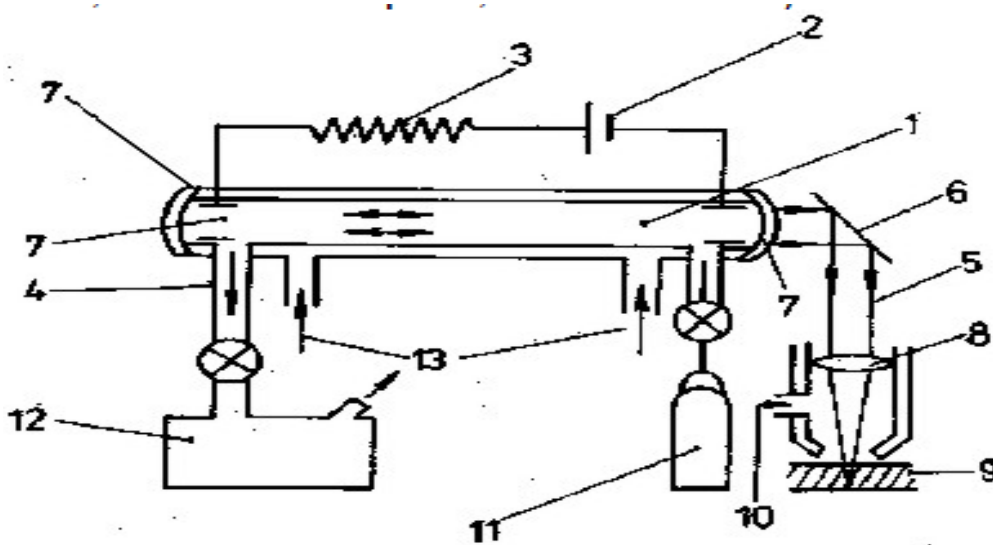
obrázek č. 4.: Schéma CO₂ laseru převzato a upraveno [2]



CO₂ laser se skládá, viz obrázek č. 5.:

1. laserové trubice naplněné plynem, 2. zdroje elektrické energie, 3. tlumícího odporu, 4. toku plynu, 5. laserového paprsku, 6. zrcadla a 7. polopropustného zrcadla, 8. čočky, 9. obrobku, 10. výfukového plynu, 11. plynového válce, 12. odsávacího čerpadla, 13. chladicí vody. [9]

Obrázek č. 5.: další schéma CO₂ laseru převzato a upraveno [9]



Součástí každého laseru je:

Laserová hlavice, která obsahuje laserové médium, které určuje délku vlny záření. Jedná se o směs několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je průhledný a má schopnost odvádět vzniklé teplo. Může být pevné, tekuté nebo plynné.

Rezonátor tj. optický systém umožňující zformovat a zesílit záření, elektromagnetickou vlnu z něj vycházející. Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti paprsku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky). Optický rezonátor tvoří nejméně dvě zrcadla. Nejčastěji používají sférická zrcadla v konfokálním stabilním nebo konfokálním nestabilním uspořádáním. Průměr zakřivení zrcadel určují rozdělení intenzity záření a energetickou rozbíhavost laserového záření, divergenci paprsku, která je dána rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se šíří. Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru vyjadřuje tzv. MOD což je označení pro vlastní kmity elektromagnetického pole v rezonátoru, charakterizované danou frekvencí a zvláštnostmi rozložení pole v rezonátoru. Základní

MOD je po většinu technologických operací označován jako TEM_{00} , kde je intenzita záření rozdělena dle Gaussovy křivky. Rozdělení intenzity záření TEM_{10} se používá například pro tepelné zpracování nebo povlakování.

Budící zařízení - které ovlivňuje pracovní režim laseru. Způsob buzení je dán laserovým médiem. Plynné médium je buzeno téměř vždy elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami.

Zdroj energie buzení jde o speciální druh síťového napáječe. Chladicí systém, který odvádí nevyužitou energii, jež se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve a to vnitřní (používá se neionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). Výrobci laserových zařízení dodávají také speciální chladicí zařízení, u kterých je vnitřní okruh chlazený vzduchem.[10]

Fyzikální charakteristika laseru

Laserové světlo vzniká v určitém prostředí určitého elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní emise záření vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí f , která vyplývá z rovnice.

$$E_2 - E_1 = h \cdot f \quad (1)$$

Planckova konstanta se značí ***h*** jejíž hodnota

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

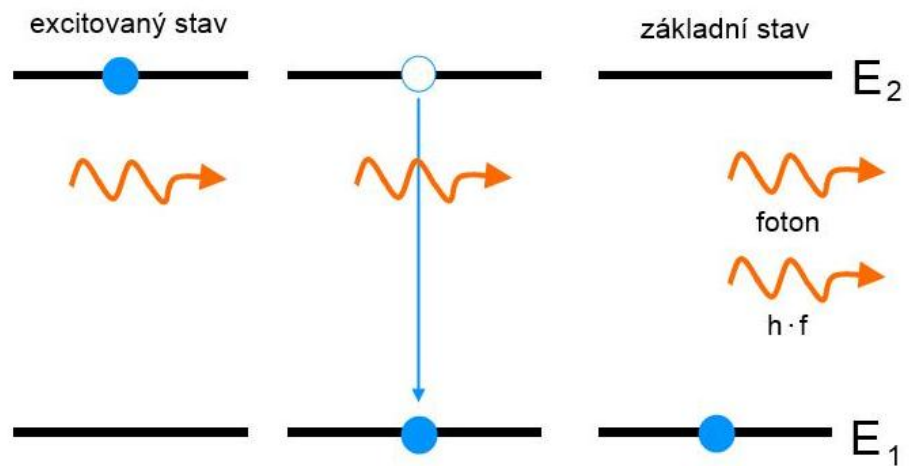
Frekvence emitovaného kvanta světelného záření značíme ***f*** [Hz]

Rozdíl energetických hladin, mezi kterými nastal přechod $E_2 - E_1$ v jednotkách [J].

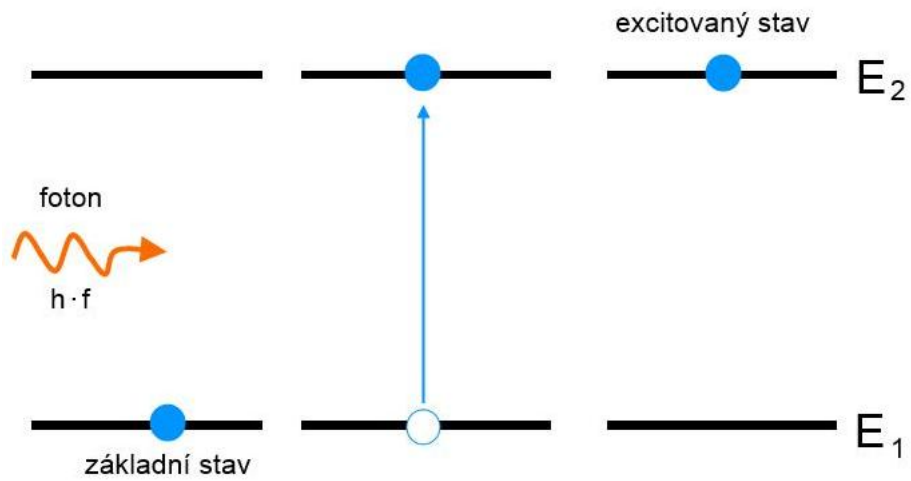
Interakce záření atomů

- **samovolná emise** záření viz obr. č. 6. Jde o samovolný přechod z excitovaného stavu s energií do základního stavu s energií E_1
- **absorpce záření** na obrázku č. 7, zde vlivem dopadajícího záření s frekvencí F splňující podmínku $h \cdot f = E_2 - E_1$ (2) může atom pohltnout foton a přejít ze základního stavu s energií E_1 do excitovaného stavu s energií E_2 .
- **Stimulovaná emise záření** obr. č. 8, jestliže dopadá-li na atom v excitovaném stavu s energií E_2 s frekvencí f , splňující podmínku $h \cdot f = E_2 - E_1$ atom přejde ze stavu E_2 do stavu E_1 a vyzáří přitom energii $h \cdot f = E_2 - E_1$. Tato vyzářená energie je koherentní s dopadajícím zářením a původní dopadající záření se zesiluje a na této emisi záření je založen princip laseru.
Jestliže označíme základní energetický stav E_1 a vybuzený stav E_2 , potom z Bohrova zákona $h \cdot f = E_2 - E_1$ lze určit rezonanční frekvenci f emitovaného záření. [2, 9, 11, 12]

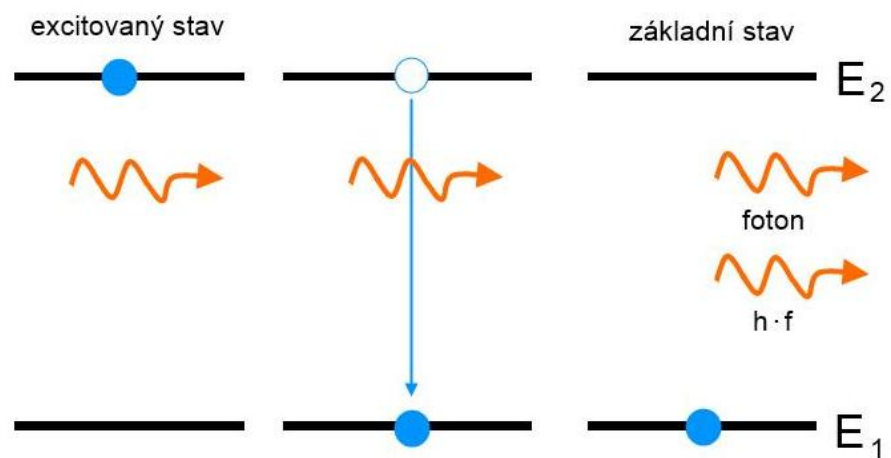
Obrázek č. 6.: samovolná emise převzato a upraveno [11]



Obrázek č. 7.: absorpce záření převzato a upraveno [11]



Obrázek č. 8.: stimulovaná emise, převzato a upraveno [11]



V technologii se laser využívá pro svařování, vrtání, řezání, tepelné opracování, značení a gravírování, dále pro povrchové úpravy, povlakování, metody tvorby modelů a protofytů a pro laserovou podporu konvenčního obrábění. Každá z těchto oblastí má svá specifika, pokud jde o typ laseru a jeho způsoby využití.

Obrobitelnost materiálu laserem je dána zejména těmito vlastnostmi: pohltivost - schopnost pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky, tzn. na tepelnou energii, tepelná vodivost a odrazivost, která je dána poměrem množství odražené energie k energii dopadající.

Obrobitelnost materiálu laserem je tím lepší, čím větší je pohltivost materiálu a menší jeho tepelná vodivost a odrazivost. [9]

2.2.4 Další možné využití laserů

Lasery lze využít k popisu součástí, soustružení, frézování, svařování, pájení, tepelnému zpracování, gravírování, k nanášení povlaků, vrtání.

2.3 Vodní paprsek

2.3.1 Historie vodního paprsku

Historie vodního paprsku sahá až do devatenáctého století, díky poznatku, že voda má erosivní účinky na pevné látky. Bylo zjištěno, že při použití vody pod velkým tlakem s tryskou o velmi malém průměru, dojde ke zvýšení erosivního působení na pevnou látku, horninu. Tento poznatek využili v USA pro úběr horniny při těžbě zlata mezi lety 1853-1886.

Následovalo hojné využívání v těžebním a stavebním průmyslu. Dvacátá léta dvacátého století tak byla označována za počátek vodních trysek. Používaly se k odstranění nánosů vrstev hornin, písku ve stavebnictví. Tlak trysek se pohyboval od několika desítek až stovek barů.

Kolem roku 1970 se začal využívat účinný paprsek pro dělení dřeva a plastů.

O další rozvoj vodního paprsku se zasloužil Petr Tupitsyn, který pracoval v uhelných dolech v Doněcku na Ukrajině, kde v roce 1936 použil vodní paprsek k řezání dřer uhelných slojí.

Odstartoval využití vodního paprsku k těžbě, například uranu v letech 1950-1960, kde paprsek vody omezil rizika přidružených k těžbě uranu, typicky záření.

V polovině dvacátého století zkoušel Norman Fanz řezat s vodním paprskem o velmi vysokém tlaku (UHP - ultrahigh-pressure). Díky tomu je Norman Franz považován za strůjce vodního paprsku. Další vývoj vodního paprsku umožnil Mohamed Hashish. K vodnímu paprsku přidal abraziva a tím umožnil řezání materiálů s vyšší pevností a větší šířkou. [2],[13]

2.3.2 Princip vodního paprsku

Fyzikální podstata řezání materiálů vodním paprskem vychází, z pohybu dvojnásobné až čtyřnásobné rychlosti zvuku k pevnému tělesu ($600-900\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Proces řezání se dělí na dvě části. V první části dochází k prohlubování, která přechází až v otvor a v druhé části k vytvoření řezné spáry. Při nárazu vodního paprsku na materiál dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malou plochu. Tím vznikají v řezaném materiálu rázové vlny a dochází k rychlé destrukci materiálu, na hranici zrn, kde vznikají mikrotrhliny. Tyto trhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří. V důsledku toho dochází k rozrušování řezaného materiálu a jeho destrukci. Takto na materiál působí i turbulentní proudění vodního paprsku ve spáře s účinkem kavitačních bublin. Pro řezání tvrdých materiálů se používají brousící zrna. Nazýváme je abraziva. Jako vodní paprsek se většinou používá upravená voda, která má potřebné rychlosti proudění a můžeme uplatnit tlak 200 až 600MPa. Celkové působení vodního paprsku na materiál můžeme popsat jako zrychlený proces eroze. Energetická účinnost této eroze se pohybuje okolo 80%. [14]

Řezání vodním paprskem, rostou požadavky na zvýšení tlaku, a tím se zvyšují požadavky na celý systém. Dnes se běžně používají stroje s tlakem okolo 400Mpa. [14]

Při řezném procesu vodního paprsku dochází pod povrchem materiálu ke zpomalování vodního paprsku o částice obrobku a vzniká tzv. efekt váznutí paprsku. Na váznutí má vliv posuvná rychlost paprsku a síla a druh materiálu. Toto váznutí tvoří na obrobené ploše rýhování, které nazýváme striace viz obr. č. 9. V horní části obrázku je vidět v řezu hladká zóna, zde je vidět řezné opotřebení a na hladkou zónu navazuje v dolní části rýhovaná zóna, která je důsledkem deformačního

opotřebení paprskem. Podle tohoto opotřebení se určuje kvalita řezu. [2]

Obrázek č. 9: povrch po řezání AWJ převzato a upraveno z [15]



2.3.3 Rozdělení a klasifikace vodního paprsku

Vodní paprsek dělíme na čistý vodní paprsek WJM a paprsek s abrazivem AWJ.

2.3.3.1 Čistý vodní paprsek WJM

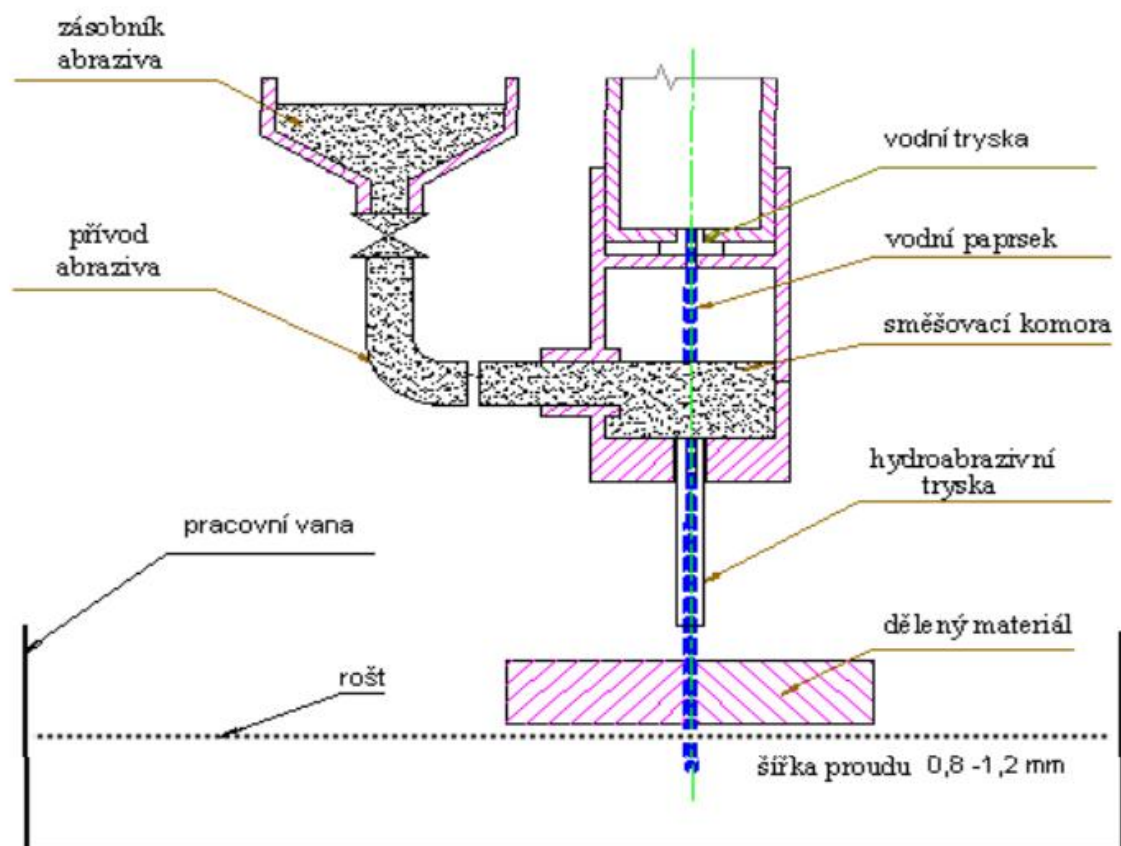
Čistý vodní paprsek označován WJM (Water Jet Machining) je vodní paprsek bez přidaného abraziva. Tento paprsek se používá pro měkké nebo nekovové materiály (papíroviny, papíry, sklotextil, kompozity, lamináty apod.). Tlak čistého vodního paprsku dosahuje až 600MPa a řezná rychlost se pohybuje v rozsahu $5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ až $400\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Jako pracovní médium se používá filtrovaná voda z vodovodu, většinou zbavena minerálních látek. Lze řezat i jinými médii. Pro potravinářský průmysl se používá mléko, líh atd.[16]

2.3.3.2 Vodní paprsek s přídavkem abraziv

Vodní paprsek s přidaným abrazivem je označován AWJ (Abrasive Water Jet) někde uváděn pod názvem AWJM (Abrasive Water Jet Machining). Tento paprsek se používá pro tvrdé a kovové

materiály. (druhy ocelí, druhy minerálů, nerostů, titanu atd.). Dále je možné řezat i více vrstev materiálů. Vodní paprsek s přidavkem abraziva zvyšuje při řezání erozní účinek. Tím je účinnější než samotný vodní paprsek. Na obrázku číslo 10 je schéma přívodu abraziva pro vodní paprsek.

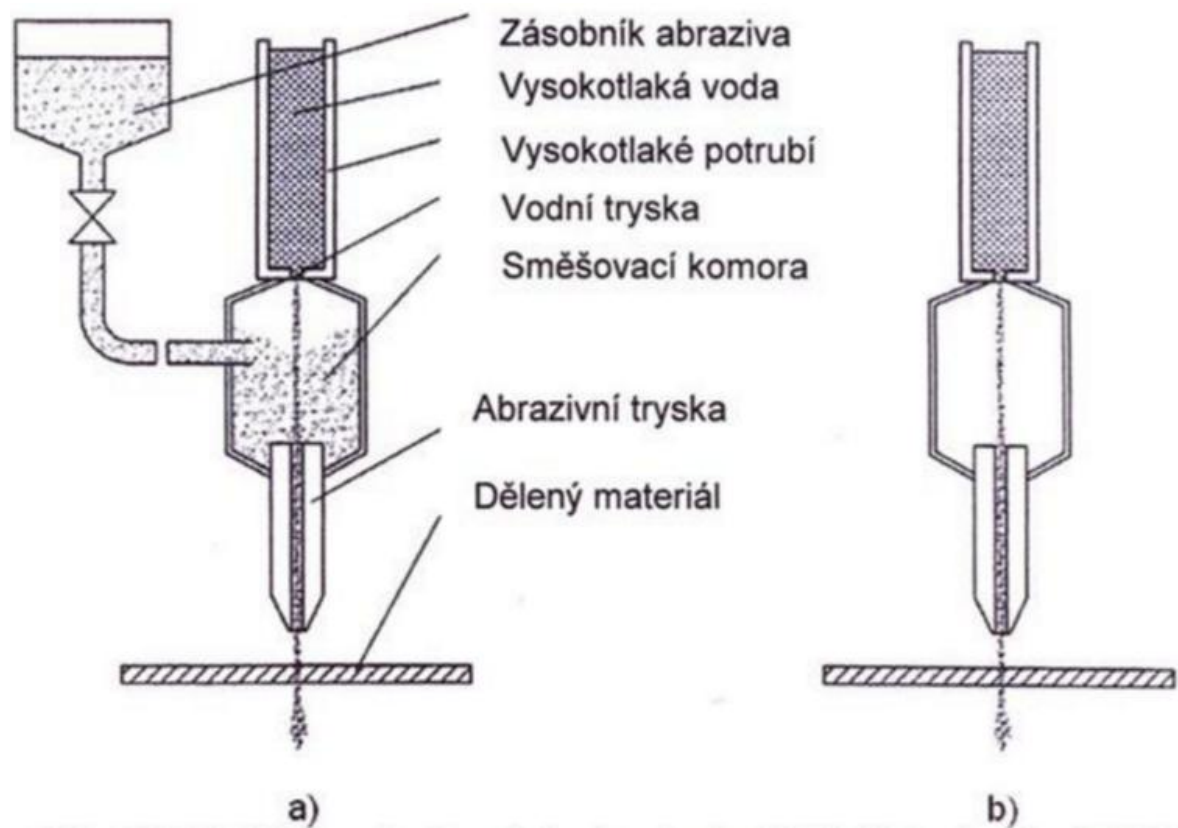
Obrázek č. 10.: schéma vodního paprsku s abrazivem převzato a upraveno z [7]



Na obrázku číslo 11 je porovnání principu technologií čistého vodního paprsku a vodního paprsku s přidaným abrazivem. Z obrázku je patrné, že technologie čistého paprsku je podobná abrazivnímu vodnímu paprsku. Hlavní rozdíl mezi technologiemi čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku

je v přidání abraziva a vyššími nároky na materiály, ze kterých je vyrobena hlavice pro abrazivní vodní paprsek. Abrazivum ze zásobníku je přiváděno do směšovací komory, kde jej strhne vodní paprsek nebo je přidáváno pomocí tlaku. Ve směšovací komoře vzniká směs a tato směs prochází abrazivní tryskou a směřuje do úzkého paprsku s vysokou řeznou účinností. Úběr materiálu při dělení materiálů abrazivním vodním paprskem je podobný mechanismu broušení.[2,7]

obrázek č. 11 schéma porovnání principu technologií AWJ a WJM převzato a upraveno z [17]



a) technologie principu AWJ

b) technologie principu WJM

2.3.4 Další možné využití vodního paprsku

Vodním paprskem lze vrtat, soustružit, frézovat, gravírovat. Využití je u velmi tvrdých materiálů, u kterých se nedá použít klasických metod obrábění.

2.4 Elektroerozivní řezání a hloubení

Úběr materiálu elektroerozí je postaven na vysoké koncentraci energie (10^5 až 10^7 W.mm⁻²). Materiál vlivem takovéto koncentrace energie taje a odpařuje se. [18]

2.4.1 Historie elektroerosivního řezání a hloubení

Poprvé se o tuto metodu zajímal J. Prestley, který se zabýval elektrickými výboji. Okolo roku 1766, si povšimnul kráterů, které vznikly po elektrickém výboji na povrchu katody. (2)

V první polovině osmnáctého století díky Leydenovy nádobě se daly při tření pozorovat elektrické pulzní oblouky.

Tyto nádoby lze označit za kondenzátory. Spojením nádob v paralelním zapojení vznikly předchůdci baterie. Dále ruští manželé Lazarenkovi, prováděli výzkumy elektrických výbojů, které se využívaly k obrábění kovů. Na základě těchto výzkumů definovali zákon elektroeroze. Dále objevili, že ve vhodném zapojení s vhodnými parametry obvodu lze měnit stacionární výboj na opakující nestacionární. Dosáhli přesnějšímu rozrušování materiálu. (18)

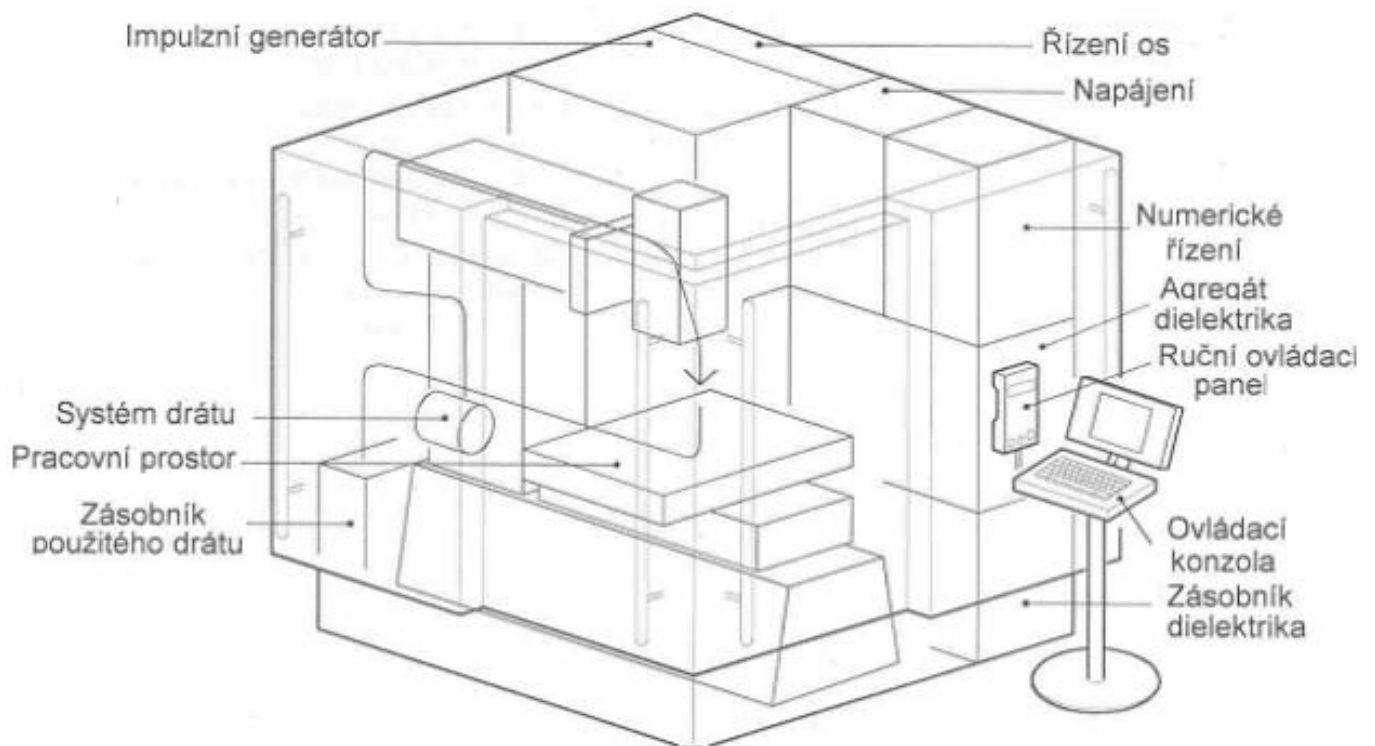
2.4.2 Princip elektroerozivního řezání a hloubení

Podmínkou elektroerozivního řezání a hloubení jsou elektricky vodivé materiály, které de facto při procesu řezání podléhají elektrické erozi. K erozi může dojít, pokud se tento děj odehrává v dielektriku (v kapalném prostředí, nebo plynném). V kapalném prostředí mluvíme o elektrické korozi.

Samotný princip závisí na přiblížení katody (obrobku) a anody nástrojové elektrody, do které je vedeno elektrické pulzní napětí. Vzhledem ke stále se opakujícímu jiskrovému výboji, a za podmínky ponoření do dielektrika (kapalina s vysokým elektrickým odporem), dochází k úběru materiálu. Další funkcí dielektrika je odvádění tepla od děleného materiálu.

Na základě zapojení elektrického obvodu a zvolených pracovních parametrů, vytvoříme dva druhy výbojů. Výboj stacionární pomocí oblouku nebo jiskrový nestacionární. Vzdálenost výboje probíhá od 5-100mm.

Obrázek č. 12.: schéma stroje pro vedení drátu pro drátové řezání převzato a upraveno [7]

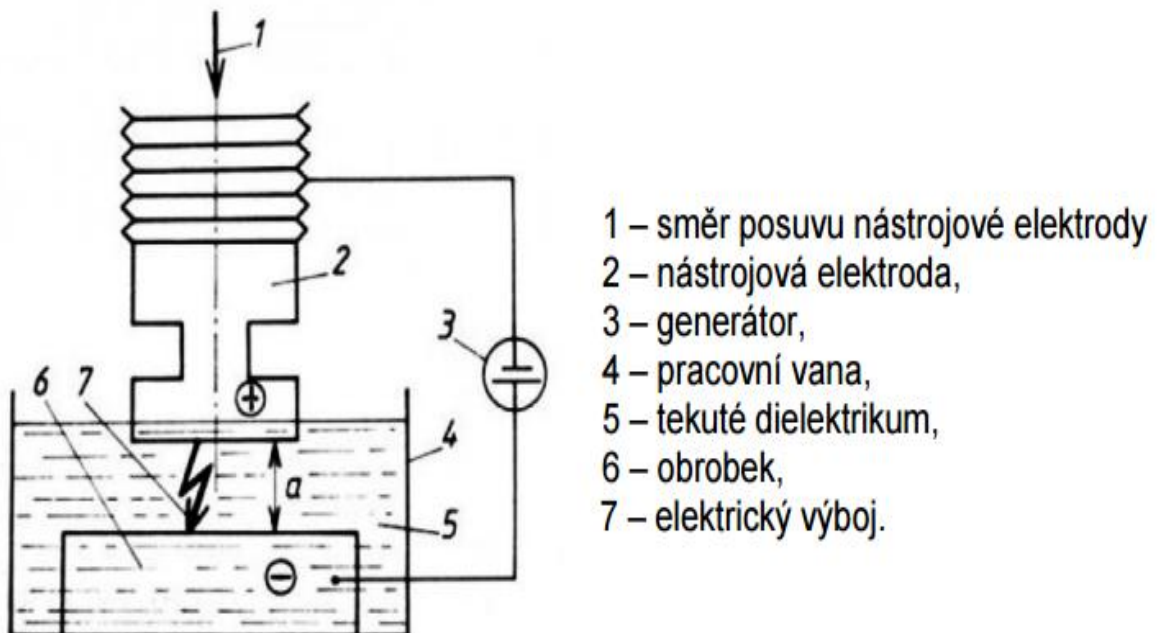


2.4.3 Fyzikální princip elektroerozivního hloubení

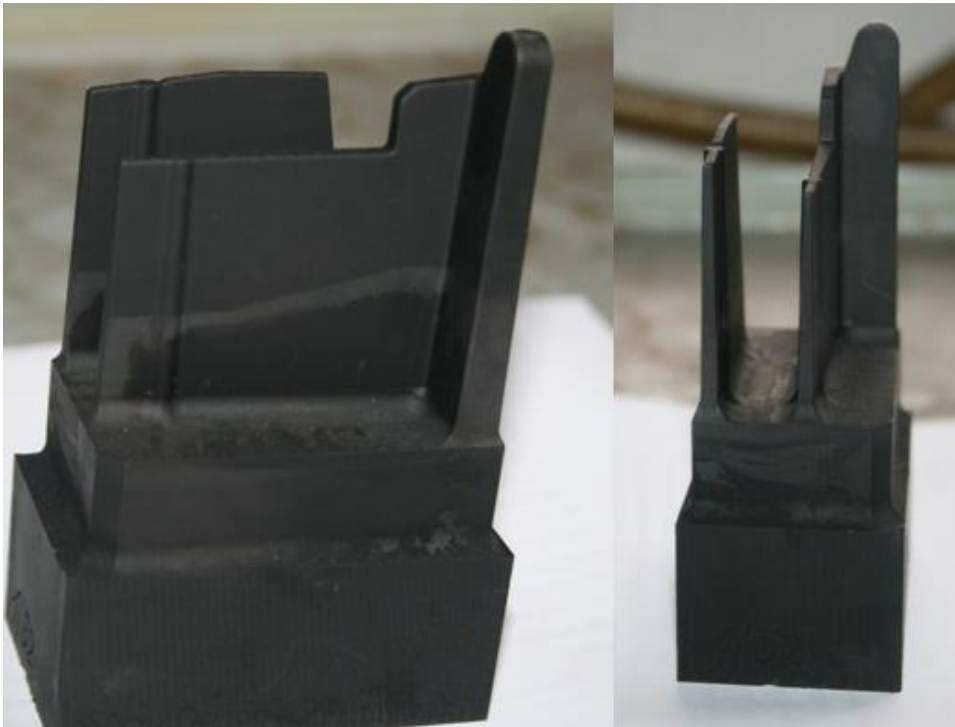
Přiblížením obrobku a elektrody (nástroje), na který se přivádí elektrické pulzní napětí, dochází k opakujícímu jiskrovému výboji. Též jako u řezání musí být ponořen do dielektrika (pracovního media). I zde dielektrikum (kapalina s vysokým elektrickým odporem) odvádí nečistoty má chladicí účinek.

Metodou elektroerozivního hloubení vytváříme vnitřní plochu složitých tvarů. Jedna elektroda je tvořena nástrojem, který je negativem obráběné plochy. Druhou elektrodu tvoří obrobek. Toto schéma je znázorněno na obrázku č. 13.

Obrázek č. 13.: detailní schéma elektroeroze převzato a upraveno [18]



Obrázek č.14.: elektroda z grafitu vlastní zdroj



Elektrody jsou vyrobeny z různých materiálů, například mosazi, grafitu. Na obrázku číslo 14 je vyobrazena grafitová elektroda.

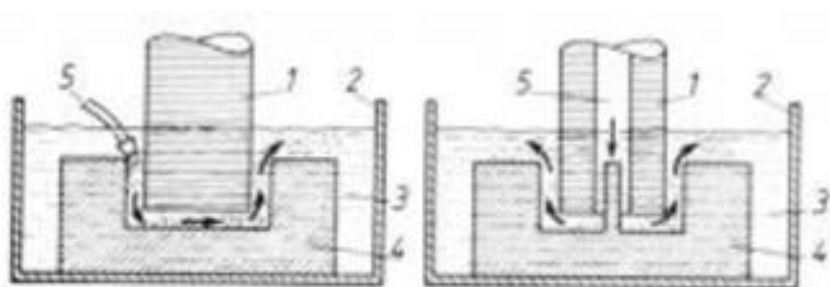
2.4.4 Dielektrikum

je převážně kapalně prostředí, ve kterém probíhá elektroerozivní obrábění. Tato látka slouží k izolaci mezi elektrodami, další funkcí je odvod tepla (díky tomu nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu). Ohraničuje výbojový kanál a odstraňuje nečistoty z kráterů. Další funkcí dielektrika je zabránění usazování uhlíku na povrchu elektrod a následným zkratům (7)

K nejčastějším látkám, které se používají, jako dielektrikum, patří strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda, neionizovaná, speciální dielektrika, které dodávají výrobci strojů.

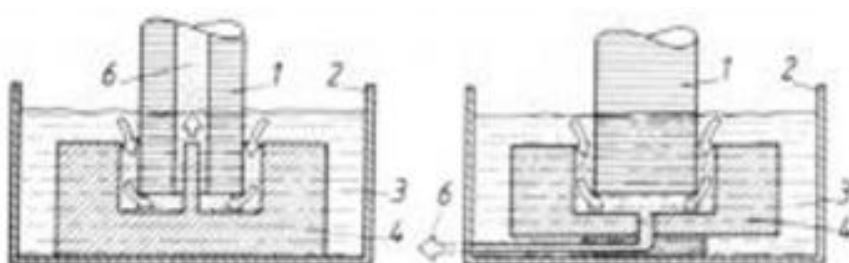
Přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu rozlišujeme podle způsobu vyplachování. Pro představu viz obrázek č. 15. Vyplachovat můžeme **vnějším vyplachováním**, toto vyplachování se používá pro obrábění dutin s větší hloubkou. **Vnitřní tlakové** se přivádí otvorem v nástrojové elektrodě do pracovního prostoru. Má menší tvarovou přesnost boků vyráběné dutiny. **Vyplachováním a odsáváním** - dielektrikum se odsává dutinou v nástrojové elektrodě nebo obrobku. Má velmi dobrou tvarovou přesnost v obráběné dutině. **Pulzní vyplachování** - oddaluje elektroerozní proces o 0,15 až 10 sekund s následným oddálením nástrojové elektrody od obrobku o 0,02 až 10 mm, čímž se zvětšuje pracovní mezera mezi obrobkem a elektrodou. Tímto dosáhneme jejího dokonalého vypláchnutí. Používá se při výrobě hlubokých dutin, při tenkých elektrodách nebo při obrábění načisto. [19]

Obrázek č. 15.: přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu [19]

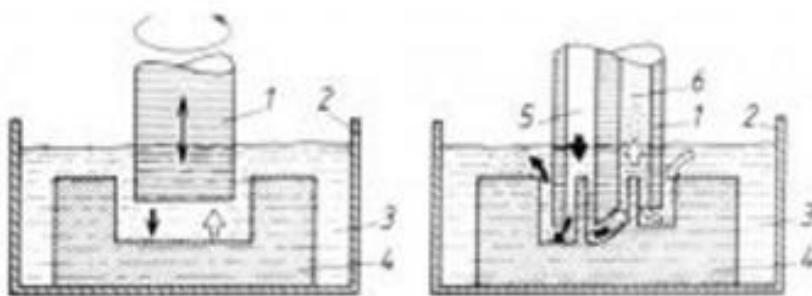


vnější

tlakové vnitřní



odsáváním



pulzní

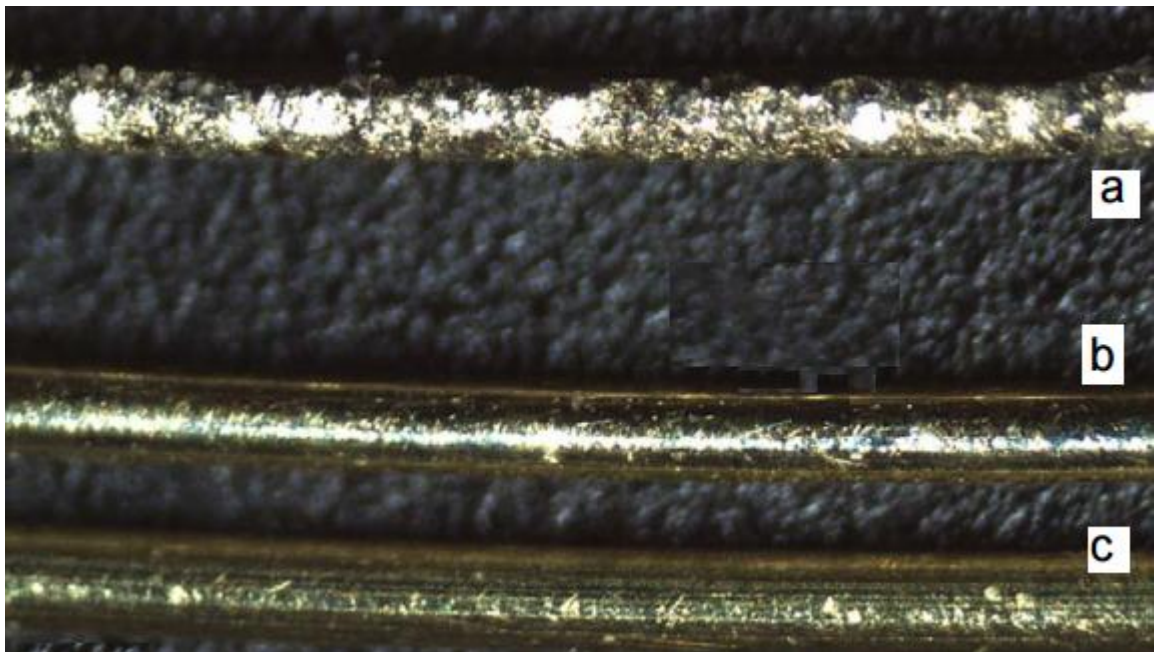
kombinované

1) nástrojová elektroda, 2) pracovní vana, 3) dielektrikum,
4) obrobek, 5) přívod dielektrika, 6) odsávání dielektrika

2.4.5 Dráty používané k elektroerozivnímu řezání

Nejčastěji se u nás používají mosazné dráty, mosazné povlakované zinkem a Cu drát povlakovaný zinkem o průměrech 0,1 mm až 0,3mm v cívkách od 3 kg až 16 kg. Na obrázku č. 16 jsou dráty po elektroerozivním řezání první drát označen písmenem **a)** - je využíván na hrubování, poškození je viditelné pouhým okem. Druhý drát označen písmenem **b)** který se používá k dokončování, zde je poškození hůře viditelné. Třetí drát na obrázku označen písmenem **c)** - je nepoužitý. Drát, procházející průvlakem se v něm kalibruje na požadovanou sílu.

Obrázek č. 16.: ukázka opotřebení drátu po elektroerozivním řezání vlastní zdroj



Praktická část

3 Řezání

3.1 Řezání laserem

Řezání je nejrozšířenější laserovou technologií. Toto využití laserů se datuje od roku 1965, kdy firma Western Electric Company postavila funkční laserový systém pro řezání diamantových raznic. V roce 1967 byl pak ve velké Británii uveden do provozu laserový systém na řezání ocelových plechů s použitím kyslíku jako asistenčního plynu. Záhy poté následovaly systémy pro řezání nekovových materiálů.

V sedmdesátých letech minulého století pak docházelo k masivnímu průmyslovému nasazení laserového řezání za pomoci CO₂ laserů. Tyto systémy byly vývojáři zdokonalovány. Zdokonalovaly se jejich zdroje, řídicí systémy, postprocesory apod. Další z pokrokových událostí ve vývoji CO₂ laserů bylo uvedení neprůtočného difusně chlazeného laseru. Tento typ laseru nepotřebuje externí zdroje laserových plynů a v systému též nejsou žádné pohybuující se části. Z tohoto důvodu mají tyto lasery výrazně nižší provozní náklady a vyšší kvalitu výstupního paprsku. V současnosti se vyrábí až do výkonu 8kW.

Ke konci minulého století dosahovaly CO₂ lasery takových hodnot, že se začaly v konstrukci řezacích laserových strojů více prosazovat lineární motory a to hlavně s možností podstatně vyšších řezných rychlostí. Též docházelo k použití pevnolátkových laserů a to v případě řezání tenkých plechů.

V poslední době se odehrává ve znamení výrazného použití vláknových laserů. [12]

3.1.1 Typy laserového řezání

3D laserové řezání

Jinak nazývané prostorové řezání se stává daleko jednodušší za pomoci vláknových laserů. Laserová řezací hlava je umístěna na přírubě poslední osy robota. Laserový paprsek je přiveden do místa řezání optickým vláknem, což integraci laseru na robota velmi zjednodušuje. V případě vyřezávání přesných otvorů ve 3D je možné umístit řezací hlavu do autonomního souřadnicového X - Y polohovadla, které pak při zastavení robota v příslušné poloze zajišťuje vyřezání přesných otvorů.

Remote cutting (vzdálené řezání)

V poslední době se díky zvyšujícím se výkonům laserů a zdokonalování optických systému (dynamický expandér) začíná v průmyslu stále více uplatňovat i tzv. remote cutting. Převážně u nekovových materiálů jako jsou textilie, papír, plasty. U této technologie je umístěn dynamický expandér, který zajišťuje optimální nastavení velikosti řezného bodu, K rozmítání paprsku po řezné ploše dochází vychylováním paprsku dvěma galvanoskanery ve skenovací hlavě, která při procesu řezání zůstává na jednom místě. Podstatně více je tato metoda využívána u laserového svařování.[12]

Proces řezání laserem rozdělujeme na sublimační, tavné a pálení.

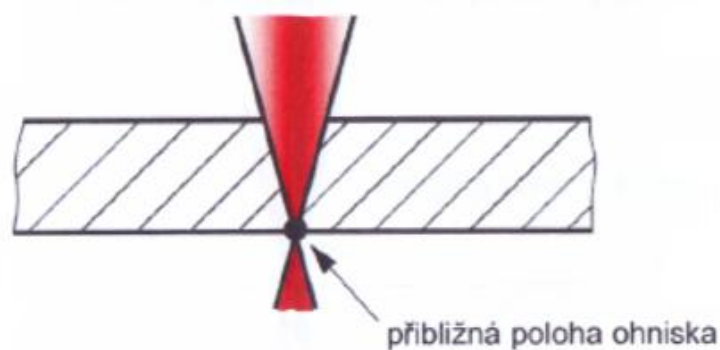
Sublimačním řezáním je materiál odstraňován převážně odpařováním v důsledku vysoké intenzity záření laseru v místě řezu. Detail přiblížení ohniska při sublimačním řezání je znázorněno na obrázku č. 19.

Tavným řezáním je materiál v místě řezu díky působení paprsku laseru roztaven a podpurným plynem odfukován. Tímto způsobem

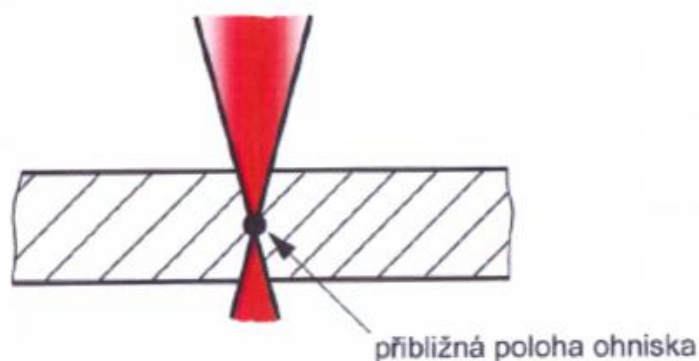
jsou řezány nekovové materiály. Například plasty, keramika, textilní materiály, dřevo a papír a také sklo. Detail přiblížení ohniska lze vidět na obrázku č. 17.

Pálením paprsek laseru ohřeje materiál na zápalnou teplotu, s přívodním reaktivním plynem, hoří v exotermické reakci. Plyn, který se používá pro tuto reakci, bývá například kyslík. Vzniklá struska je z místa řezu odstraňována podpurným plynem. Tímto způsobem lze řezat například konstrukční ocele, ocele s nízkým obsahem uhlíku, korozivzdorné ocele a titan. Přiblížení ohniska při pálení lze vidět na obrázku č. 18.

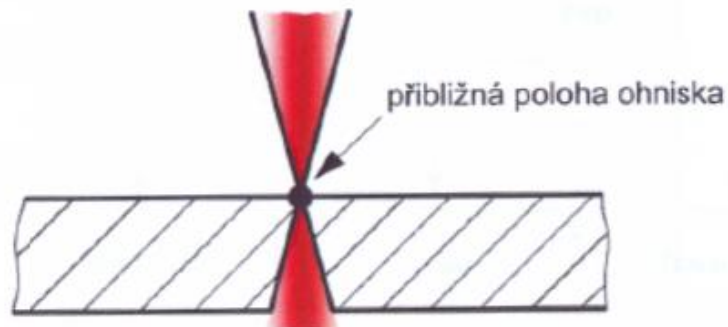
Obrázek č. 17.: detail ohniska při tavném řezání převzato a upraveno z [7]



Obrázek č. 18.: detail ohniska při pálicím řezání převzato a upraveno z [7]



Obrázek č. 19: detail ohniska při sublimačním řezání převzato a upraveno z [7]



K základní charakteristice řezání laserem se řadí, rychlost řezání a kvalita řezu.

Rychlost řezání - hodnotí se podle způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, tloušťce a druhu řezaného materiálu.

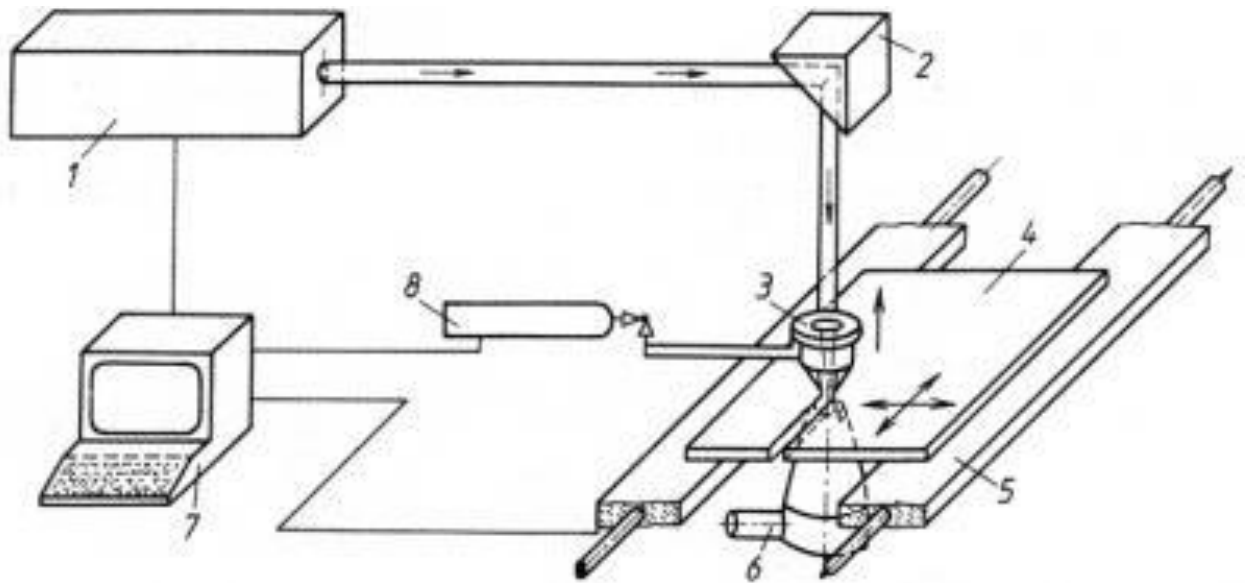
Kvalita řezu - závisí na jakosti řezané plochy (bývá Ra 3,6 až 12 mm) a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti (0,05 až 0,2mm).

Šířka řezné spáry - odvíjí se od druhu laseru a materiálu, jeho tloušťkou a šířkou (bývá 0,02 až 0,2mm)

Mezi výhody řezáním laserem se řadí malá šířka řezu, malá velikost tepelně ovlivněné oblasti, žádné opotřebení nástroje, čistý řez, možnost řezání složitých tvarů, hospodárnost.

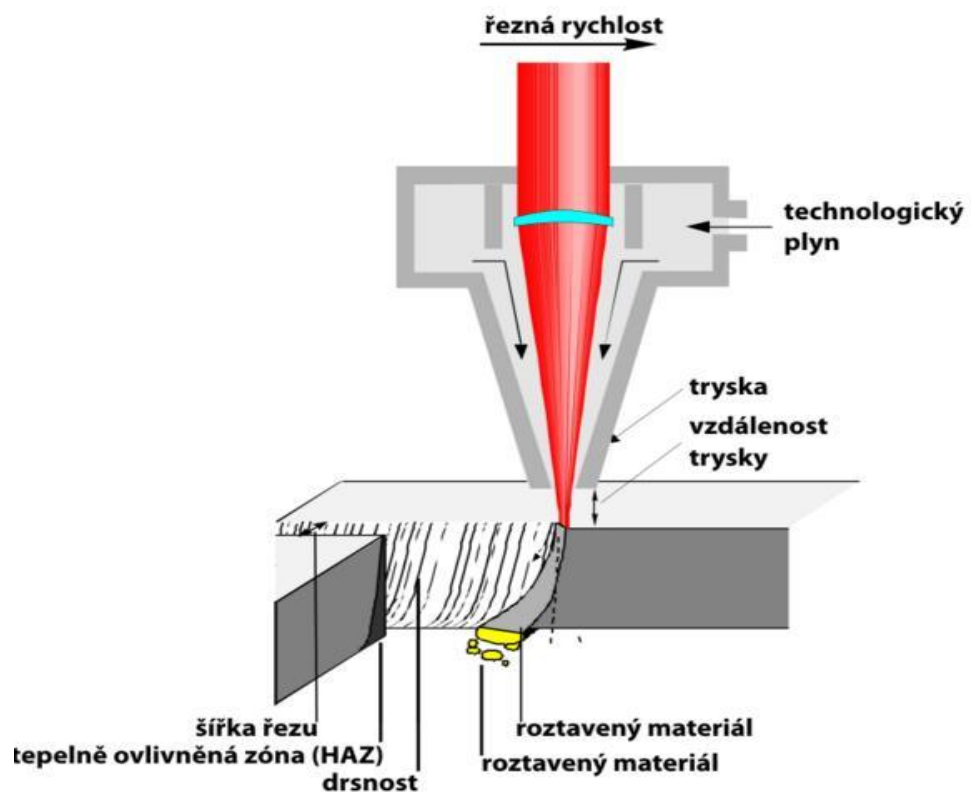
Nejpoužívanější lasery ve strojírenství pro řezání jsou kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 15 kW, s nimiž je možné řezat konstrukční ocele do tloušťky 20 mm, dále korozivzdorné ocele do tloušťky 10 mm a slitiny hliníku do tloušťky 5 mm. Pro přesnější řezy s menší šířkou řezné spáry se používají Nd:YAG lasery o výkonu 100 až 1000W, s nimiž je možné řezat konstrukční ocele do tloušťky až 6 mm, korozivzdorné ocele do tloušťky 3 mm a slitiny hliníku až do tloušťky 2 mm. [20,21]

Obrázek č.20: schéma znázorňující zařízení pro řezání laserem převzato a upraveno z [20]



1. laser, 2. zrcadlo, 3. pracovní řezací hlava, 4. obrobek, 5. pracovní stůl stroje, 6. odsávání zplodin, 7. CNC řídicí systém. [20]

Obrázek č. 21: podrobné schéma řezání laserem, převzato a upraveno z [12]



Řezání laserem je nejrozšířenější aplikace ve strojním průmyslu a to díky velmi úzkému řezu od 0,1 do 1mm a s přesnou přesností rozměrů.

Tabulka č. 1 základní lasery používané pro řezání v technickém průmyslu, převzatá a upravená z [22]

Laser	Vlnová délka v (nm)	Buzení	Efektivita	Režim	Výkon/ energie	aplikace	údržba	životnost (h)
Nd:YAG	1064	LD	~7%	CW	až 6kW	Ř,S	ano	~10 000
				pulsní*	~ mJ@ns (~100W)	Z,G		
		lampy	~3%	pulsní*	~ J@ms (~600W)	S,V		~1000
CO ₂	10 600	RF	~10%	CW / pulsní	10-250W	Z,G, Ř nk.	ano	~20 000
		El.	~25%		až 5kW (Slab)	Ř,S		--
					až 20kW (průtočné)	Ř,S		
Diskový	1070	LD	~15%	CW	až 16 kW	Ř,S	ano	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30%	CW	až 80 kW	Ř,S	ne	~100 000
				QCW	~ J@ms (~1,2kW)	Z,G,M		
				Pulsní	~ mJ@ns (~100W)	Z,G,M		
Tento laser se nepoužívá pro řezání v technickém průmyslu.								
Diodový	808-980	El.	~60%	CW	až 10kW	S,K,N	ne	~15 000

Legenda k tabulce: Efektivita - účinnost přeměny elektrické energie na světelnou optickou

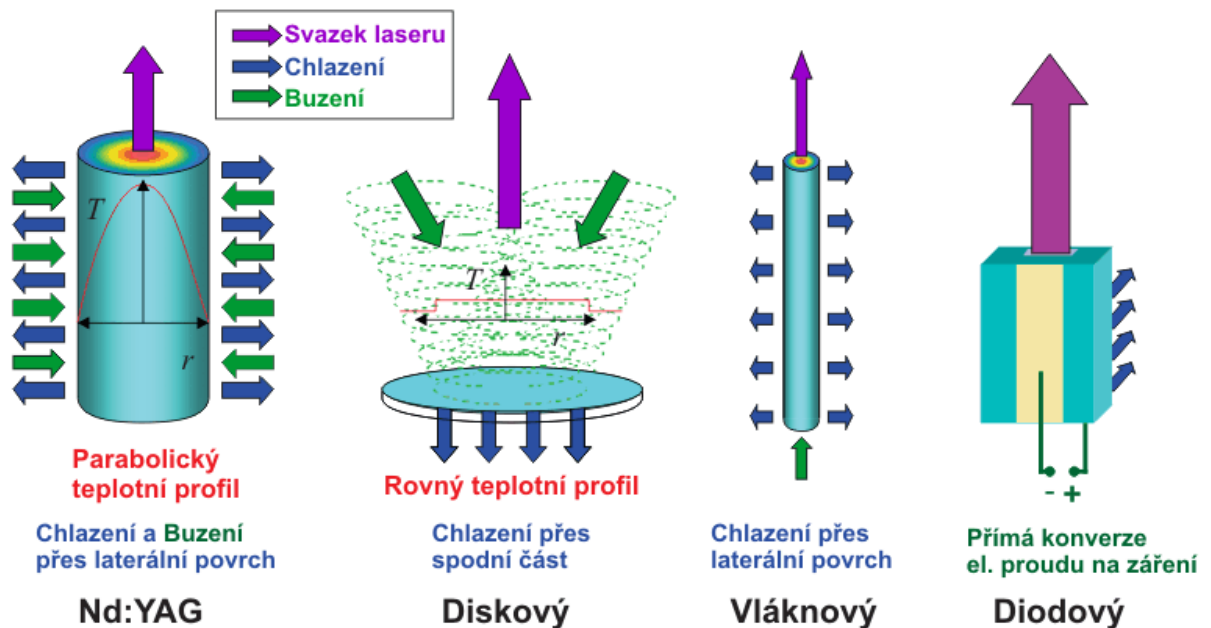
Režim - u pulzních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce). CW - kontinuální, QCW - kvazi kontinuální.

Ř - řezání, S - svařování, Z - značení, G - gravírování, K - kalení, N- nanášení vrstev, M-mikro-obrábění, nk -nekovů.

Buzení: LD - laserové diody, RF - radio frekvenčně,

El. - elektricky (výboj, proud) [22]

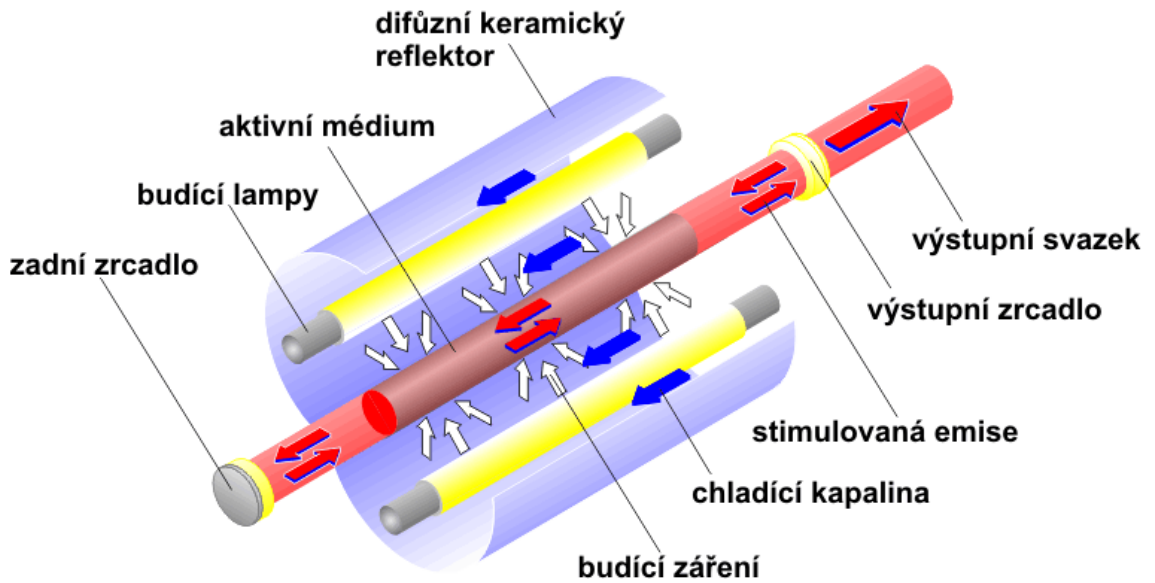
Obrázek č. 22: pevnolátkové lasery převzaté a upravené z [22]



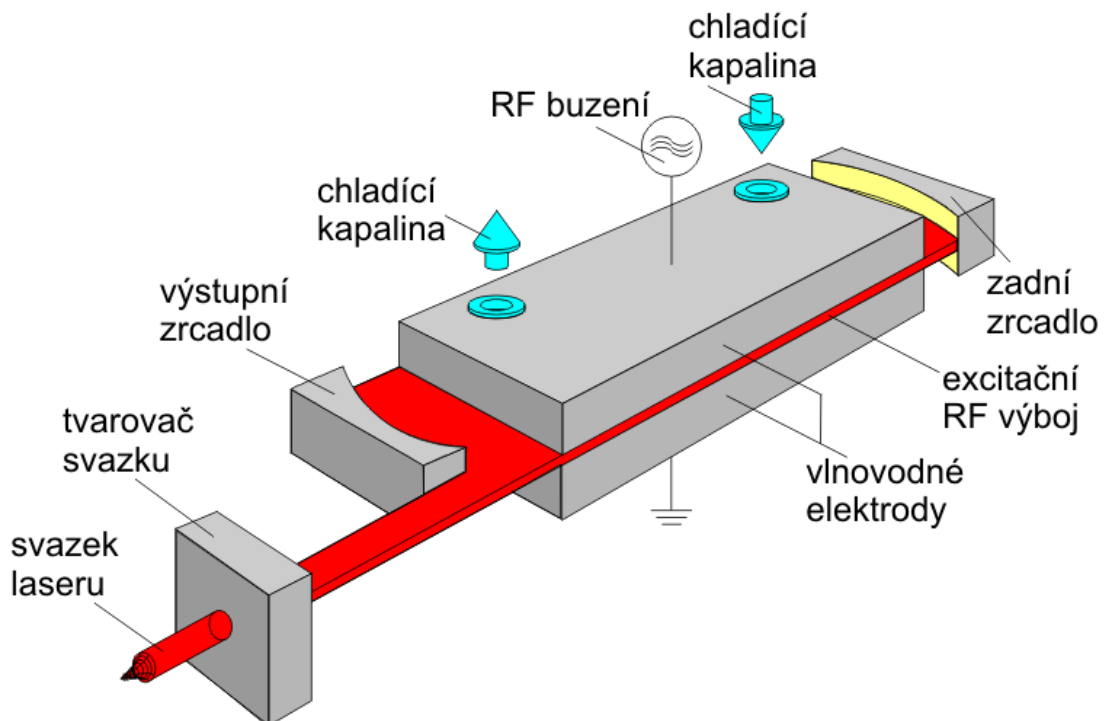
Nd:YAG laser je historicky nejstarší s použitím v průmyslu. Tyto lasery se používají s výbojkami LPSS (lamp solid state) viz obr. č. 22, nebo laserovými diodami DPSS - (diode pumped solid state)[22]

Tento laser pracuje na vlnové délce 1,0 μ m (infračervené části spektra). O výkonu rozmezí 100-4000W. Buzení je výbojkami, (dnes se nahrazují diodami) jsou umístěny v rezonátoru, který je postaven tak, aby většina světla na něj dopadající byla odražena do krystalu. Jeho výhodou je, že může být veden optickým vláknem. [22]

Obrázek č. 23.: schéma Nd:YAG laser převzato a upraveno z [22]



obrázek č. 24: schéma neprůtočného difusně chlazeného slab laseru převzato a upraveno z [22]



CO₂ lasery patří do plynových laserů. V průmyslu se používají lasery buzené radio-frekvenčně (RF) nebo elektrickým výbojem

(DC - direct current). Z hlediska uzavřenosti rezonátoru se dělí na sealed off lasery s hermeticky uzavřeným rezonátorem a průtočné lasery, kdy plyn rezonátorem neustále proudí, což je nutné u vysokých výkonů ~10kW. Do výkonu 5kW se používají difúzně chlazené a radio-frekvenčně buzené viz obrázek č. 21. Buzení aktivního plynu se provádí RF vlněním, které probíhá mezi dvěma elektrodami. Elektrody zajišťují svojí velkou plochou difúzní chlazení plynu v rezonátoru. CO₂ lasery vynikají vysokou spolehlivostí, životností a nízkými provozními náklady. Využití CO₂ laserů je pro značení, gravírování, řezání nekovů. (plasty, kůže, papír, skla apod.)

(21)

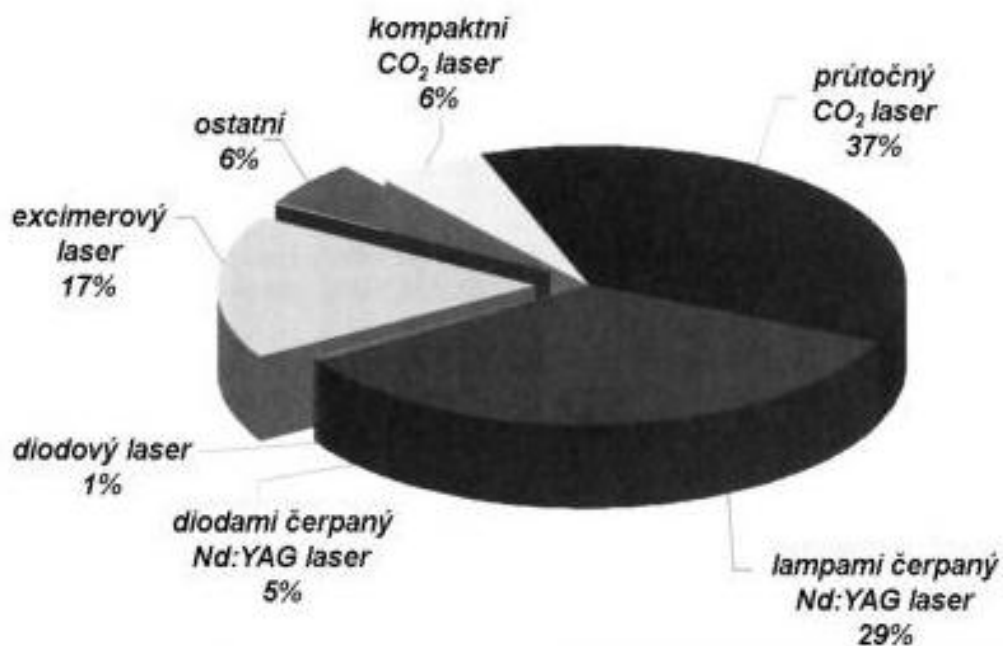
3.1.2 Porovnání výhod a nevýhod při řezání laserem

Tabulka č. 2 výhody a nevýhody při řezání laserem [14]

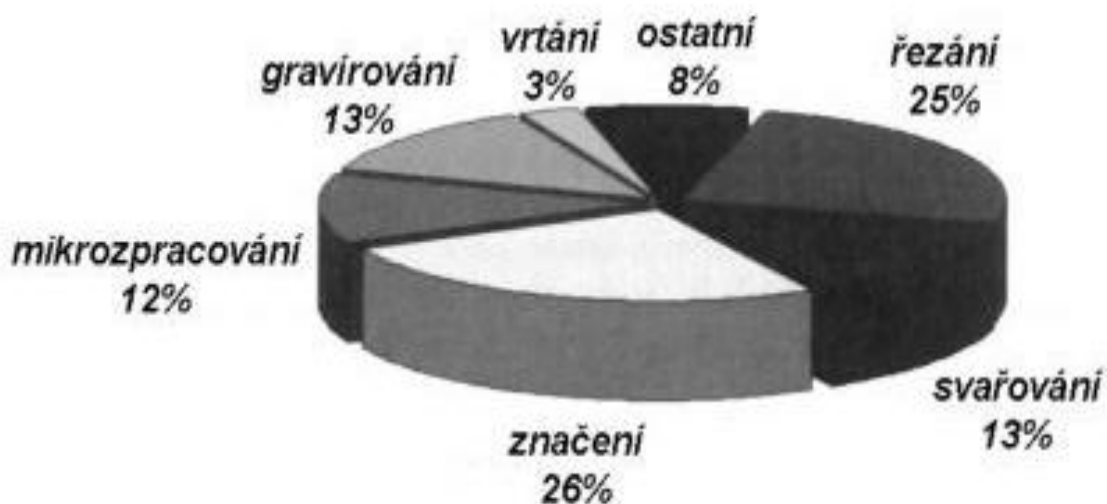
Výhody	Nevýhody
Vysoká produktivita	Obtížné řezání materiálů s vysokou reflexivitou
Automatizace	
Vysoká přesnost u slabých a středních tloušťek materiálů	Omezené tloušťky řezaných materiálů
Malá hlučnost	
Úzká řezná spára	Vysoké provozní a investiční náklady
Malá tepelně ovlivněná oblast	Malá účinnost (CO ₂ laser 10%)

Na obrázcích č. 25 a č. 26 jsou graficky znázorněné podíly laserů na trhu a rozdělení dle pracovní činnosti laserů.

Obrázek č. 25 podíl laserů na trhu převzato a upraveno z [9]



Obrázek č. 26.: procentuální rozdělení jednotlivých laserových technologií, převzato a upraveno z [9]

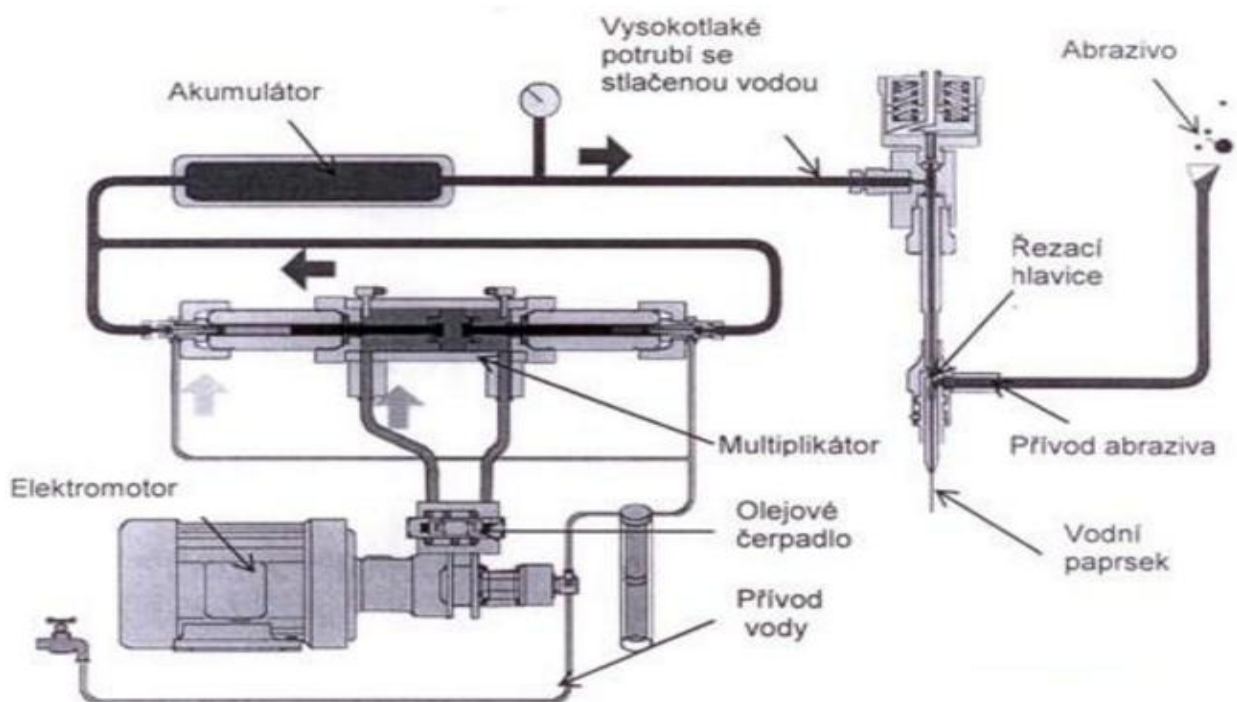


3.2 Řezání vodním paprskem

Řezání vodním paprskem je ovlivněno množstvím abraziva ve vodním paprsku. Jeho rychlost se může pohybovat od $10 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (pro měkké materiály) až do $2500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (pro tvrdé materiály). Pracovní tlak vody se pohybuje v rozmezí 800-4100 Barů. O čistém vodním paprsku, se hovoří tehdy, jedná-li se o vznik paprsku v řezací hlavě, která je zakončena řezací tryskou. Touto metodou můžeme řezat měkké materiály.

Vodní paprsek s abrazivem může, jak jsem již uvedla řezat i tvrdé materiály. Pohyb řezací hlavy a dráha vodního paprsku je řízená počítačem. Takto dělený materiál není tepelně ovlivněný, jedná se o takzvaný studený řez. V tom je hlavní výhoda oproti vodnímu paprsku a elektroerozivnímu dělení. Touto metodou lze též dělit složité tvary. Na obrázku č. 27 je schéma zařízení pro řezání abrazivním vodním paprskem. Tato metoda se řadí mezi mechanicko-fyzikální metody.

Obrázek č. 27.: zjednodušené znázornění schématu pro řezání abrazivním vodním paprskem převzato a upraveno z [7]



3.2.1 Hlavní části stroje pro AWJ

Vysokotlaké čerpadlo na obrázku č. 28 je vyobrazeno vysokotlaké čerpadlo s multiplikátorem, které dosahuje vysokých tlaků až 700MPa. Čím větší tlak, tím vyšší je efektivita řezání. Stejně jako u laserů, čím výkonnější tím vyšší nároky na celé zařízení. Používají se dva systémy čerpadel a to čerpadla s triplexovým plunžrem a čerpadla s multiplikátorem. Čerpadla s multiplikátorem jsou častěji používanými.

Na obrázku č. 28 je čerpadlo s multiplikátorem společnosti JOSÁ s.r.o. je to zdroj tlakové pracovní kapaliny. Vysokotlaké čerpadlo dodává množství 2 - 4,5 litrů za minutu.

Systém čistících filtrů - tento systém má odstraňovat nečistoty z přiváděné kapaliny a zároveň vede přečištěnou kapalinu do vysokotlakého čerpadla.

Nízkotlaké čerpadlo - zajišťuje regulaci výstupního tlaku, tím ovládá vysokotlaké čerpadlo.

Zásobník pro pracovní kapalinu - vyrovnává a udržuje konstantní tlak pro pracovní kapalinu z vysokotlakého čerpadla.

Vysokotlaké potrubí - rozvádí kapalinu k řezací hlavě, patří sem trubky, ventily, rotační klouby, výhybky, odbočky, spirály.

Zásobník pro abraziva - (u čistého vodního paprsku se nevyskytuje) ze zásobníku jsou zrna nasávána principem ejektoru do směšovací komory. Zásobník mívá kolem 200kg a má seřiditelné výstupní dávkování.

Řezací hlava - schéma řezací hlavy je na obrázku č. 29. Rozlišuje se, zda je na čistý vodní paprsek nebo na paprsek

s přidaným abrazivem. Pro řezání čistým vodním paprskem je ve spodní části těla pro paprsek umístěna safírová tryska, která může mít průměr výstupní díry 0,1 - 0,4 mm. Se vzdáleností 2-70 mm. V těle pro paprsek s abrazivem je umístěna safírová tryska, která může mít průměr výstupní díry 0,25 mm, která směřuje kapalinu do směšovací komory. Za ní je řezací tryska, kterou už probíhá směs kapaliny a abraziva. Tato tryska bývá vyrobena z wolframu nebo karbidu o průměru výstupní díry 0,8 - 2 mm. Vzdálenost této trysky od povrchu obrobku bývá 2-10 mm.

Lapač zbytkové energie vodního paprsku - je umístěn proti řezací trysce, pod řezaným materiálem. Zachycuje a tlumí energii paprsku. Nejčastěji se vyskytuje jako vana o výšce 800 mm naplněná keramickými kuličkami.

Manipulační zařízení - nejčastěji je vytvořená jako portál k CNC řídicímu systému. Také se používá souřadnicový stůl. (23)

obrázek č. 28.: čerpadlo s multiplikátorem vlastní zdroj

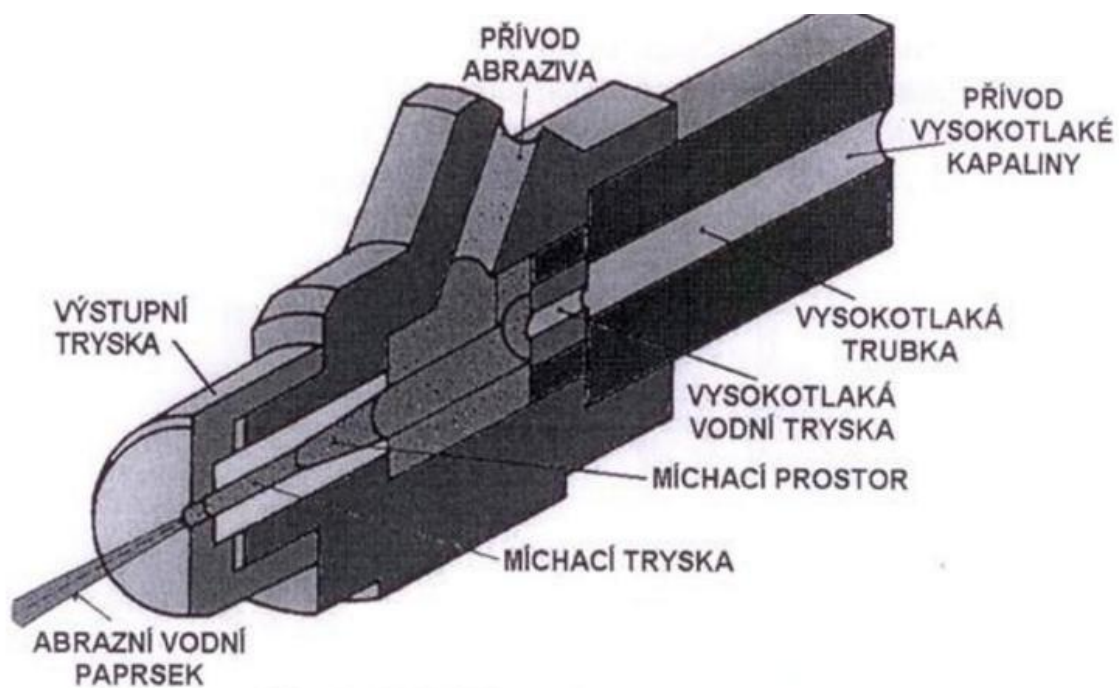


Multiplikátor - je v podstatě násobič tlaku, který pracuje na Pascalově zákoně, kde výstupní tlak p_2 je vyšší než tlak vstupní p_1 . Plocha pístu S_2 proti pístu S_1 .

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1}{S_2}$$

(3)

Obrázek č. 29.: schéma řezací hlavy převzato a upraveno [7]



Obrázek č. 30.: detail řezání vodním paprskem převzato a upraveno z [23]



3.2.2 Jaké materiály lze dělit vodním paprskem

Vodním paprskem můžeme dělit veškeré přírodní nebo umělé materiály, které jsou korozivzdorné. (Nepoškodí je přímý kontakt s vodou) Čili je možné řezat materiály, jako jsou například všechny typy ocelí (kalené, nástrojové bývají příliš tvrdé a dělí se touto metodou špatně), veškeré slitiny a kovy (bronz, mosaz), (hliník, titan), skla (s výjimkou kalených skel), dále kameny (žula, mramor), keramiku, dřeviny, papír, umělé hmoty, gumy, lamina, kompozity, látky, tkaniny a jiné.

3.2.3 Abrazivum používané pro AWJ

Abrazivum je směs brusných zrn, které mají vysokou abrazivní schopnost a specifickou tvrdost. Přidáním abraziv do vodního paprsku vzniká abrazivní vodní paprsek. Výběr vhodného abraziva má vliv na výkon, kvalitu a na cenu řezání. Cena abraziv se pohybuje od 7-10 Kč/kg, prodává se ve 25 kg papírových pytlích. Cena likvidace použitého abraziva (například indický granát se znovu nepoužívá - tzv. se otupí), stojí okolo 1Kč/Kg.

Nejčastěji používané abrazivum je **granát**, který má vysoký účinek, ale i velké opotřebení trysky. Další hojně používaný je **křemičitý písek**, který má nižší účinek a tím pádem nižší opotřebení trysky. Dále se používá Oxid hlinitý (Al₂O₃), olivín, skleněné kuličky, ocelové kuličky. Na obrázku č. 31 jsou vyobrazeny některé z často používaných abraziv. (2,7,24).

Obrázek č. 31 ukázka abraziv převzato a upraveno z [25]

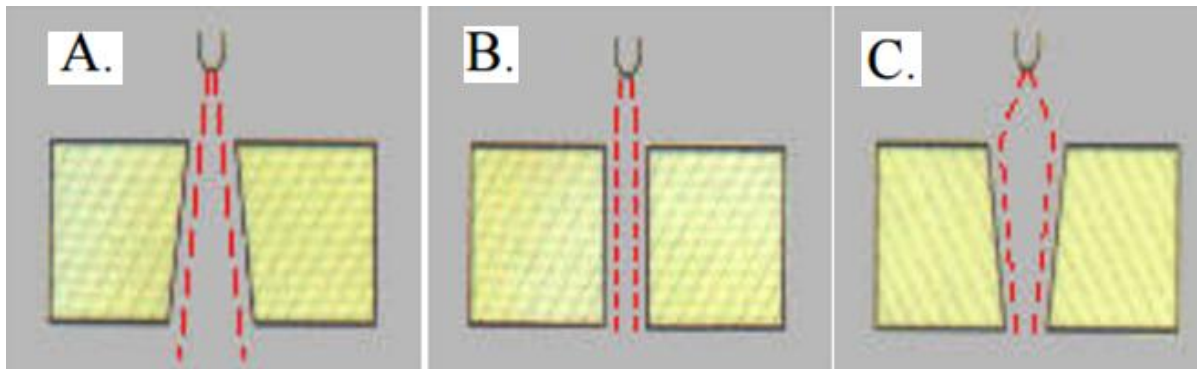


3.2.4 Kvalita řezu

Při dělení materiálu vodním paprskem čistým nebo abrazivním vždy vzniká určitý úkos do max. 1 1,5 stupně. Tento úkos vzniká, když je řez pomalý nebo v měkkém materiálu viz obrázek č.32 Dále při procházení tvrdého nebo silného materiálu a při velké rychlosti, dochází v řezu k jemné kuželovitosti obrázek č. 32 C. Pokud je optimální rovnováha mezi rychlostí a silou materiálu, lze paprsek udržet po celou dobu ve válcovitém tvaru a pak zde k úkosu nedochází. Popsaný

děj je vidět na obrázku č. 32 B. Úkos má vliv na tvar tím i kvalitu řezu, množství abraziva a celkovou kvalitu.

Obrázek č. 32.: úkos vodního paprsku při procházení materiálu převzato a upraveno z (26)



Dále se kvalita řezu hodnotí pomocí tabulky pro vyhodnocení řezu vodním paprskem, kde nejkvalitnější řez označujeme Q5 a dělicí hrubý řez označujeme Q1 viz obrázek č. 33. K vyhodnocení kvality řezu vodním paprskem slouží 5 stupňů jakosti. Jednotlivé stupně jsou popsány v tabulce č. 3.

Obrázek č. 33.: ukázka kvality řezu vodním paprskem převzato a upraveno z [26]



Tabulka č. 3.: stupně pro vyhodnocení kvality řezu AWJ převzato a upraveno z [7]

Kvalitativní stupeň	Charakteristika	Ra v horní kontuře [mm]	Ra v dolní kontuře [mm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	Přesnost v dolní kontuře [mm]	Úkos
Q5	nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	cca 12,5	$\pm 0,15$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q1	dělicí řez	4,0-6,3	do 40	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	výrazný úkos do +

3.2.5 Porovnání výhod a nevýhod AWJ

Tabulka č. 4 výhody a nevýhody při řezání vodním paprskem [14]

Výhody	Nevýhody
Vysoká energetická účinnost (až 80%)	Bez povrchového protikorozního ošetření, rychlý nástup povrchové koroze
Jednoduché uchycení materiálu	
Vysoká přesnost řezu až 0,1mm	U nasákavých materiálů delší vysoušení
Nedochází ke změně struktury povrchu materiálu	Hlučnost řezání až 100db
Úzká řezná spára, úspora materiálu při řezání větších tloušťek	Horší výroba malých dílů (pod 5cm)
Studený řez, bez tepelného ovlivnění řezaného materiálu	Změny barvy povrchu v okolí řezu

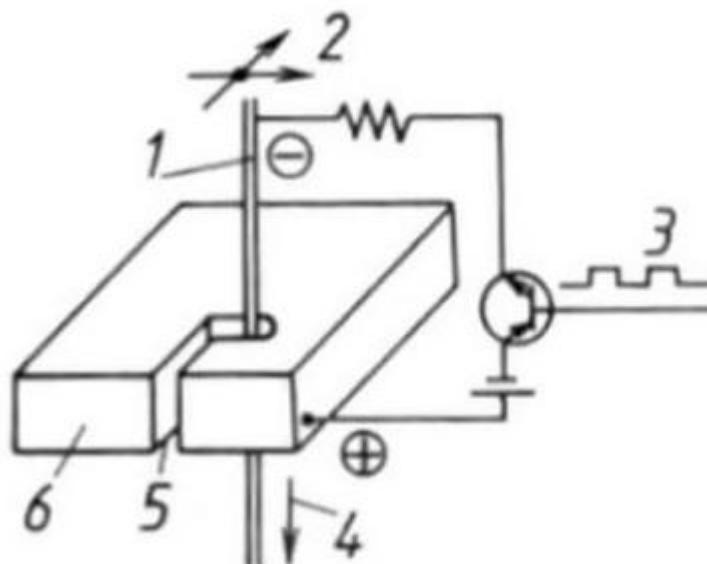
3.3 Elektroerosivní řezání a hloubení

3.3.1 Elektroerozivní řezání drátem

Uváděno WEDM - (Wire Electrical Discharge Machining)

Nástrojovou elektrodou tvoří u této metody tenký drát, který je odvíjený pomocí speciálního napínacího mechanismu. Napínací mechanismus, pro drát je vidět na obr. č. 34. Mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou vznikají elektrické výboje. Nástrojová elektroda může odebírat materiál v každém směru a s vhodným řídicím systémem lze řezat i velmi složité tvary. Automatické stroje jsou dnes vybaveny automatickým vrtáním díry pro zavedení drátu. A s automatickým naváděním drátu a doba bez obsluhy může trvat až 80 hodin. (18). Na obrázku č. 34 je vedení drátové elektrody.

Obrázek č. 34.: vedení a princip WDEM převzato a upraveno z [18]



1) drátová elektroda, 2) CNC řídicí systém, 3) generátor, 4) směr posuvu elektrody, vyřezaná drážka, 6) obrobek. (18)

tato metoda se užívá, kde se musí zhotovit složité a rozmanité tvarové díly. Tyto díly, které se klasickým způsobem obrábění a odlišnou technologií vyrábějí několika metodami. Lze vytvořit najednou a s výbornou přesností. Touto metodou odpadá následná montáž a slícování. Na obrázku č. 35 je ukázka výrobku po elektroerozivním řezání.

Obrázek č. 35.: obrobek vyroben (chladiče) elektroerozivní drátovou elektrodou převzato a upraveno [18]



Metodou elektroerozivního řezání se dnes nejvíce využívá k výrobě přesných lisovacích nástrojů, používaných pro stříhání statorových plechů viz obrázek č. 51, (na kterém je vyobrazen díl střižníku), dále k výrobě součástí brzdového obložení a kombinovaných tvarových výlisků. U nástrojů, kde se řeže více jednotlivých kontur musí být vzájemná poloha do 0,01mm s požadavky na Ra (0,8 -0,4). Elektroerozivní řezačky pracují s přesností až 0,003 mm a s Ra 0,2. Tato přesnost má své nevýhody dochází k oduhličení povrchové mikrovrstvy, na obrobku se objeví bílá vrstva a tato vrstva má za následek změknutí povrchu. Vrstva této mikrovrstvy bývá 0,001mm a u lepších strojů bývá 0,003 mm. Pro dosažení

výsledních parametrů řezání garantovaným výrobcem musí se dodržet veškeré technologie řezání a použití správných drátů pro příslušný stroj. Dále je nutné pravidelná údržba stroje. (2,16,24)

3.3.2 Hlavní části stroje pro WEDM řezání

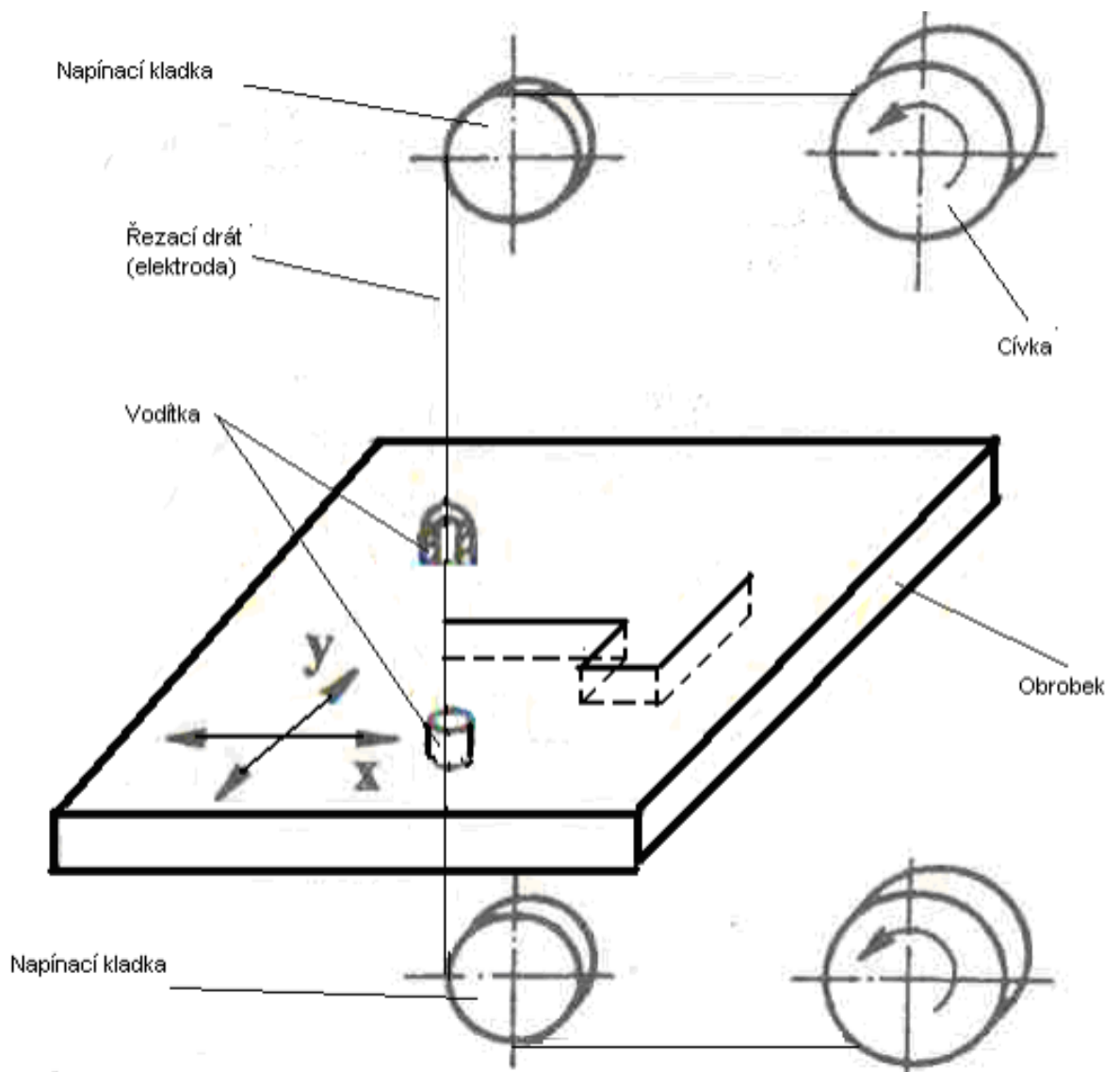
Na obrázku č. 36 je detailní schéma principu vedení drátu stroje pro elektroerozivní řezání. Mezi hlavní části stroje se řadí rám stroje, generátor impulsů, systém vedení drátové elektrody, čerpací a filtrační, chladicí zařízení pro dielektrikum, upínací systém, CNC řídicí systém.

Generátor elektrických výbojů zde se vytváří impulsy o určité frekvenci. Tyto impulsy jsou charakterizovány napětím, proudem a tvarem. Generátory se dělí na závislé (relaxační) generátory, polozávislé generátory a nezávislé (pulzní).

Rám stroje musí mít dostatečnou stabilitu a tuhost, aby při řezání nevznikali žádné nežádoucí mechanické síly. Dále se doporučuje vyrobit z litiny, kvůli dobrým tlumícím účinkům.

Systém vedení drátu zajišťuje plynulé odvíjení drátu ze zásobníku cívky, navlékání a výplach řezu. Drát se vede přes vyrovnávací kladky se stlačeným vzduchem do horního vodítka. Odtud se automaticky navléká do spodního vodítka. Navlékaný drát musí být ostrý. Princip navlékání spočívá v ohřátí na potřebnou teplotu a ochlazením proudem vzduchu, kde dochází k jeho přerušení. V místě přerušení se vytvoří špička. Poté dochází navlečení drátu skrz startovací otvor a dolní hlavu. drát prochází přes řadu kladek a následně je odveden do sběrné nádoby. Doposud nebylo vymyšleno, jak dále tento drát po elektroerozi využít.

Obrázek č. 36.: Detailní schéma principu vedení drátu stroje pro drátové řezání převzato a upraveno z [7]



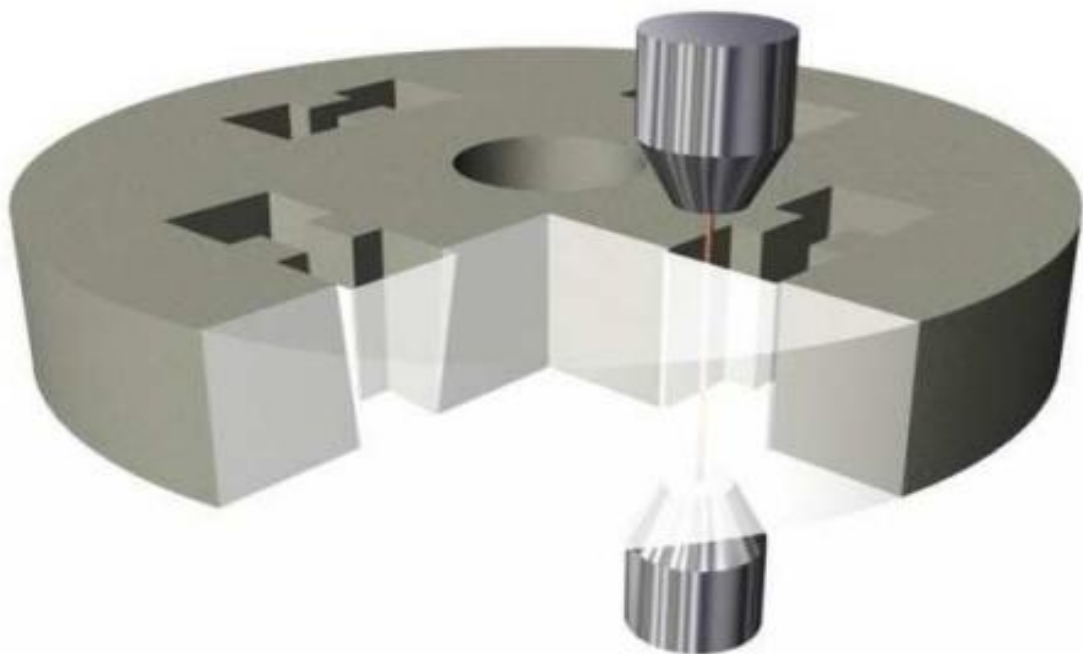
Čerpací a filtrační systém dielektrika zajišťuje dodávku dielektrika k místu řezu a jeho správnou cirkulaci. V systému je dielektrická nádrž, filtrační systém deionizačního systému a chladicí jednotka. Dielektrikum je přiváděno k místu řezu z nádrže pomocí čerpadla. Znečištěné dielektrikum prochází přes filtrační systém a vrací se zpět do nádrže s čistou kapalinou. Pokud je systém znečištěn, spustí se automaticky čištění pomocí stlačeného vzduchu. Odpad odchází do kalové nádrže. Filtry mají životnost okolo 8 tisíc pracovních hodin.

Dielektrikum při řezání ztrácí své vlastnosti, proto prochází přes deionizační zařízení, kde získává opět požadované vlastnosti.

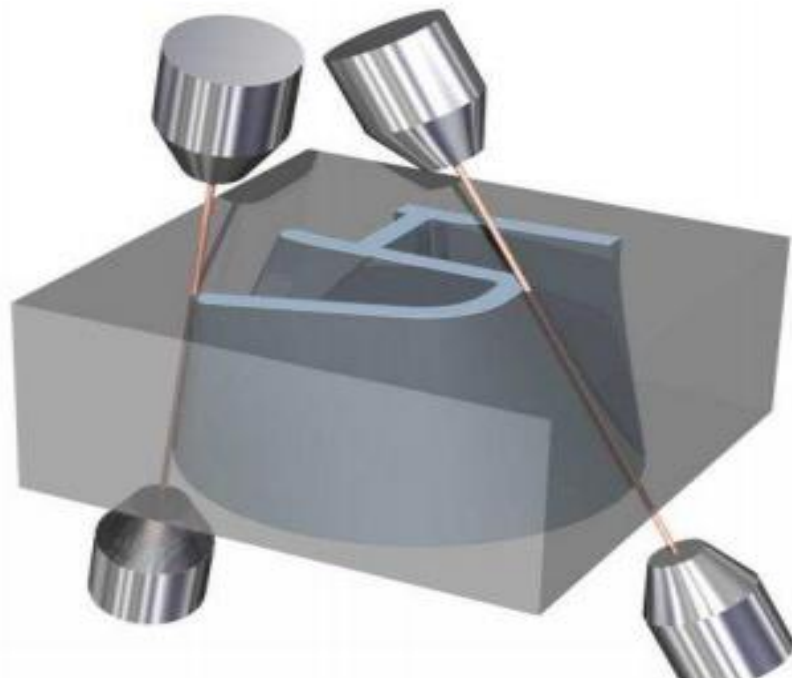
Upínací systém upíná obrobek proti posunutí. Tento systém se skládá ze stolu, sady upínek, lišt s pravítkem, svěráků.

CNC řídicí panel je ovládán pomocí počítače. Obrazovky, klávesnice a řídicího softwaru. tento systém umožňuje u strojů řezat 2D technologií nebo 4D technologie. Rozdílem těchto technologií je že 2D technologii vykonává horní a dolní hlava pracovní pohyb po stejné trajektorii viz obrázek č. 37. U 4D technologii, používanou pro složitější nebo úhlové řezání. Vykonává horní a dolní hlava pracovní pohyb zvlášť. Trajektorie hlav jsou odlišné viz obrázek č. 38. [32]

Obrázek č. 37.: ukázka 2D technologie a vedení hlav elektroerozivním řezání převzato a upraveno z [33]



Obrázek č. 38.: ukázka 4D technologie a vedení hlav při elektroerozivním řezání a vedení hlav převzato a upraveno z [33]



Dráty pro elektroerozivní řezání se u nás nejčastěji používají mosazné dráty a mosazné dráty povlakované zinkem. Na cívkách o velikosti 3 kg - 16 kg a o průměrech 0,1 - 0,3 mm. Na obrázku je vyobrazena cívka od firmy Penta-edm, která má u nás jsou široce zastoupení. (27)

Obrázek č. 39.: řezací drát firmy penta převzato a upraveno z (27)



3.3.3 Porovnání výhod a nevýhod WEDM (drátem)

Tabulka č. 5 výhody a nevýhody při elektroerozivním řezáním drátem

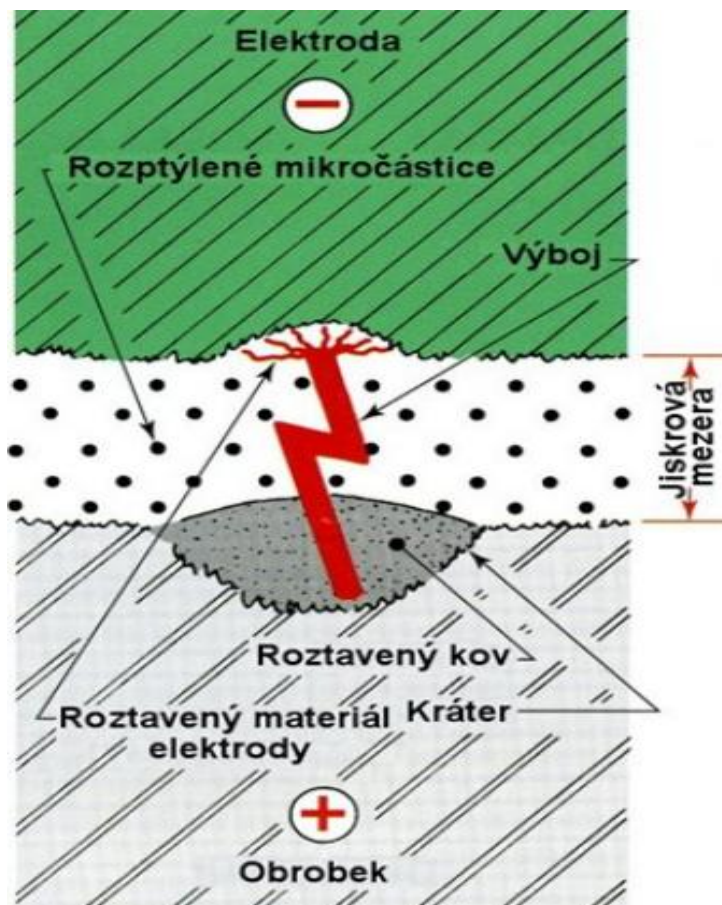
Výhody	Nevýhody
Lze obrábět vodivé materiály, kde se neklade na jejich mechanické vlastnosti	Lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály
Bez mechanického zatížení	Nutnost ponoření obrobku do kapaliny (dielektrika)
Jednoduchá výroba nástrojových elektrod	
Bez otřepů na hranách obrobku	Materiál je vystaven teplotnímu namáhání, tím vznikají trhliny
Malá hlučnost	
Automatizace výrobního procesu	

3.3.4 Elektroerozivní hloubení

Samotné hloubení je založeno na odebírání částic povrchových vrstev z materiálu. Tento úběr je vyvolán opakujícími se elektrickými výboji mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem. Kvalita odebírání částic záleží na vzdálenosti jiskrové mezery. Čím menší vrstva tím lepší úběr materiálu. Tavením a následným odpařováním se oddělují velmi malé částice, které odplavuje dielektrikum. Tímto způsobem se vytváří plocha složitých tvarů. Jedna elektroda je nástroj, který je negativem obráběné plochy a druhá elektroda je obrobek. [34]

Na obrázku č. 40 je podrobné schéma elektroerozivního hloubení

Obrázek č. 40.: podrobné schéma elektroeroziho hloubení převzato a upraveno z [19]



3.3.5 Hlavní části stroje pro EDM hloubení

Moderní stroje mají všechny činnosti řízeny CNC řídicím systémem. Konkrétně se jedná o řízení směru a rychlosti pohybů, polohy pracovního stolu, pracovních parametrů generátoru, přívodu dielektrika, automatické výměny elektrod v zásobníku. Rychlosti přísuvu elektrody a kontrolu probíhající elektroeroze. Řídicí systémy umožňují snadné naprogramování stroje. A tento postup úběru materiálu lze vidět na obrazovce řídicího systému. Elektroerozivní stroje pro hloubení dutin se vyrábějí také v provedení, které umožňuje bezobslužný provoz až po dobu 48 hodin. Jednotlivé technologické aplikace vyžadují různé formy elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu a na obrobek

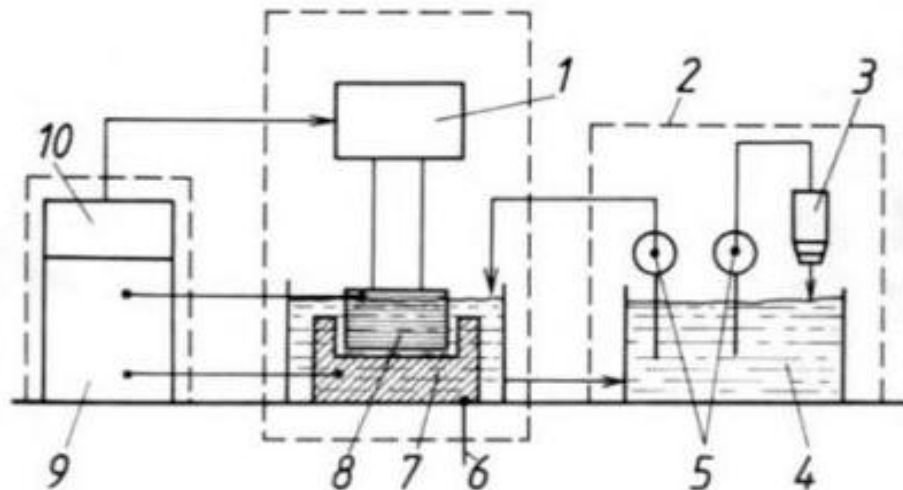
přiváděny z generátoru ve formě pulzů o určité frekvenci. Každý pulz je charakterizován napětím, proudem a tvarem.[19] Na obrázku č. 41 je vyobrazeno schéma elektroerozivního stroje a jeho hlavní části.

Pracovní hlava s upínáním nástrojových elektrod. Způsobů na upínání elektrod je mnoho. Požadavkem je možnost opakované vyjímání a vracení elektrody do stejné polohy.

Filtrační zařízení se skládá z čerpadla filtrace, zásobníku dielektrika, filtrační nádoby, potrubí a ventilů.

Nádrž pro dielektrikum. Další části jsou popsány v elektroerozivním řezání drátem tj. **čerpadlo, pracovní stůl, generátor. CNC řídicí systém** [34]

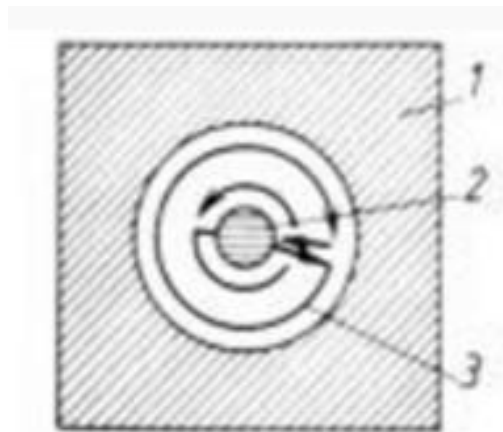
Obrázek č. 41.: schéma elektroerozivního stroje převzato a upraveno z [18]



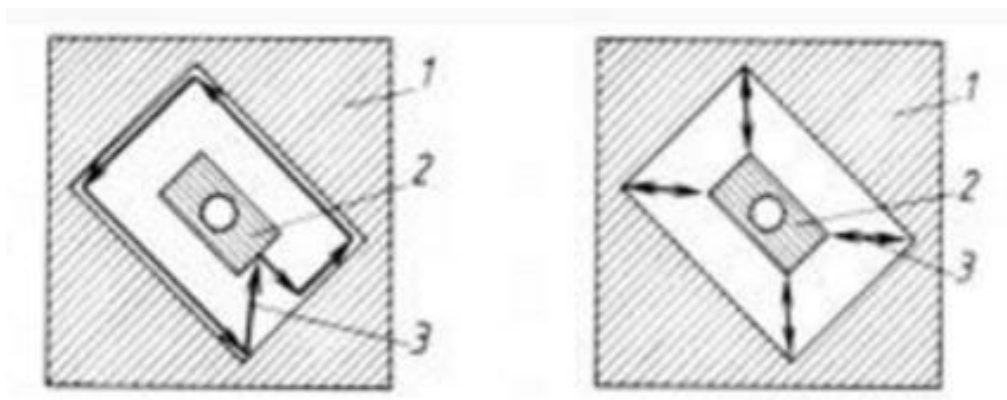
1)pracovní hlava, 2)filtrační zařízení, 3)filtr,
4)dielektrikum, 5)čerpadlo, 6)pracovní stůl, 7)obrobek,
8)nástrojová elektroda, 9) generátor, 10) CNC řídicí systém

Výroba složitých tvarových povrchů hloubení dutin a forem se technologicky liší v provedení nástrojové elektrody a tvarem obráběného povrchu. Povrch, který je obráběn nebo tvořen vnějším tvarem či drážkou, průchozí dírou. Používají se stroje s CNC řízením s více souřadnými osami. Stroj se třemi přímočarými posuvnými pohyby ve směru tří vzájemně kolmých os a dvěma otáčivými pohyby jejíž ložením lze získat planetový pohyb. Na obrázku číslo 42, 43, 44, 45, jsou ukázány příklady těchto složených elektrod.

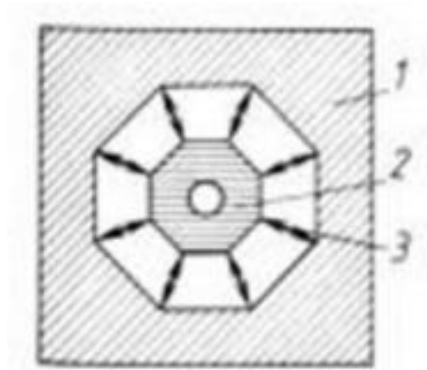
Obrázek č. 42.: schéma kruhové elektrody, převzato a upraveno z [19]



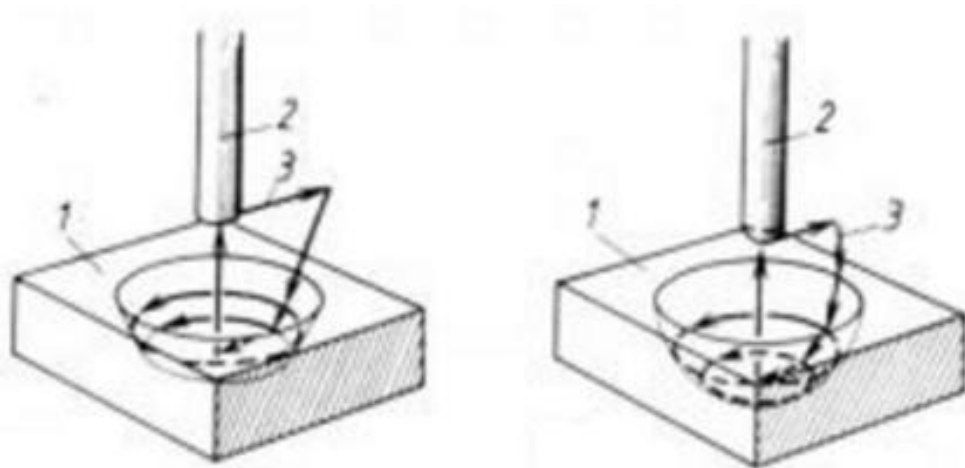
obrázek č. 43.: schéma obdélníkové elektrody, převzato a upraveno z [19]



Obrázek č. 44.: schéma osmihranné elektrody, převzato a upraveno z [19]

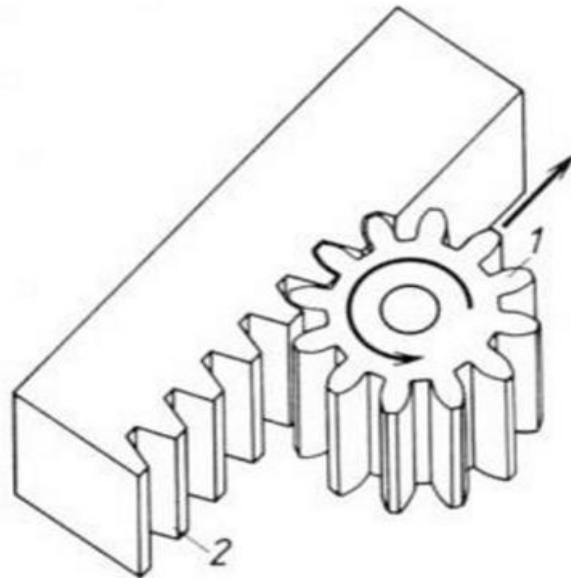


Obrázek č. 45.: schéma kuželové a kulové elektrody, převzato a upraveno z [19]



legenda k obrázkům 1)obrobek, 2) nástrojová elektroda, 3)pracovní pohyby nástrojové elektrody.[19]

Obrázek č. 46.: výroba povrchu kombinací tvarů a pohybů nástrojové elektrody, převzato a upraveno z [19]



1) nástrojová elektroda, 2) obrobek

3.3.6 Porovnání výhod a nevýhod při EDM hloubení

Tabulka č. 6 výhody a nevýhody při elektroerozivním hloubení (18)

Výhody	Nevýhody
Lze obrábět vodivé materiály, kde se neklade na jejich mechanické vlastnosti	Lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály
Bez mechanického zatížení	Nutnost ponoření obrobku do kapaliny (dielektrika)
Jednoduchá výroba nástrojových elektrod	
Bez otřepů na hranách obrobku	Materiál je vystaven teplotnímu namáhání, tím vznikají trhliny
Malá hlučnost	
Automatizace výrobního procesu	

4 Řezáním LBM a AWJ ve společnosti JOSA s.r.o.

4.1.1 Historie společnosti JOSA s.r.o.

Společnost JOSA s.r.o. byla založena v roce 1992. Hlavní oborem činnosti je zaměřen na zakázkovou kovovýrobu. Společnost patří do součásti holdingu JPS Group. Zaměstnává přibližně třicet kvalifikovaných zaměstnanců a vlastní certifikaci ISO 9001:2009 od TÜV SÜD CZECH. S kapacitou provozoven 4000 m². Společnost se zabývá nejen dělením materiálů laserem, vodním paprskem, plamenem, plazmou. Zpracovává plechy a profily, ohýbání, ohraňování, stříhání, zakružování. Přesnému CNC obrábění, frézování, soustružení, vrtání, broušení, 3-D měření. Dále se zabývá svařováním nerez ocelí, ocelí, hliníku, atd.

Technologické možnosti firmy v CNC řezání a pálení zaměřené na **Laser** - max. 15 x 1 500 x 3 000 mm a **Vodní paprsek** - max. 150 x 2 000 x 3 000 mm . [28]

V této kapitole se budu zabývat řezáním materiálu ve společnosti JOSA s.r.o.

Společnost JOSA s.r.o. řeže na stroji FARLEY LASERLAB PROFILE PLUS viz obrázek č. 47.

4.1.2 Popis stroje FARLEY LASERLAB PROFILE PLUS

Stroj FARLEY LASERLAB PROVILA PLUS (laser), který používá společnost JOSA s.r.o., se řadí mezi pulzní CO₂ lasery. Používá tři druhy pomocných plynů. CO₂ je hlavním plynem dále He, N. Tento stroj pracuje o vlnové délce 10,6(μm) Pořizovací náklady byly vysoké. Maximální souběžná rychlost os je 5500m/s⁻¹. Společnost řeže ve 2D technologii, výjimečně ve 3D technologii. Tento stroj používá 5 a 7 palcovou čočku, jako asistenční plyn používá oxid uhličitý (CO₂). Na nerez používá dusík (N), helium (He) nepoužívá. Výkres pro laser se vytváří v programu INVENTOR AUTOCAD a následně se přes síť nahrává do systému stroje. Další technické údaje stroje viz tabulka č. 7 Stroj řeže pouze v kolmém stavu, naklopení není možné a k řezání používá pouze jednu hlavu. V řezací hlavě se pouze mění čočky a to 5 palcové a 7 palcové (viz obrázek č.49) a k nim odpovídající měděné trysky s rozměrem děr o průměru 1 a 1,5 mm(viz obrázek č.50).

Tabulka č. 7 technické údaje stroje FARLEY LASERLAB profile plus

Laser	Vlnová délka v (μm)	Buzení	Efektivita	Režim	Výkon/ energie	aplikace	údržba	Životnost (h)
CO ₂	10,6	El.	~25%	CW / pulsní	5kW	Z,G, Ř nk.	ano, stroj čeká generální oprava	~20 000
						Ř,S		--
						Ř,S		

V příloze č. 6 je detailně vyobrazeno na odpadovém díle tečný zápich laseru a jeho následné zakončení tečné vyjetí. Nejčastěji se na tomto stroji řežou čela rotůrků do štěpkovačů. V příloze č. 7 detail po řezu na výřezku. Tento stroj má konstrukční omezení danou výškou materiálů. Řeže jednou hlavou a tím pádem jednou konturou. Drsnost povrchu

firma neřeší, není při výrobě těchto výpalků důležitá, kontroluje se pouze rozměr. Orientační doba proběhu laserového paprsku obrobkem bývá dle síly materiálu. U slabších to bývá 1 - 1,5 sekunda. Silnější materiály 15 - 40 sekund. Řezáním laserem je dle firmy nákladnější, přesnější a rychlejší.

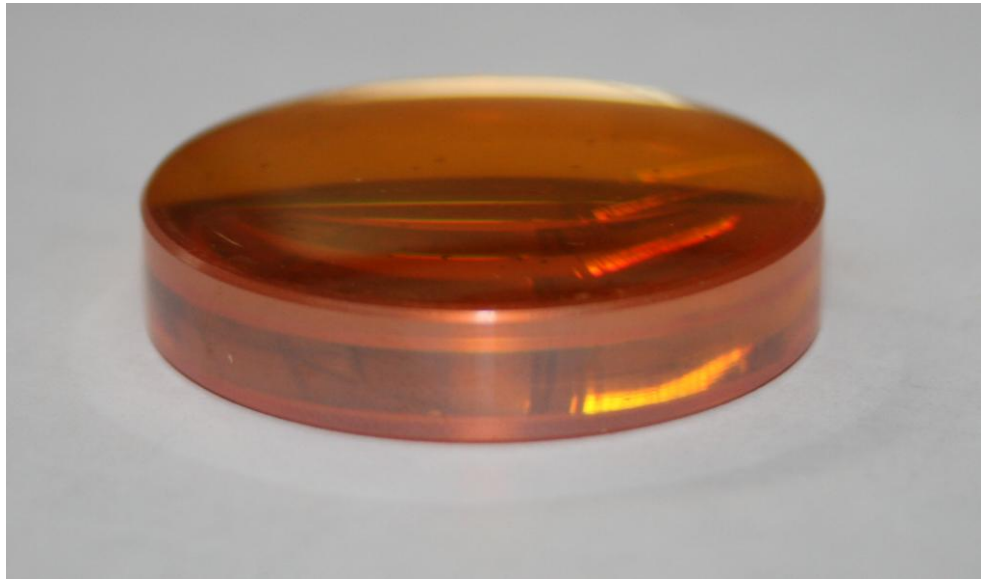
Obrázek č. 47.: laser FARLEY LASERLAB profile plus vlastní zdroj



Obrázek č. 48.: detail pracovní plochy laseru FARLEY LASERLAB vlastní zdroj



Obrázek č. 49.: pětípalcová čočka laseru vlastní zdroj



Obrázek č. 50.: měděná tryska laseru o průměru 1 a 1,5mm vlastní zdroj



4.1.3 Popis stroje AQUACUT 6001

Stroj AQUACUT 6001 ve společnosti JOSA s.r.o., řeže vodním paprskem za pomoci abraziva. Stroj byl dodán společností firmou MICROSTEP. Stroj má příkon 2,5KW a pracuje na 220V, 50Hz. Stroj dále obsahuje čerpadlo s multiplikátorem, řezací hlavu, vodní nádrž pro zachycení vody. Vodu pro řezání, používají běžnou vodu z vodovodního řádu, bez speciální úpravy. Abrazivum používají přírodní indický granát. Řídicí systém NC, kam je nahrán výkres do systému vytvořený v programu AUTOCAD. Rychlost řezání je pomalejší než u laseru. Řez je studený. Společnost stroj používá na řezání kovových materiálů, které nelze nebo se nevyplatí řezat na laseru. Nejčastěji společnost z nekovových materiálů řeže gumy. Společnost tímto strojem neřeže pouze nástrojovou ocel. Stroj má dvě řezací hlavy, společnost používá pouze jednu. Průstřel materiálu je 1m za minutu a guma 5m za minutu. Hliník se hůře obrábí (nalepuje se). S duralem je obrábění lepší díky mědi. Na tomto stroji je možné řezat pouze v kolmém směru. Společnost drsnost povrchu u výrobků zanedbává (neřeší), pouze se kontroluje rozměr. Maximální rozměr materiálu je 2x3 metry a do hloubky 100 milimetrů. Materiály, které podléhají korozi, se musí dále obrábět.

Tabulka č. 8 technické údaje stroje Aquacut 6001 [29]

stroj	pracovní délka v(mm)	Pracovní šířka (mm)	Počet řezacích hlav	Max. tloušťka materiálu (mm)	Polohovací rychlost m/min	Čerpadlo s multiplikátorem	Životnost (h)
Aquacut	3000 - 18000	1500-4000	2	200	Do 40	ano	~20 000

4.2 Historie Českobudějovické společnosti

Historie společnosti, která vlastní stroje na elektroerozivní řezání drátem a elektroerozivní hloubení sahá do roku 1899. Tato společnost prošla mnoha stadii vývoje. Dnes společnost prosperuje díky provázání výrobních programů od strojírenství až po slévárenské zaměření. Hlavními obory této společnosti jsou slévárenství, obrábění, speciální metody obrábění, montáže zaměřené převážně na automobilový a spotřební průmysl. Společnost pracuje v nepřetržitém třísměnném provozu.

4.2.1 Popsání stroje AGIE na EDM hloubení

Elektroerozivní hloubení ve společnosti je využíváno k výrobě složitých tvarových ploch u forem a dutin zápuštěk. Nejčastěji pro erodování hlubokých žeber.

Stroj pro hloubení používá firma stroj značky AGIE (obrázek v příloze č. 3), který byl společnosti dodán firmou Penta. Tento stroj je řízen CNC systémem. Nástrojovou elektrodu používá společnost grafitovou (viz. obr. č.14) nebo měděnou.

Tabulka č. 9 technické údaje stroje AGIE

stroj	Posuvy X,Y,Z (mm)	max rozměry Obrobku DxŠxH	max.hmotnost obrobku (kg)	Režim (Min.mm)	Vzdálenost k elektrodě (mm)	Max váha elektrody (kg)	Životnost (h)
AGIE	350,250,350	650x580x250	400	170	520	100	~20 000

4.2.2 Popsání stroje značky Makino WEDM

Elektroerozivní řezání drátem na stroji Makino na obrázku v příloze č. 2. Tuto řezačku společnost využívá k výrobě přesných lisovacích střižních nástrojů, především ke stříhání rotor statorových plechů. Dále k různým tvarům brzdového obložení a nástrojů k tvarovým výliskům. Společnost používá předkalené výrobky a řeže tzv. na čisto. Na této řezačce řežou pouze otvory. Nepoužívají trubičky pro děrovací stroje. Nafrézují díru do „měkkého“ a pak řežou činnou část, do kaleného. Na obrázku č. 51 je střižník na kterém lze vidět kalenou kostku se startovacím otvorem, kde elektroerozivní drát jede ke kontuře objede můstek a poté jede na čisto a následně se můstek oddělí. Makino řezačka používá program KOVOPROG. Dráty používají mosazné, měděné. Rychlost odvíjení drátu $50 - 360\text{mm/s}^{-1}$. Tyto dráty projedou obrobkem pouze jednou a pak jdou do odpadu. Zatím nikdo nevymyslel jiné využití. Kvalita řezu záleží na vzdálenosti jiskrové mezery.

Obrázek č. 51: detail střižníku vyříznutého EDM metodou



Tabulka č. 10 technické údaje stroje Makino

stroj	Posuvy X,Y,Z (mm)	Max. rozměry nádoby DxŠxV	max.DxŠxV obrobku (mm)	Režim Rychlého posuvu (mm/min)	vodítka	Max Náklon (řezání úhlů)	Životnost (h)
Makino	600,400,260	1020x700x290	920x600x260	2000	PICO - kruhová	+/- 15°	~33 000

5 Komparace dělení materiálu metodou LBM, AWJ, EDM a WEDM z různých hledisek

Na obrázcích **A, B, C** je ukázka porovnání hrany, jednotlivými metodami po oddělení materiálu. U laseru viz obrázek č. 52 A), je nutné další opracování. Vodní paprsek obrázek č. 53 B) a elektroerozivní obrázek č. 54 C) již další opracování nepotřebují. [30]

Obrázek č. 52.: ukázka hrany po laserovém řezání, převzato a upraveno [30]

Laser A)



Obrázek č. 53.: ukázka hrany po řezání vodním paprskem
převzato a upraveno [30]

vodní paprsek B)



Obrázek č. 54.: ukázka hrany po elektroerozivním řezání
převzato
a upraveno [30]

elektroerozivní C)



Tabulka č. 11.: komparace jednotlivých metod dělení materiálů

	Laser	Vodní paprsek	Elektroerozivní
Proces	Tání, použití světelného paprsku	Eroze pomocí vysokotlakého paprsku s abrazivem	Použití elektrického výboje
Druhotné operace	Někdy ano, odstranění oxidovaného okraje	Neprovádí se Díky studenému řezu	Neprovádí se
Materiál	Převážně oceli, nerezové oceli a hliník, různé materiály	Prakticky jakýkoliv	Pouze elektricky vodivé materiály
Tloušťky materiálu	Obvykle jeden palec a méně v závislosti na materiálu	24 palců, omezení na tloušťku	Obecně 12 palců a méně
Přesnost	001 palce	001 palce	001 palce
Náklady	200k-1M	60k -300k	100K-400K
Rychlost řezu	300/min	100/min	Pomalá 1/za min
Nastavení stroje	Různé plyny a parametry dle materiálu	Stejně pro všechny materiály	Různé typy drátu pro různé úlohy

Tabulka č. 12.: náklady na provoz dílčích metod pro dělení převzatá a upravená z [31]

Technologie	Hodinové náklady provozu
Laser	*1800 - 3000
Vodní paprsek	*1200 - 1500
Elektroerozivní	* 700 - 1000

*Označení nákladů na hodinový provoz označujeme hodnotou N_{hs} [Kč.hod⁻¹]

Náklady jsou pouze orientační, protože zahrnují pořizovací náklady na stroj a většinou již jde o stroje účetně odepsané. Z toho plyne, tak velké rozmezí nákladů.

Položky v provozu v nákladech

Pro hodinový provoz stroje se uvažují specifikované položky.

- cena stroje C_s v [Kč] jedná se o pořizovací cenu dodavatele nebo výrobce, případně úvěru pořízení stroje.
- náklady na instalaci stroje N_i [Kč] zde se jedná o náklady spojené s dovozem, montáží případně základny a přívodem energie.
- náklady na demontáž N_d [Kč] jsou to náklady spojené s ukončením provozu stroje, demontáž a uvedení pracoviště do původního stavu
- likvidační hodnota L [Kč] tento zisk vzniká případným prodeje stroje po jeho životnosti nebo cena likvidační (za šrot)
- doba životnosti Z [rok] tato doba je počítána za účelem účetního odepisování stroje
- efektivní časový fond stroje za rok F_{et} [hod]
- fixní hodinová sazba S_f [Kč.hod⁻¹] toto jsou náklady spojené se mzdou pracovníků, který stroj obsluhuje, programuje, energie

Z těchto dílčích nákladů vychází pak výpočet nákladů na hodinový provoz ze vzorce

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L}{Z \cdot F_{ef}}$$

(4)

Musím podotknout, že provozní náklady strojů pro řezání, jsou pouze orientační, protože tyto náklady ovlivňují další faktory, které mohou tyto náklady do jisté míry ještě

změnit. (například tloušťka nebo tvrdost materiálu atd.). Tyto náklady jsou poté porovnávány u strojů s podobným výkonem.

Další parametry, které mohou ovlivnit rychlost posuvu řezání a tím pádem i cenu jsou:

- U laserů, kde se řadí mezi hlavní parametry výkon, vzdálenost ohniska od materiálu, typ podpůrného plynu, tlak a další.
- U vodního paprsku výstupní tlak z trysky, průměr trysky, průměr vstupní trysky, průměr směšovací trysky, vzdálenost trysky od povrchu materiálu, množství a kvalita použitého abraziva a další.
- U elektroerozivního řezání je to rychlost průběhu drátu materiálem, typ drátu, vzdálenost horního vodítka se spodním a další.

(31)

Tabulka č. 13 komparace metod řezání z hlediska měrné práce, úběru, příkonu (31)

Způsob řezání (obrábění)	Laser	Vodní paprsek	elektroerozivní	Pro porovnání s (k. m)* soustružení, frézování
Úběr [mm ³ .s ⁻¹] (průřez/s)	30 - 500	80 - 600	5 - 120	15000
Práce potřebná pro odebrání objemu [J.mm ⁻³]	80 - 150	15 - 100	100- 1000	1 - 10
Příkon stroje[kW]	5- 40	5 - 20	15	5 - 50

* (k.m.) - konvenční metody

Tabulka č. 14 využití pokrokových metod u těžkozpracovatelných materiálů

Materiál	Laser	Vodní paprsek	elektroerozivní
Oceli vysoké pevnosti	1	1	1
Kalitelné oceli	1	1	1
Austenitické,ferromagnetické oceli	1	1	1
Oceli + slitiny vytvrditelné	1	1	1
Slitiny na bázi Ni, Ni-Cr,Co	1	1	2
Titan + jeho slitiny	1	1	1
Litiny vysoké tvrdosti		1	1
Vysokolegované litiny		1	1
Slinuté karbidy	1	1	1
Keramické materiály	1	1	
Křemíkové materiály	1	1	
Diamant	1		

Poznámka k tabulce: 1 - vhodné k řezání danou metodou
2 - nevhodné pro chromové slitiny

Tabulka č. 15.: komparace pokrokových metod ze společnosti JOSA s.r.o. a Českobudějovické společnosti

Parametr	Pokroková metoda		
	Stroj zn. FARLEY LASER LAB PROFILE PLUS	Vodní paprsek Stroj zn. MICKOSTEP	Elektroerozivní stroj zn. MAKINO
Materiál, který lze řezat	Téměř veškeré, kromě těch co mají světelnou odrazivost	Téměř veškeré, pouze nástrojová ocel nelze	Vše vodivé
Teplota řezu	Teplý řez	Studený řez	Studený řez
Kolmost řezu	kolmý řez	Kolmý řez	±15°
Výronek na řezné spáře	Řez bez výronku	Mírný výronek	Řez bez výronku
Kvalita řezané plochy	Malá drsnost	Velká drsnost, není na závadu	Malá 0,8 mm
Vliv tvrdosti řezaného materiálu na rychlost	Má vliv	Má vliv	Nemá vliv
Řezání plastů	Firma neprovádí	Lze	Nelze
Řezání kompozitů	Firma neprovádí	Lze	Nelze
Řezání keramiky, skla, kamenu	Firma neprovádí	lze	Nelze
Reliéfní obrábění	Je možné, lze	Lze	Nelze
Velikost materiálu	Velké i malé dílce	Velké i malé dílce	Velké i malé dílce
Tloušťka materiálu	Malé a střední polotovary do 15mm	Malé a střední dílce do 100mm Až 2x3 m	400 mm dle stroje
Velikost materiálu	Velké i malé dílce	Velké i malé dílce	Velké i malé dílce
Vliv na pracovní prostředí	Hluk, zplodiny jsou dobře odsávány	Hluk	Exhalace
Jakost povrchu u malých tloušťek	Firma drsnost neřeší	Firma drsnost neřeší	Dobrá
tolerance rozměru cca u malých tloušťek	Do ± 0,1	Přesnější než laser ± 0,01	± 0,8
Kvalita řezné škrápy	Velmi dobrá	Horší až špatná	Závisí na výšce obrobku
Šířka řezu	0,3 mm	1 mm	Dle drátu od 0 1 -0,3 mm
Šířka zářezu	0,6 mm	1,5 mm	Startovací otvor 0,4 mm

Závěr

Hlavním cílem práce bylo vytvořit srozumitelný metodický text použitelný při výuce na téma, pokrokových metod dělení materiálů. Při psaní práce jsem se zaměřila na tři moderní technologie: laser, vodní paprsek a elektroerozivní řezání a hloubení.

Ke splnění hlavního cíle práce bylo zapotřebí splnit řadu dílčích cílů. V teoretické části jsem nejdříve provedla rešerši pokrokových metod dělení materiálů vybraných technologií.

Pro uvedení do problematiky bylo nezbytné se zabývat jak historií, tak i vývojem vybraných metod. Za užitečnou pomůcku považuji objasnění základních pojmů, kterým se věnuji na začátku teoretické části.

Při zpracování teoretické části jsme narážela na často se opakující literaturu. To je dáno tím, že vychází převážně z obdobné publikační činnosti. Například jsem vycházela z publikace Miroslavy Vrbové, I. Maňkové, dále z publikace Václava Sochory. Využívala jsem odborné články z internetu. Výsledné interpretace jsem soustředila v celé práci. I přes skutečnost opakující se literatury, se domnívám, že mnou provedený rozbor a popis má významný přínos v přehledném a srozumitelném uspořádání. Jednotlivé podkapitoly teoretické části na sebe logicky navazují a společně s praktickou částí tvoří ucelený metodický text.

Splnění cílů praktické části vyžadovalo, abych se seznámila s reálným použitím a využitím popisovaných technologií. Za tímto účelem jsem navštívila strojírenské podniky na Českobudějovicku. Díky obětavosti vedení společností a obsluhujícího personálu, jsem mohla získat cenné informace. Možnost vytvořit fotodokumentaci, jak opracovaných výrobků,

tak strojů. Fotodokumentaci jsem použila převážně v praktické části a v přílohách.

Konkrétní parametry technologií a samotný proces řezu (dělení) detailně rozebírám v jednotlivých podkapitolách praktické části. V rámci těchto podkapitol jsem provedla i všeobecný popis řezacích strojů. Zabývala jsem se zde kvalitou řezu a na závěr každé podkapitoly k dané technologii jsem přidala tabulku výhod a nevýhod.

Logickým vyústěním mé práce se nabízelo shrnutí rozdílů mezi jednotlivými pokrokovými metodami, které jsem uvedla v páté kapitole. Komparací těchto metod jsem splnila další cíl práce.

Složitost zpracování metodického textu souvisí i s tím, že tyto pokrokové metody jsou neustále inovovány a jejich vývoj není zdaleka ukončen.

Jsem přesvědčena, že jsem dosáhla všech vytčených cílů a vytvořila tak srozumitelný metodicky pojatý text, který bude dobře použitelný ve školní praxi a při výuce technických předmětů.

Seznam použité literatury:

- [1] Miroslava Vrbová, Helena Jelínková, Petr Gavrilov, Úvod do laserové techniky, 1998 vydavatelství ČVUT , 1994 ISBN 80-01-01108-9 228s
- [2] Maňková Ildikó, Progresívne technológie, Katedra technológií a materiálov, Strojnícka fakulta TU Košice, 2000, ISBN 80-7099-430-4, 275s
- [3] Historie laseru dostupné z <http://www.lasery.wz.cz/historie.html> 12.1.2017
- [4] 3 Miroslava Vrbová Oborová encyklopedie, Lasery a moderní optika, Praha Prometheus, 1994 474s. ISBN 80-85849-56-9
- [5] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1425>
- [6] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser> 21.1.2017
- [7] Nekonenční technologie obrábění (vzdělávací a tréninkový modul) Ong. Karel Osička, Ph.D. , Ing. Milan Kalivoda. Dostupné z <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf> 24.1.2017
- [8] <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm> 22.1.2017
- [9] Řasa Jaroslav a Zuzana Kerečaninová, nekonvenční metody obrábění díl 4. <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html> z 22.1.2017
- [10] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1423>
- [11] Seriál na téma lasery dostupné z <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127> 27.1.2017
- [12] Seriál na téma lasery dostupné z <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129> 30.1.2017
- [13] řezání vodním paprskem dostupné z https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter#History 4.2.2017

- [14] <http://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Jak-funguje-vodni-paprsek.aspx#components> 7.2.2017
- [15] Jana Dvořáková, Jaromír Dvořák, frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ, dostupné z <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologiei-awj.html> 27.1.2017
- [16] KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi - WJM. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80 - 8057 091 4.
- [17] <http://slideplayer.cz/slide/2874610/> z 15.2.2017
- [18] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html> 26.2.2017
- [19] eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1401 23.2.2017
- [20] Řasa Jaroslav a Zuzana Kerečaninová, nekonvenční metody obrábění díl 5. <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html> 30.1.2017
- [21] Sochor V., Lasery a koherentní svazky, Praha 1990, Československá akademie věd ISBN 80-200-354-1 195s
- [22] Seriál na téma lasery dostupné z <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-128> z 28.1.2017
- [23] <http://www.eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1425> z 27.1.2017
- [24] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007.. ISBN 978-80-8073-769-6147
- [25] Abrazivo <http://www.vibratory-finisher.cz/abrazivo/>
- [26] <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf> 2.3.2017
- [27] <http://www.penta-edm.cz/rezaci-draty/> z 28.2.2017
- [28] <http://www.josa.cz> z 27.2.2017
- [29] http://www.microstep.sk/produkty/stroje/vodnolucove_stroje/aquacut/ z 22.2.2017
- [30] <http://www.flowwaterjet.com/Learn/Comparative-Cutting.aspx#edge> z 21.1.2017

[31] http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5663 z 28.2.2017

[32] MORÁVEK, Rudolf. Nekonvenční metody obrábění. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 1999, 102 s. ISBN 80-708-2518-9.

[33] DELCAM. FeatureWIRE: programování drátových řezaček
13.12.2016 Dostupné z:

<http://www.delcam.cz/produkty/featurecam/featurewire-edm/>

[34] file:///D:/Film/VY_32_INOVACE_NMO_12.pdf z 27.3.2017

Seznam obrázků a tabulek:

Obrázek č. 1.: Základní zjednodušené schéma laseru	str. 13
Obrázek č. 2.: elektromagnetické záření	str. 14
Obrázek č. 3.: schéma Rubínového laseru	str. 16
Obrázek č. 4.: Schéma CO ₂ laseru	str. 17
Obrázek č. 5.: další schéma CO ₂ laseru	str. 18
Obrázek č. 6.: samovolná emise	str. 21
Obrázek č. 7.: absorpce záření převzato	str. 21
Obrázek č. 8.: stimulovaná emise	str. 21
Obrázek č. 9.: povrch po řezání AWJ	str. 25
Obrázek č. 10.: schéma vodního paprsku s abrazivem	str. 26
Obrázek č. 11.: schéma porovnání principu technologií AWJ a WJM	str. 27
Obrázek č. 12.: schéma stroje pro vedení drátu pro drátové řezání	str. 30
Obrázek č. 13.: detailní schéma elektroeroze	str. 31
Obrázek č. 14.: elektroda z grafitu	str. 32
Obrázek č. 15.: přívod dielektrika mezi obrobek a nástrojovou elektrodu	str. 34
Obrázek č. 16.: ukázka opotřebení drátu po elektroerozivním řezání	str. 35
Obrázek č. 17.: detail ohniska při tavném řezání	str. 38
Obrázek č. 18.: detail ohniska při pálicím řezání	str. 38
Obrázek č. 19.: detail ohniska při sublimačním řezání	str. 39
Obrázek č. 20.: schéma znázorňující zařízení pro řezání laserem	str. 40
Obrázek č. 21.: podrobné schéma řezání laserem	str. 40
Obrázek č. 22.: pevnolátkové lasery	str. 42
Obrázek č. 23.:schéma Nd:YAG laser	str. 43
Obrázek č. 24.: schéma neprůtočného difusně chlazeného slab laseru	str. 43
Obrázek č. 25.: podíl laserů na trhu	str. 45
Obrázek č. 26.: procentuální rozdělení jednotlivých laserových technologií	str. 45

Obrázek č.27.: zjednodušené znázornění schématu pro řezání abrazivním vodním paprskem	str. 46
Obrázek č. 28.: čerpadlo s multiplikátorem	str. 48
Obrázek č.29.: schéma řezací hlavy	str. 49
Obrázek č. 30.: detail řezání vodním paprskem	str. 50
Obrázek č. 31 ukázka abraziv	str. 51
Obrázek č. 32.: úkos vodního paprsku při procházení materiálu	str. 52
Obrázek č. 33.: ukázka kvality řezu vodním paprskem	str. 53
Obrázek č. 34.: vedení a princip WDEM	str. 55
Obrázek č. 35.: obrobek vyroben elektroerozivní drátovou elektrodou	str. 56
Obrázek č. 36.: Detailní schéma principu vedení drátu stroje pro drátové řezání	str. 58
Obrázek č. 37.: ukázka 2D technologie a vedení hlav elektroerozivním řezání	str. 59
Obrázek č. 38.: ukázka 4D technologie a vedení hlav při elektroerozivním řezání a vedení hlav převzato	str. 60
Obrázek č. 39.: řezací drát firmy Penta	str. 60
Obrázek č. 40.: podrobné schéma elektroeroziho hloubení	str. 62
Obrázek č. 41.: schéma elektroerozivního stroje	str. 63
Obrázek č. 42.: schéma kruhové elektrody	str. 64
Obrázek č. 43.: schéma obdélníkové elektrody	str. 64
Obrázek č. 44.: schéma osmihranné elektrody	str. 65
Obrázek č. 45.: schéma kuželové a kulové elektrody	str. 65
Obrázek č. 46.: výroba povrchu kombinací tvarů a pohybů nástrojové elektrody	str. 66
Obrázek č. 47.: laser FARLEY LASERLAB profile plus	str. 69
Obrázek č. 48.: detail pracovní plochy laseru FARLEY LASERLAB	str. 69
Obrázek č. 49.: pětipalcová čočka laseru	str. 70
Obrázek č. 50.: měděná tryska laseru o průměru 1 a 1,5mm	str. 70

Obrázek č. 51: detail střížníku vyřiznutého EDM metodou	str. 73
Tabulka č. 1 základní lasery používané pro řezání v technickém průmyslu	str. 41
Tabulka č. 2 výhody a nevýhody při řezání laserem	str. 44
Tabulka č. 3 stupně pro vyhodnocení kvality řezu AWJ	str. 53
Tabulka č. 4 výhody a nevýhody při řezání vodním paprskem	str. 54
Obrázek č. 52.: ukázka hrany po řezání laserem	str. 74
Obrázek č. 53.: ukázka hrany po řezání vodním paprskem	str. 75
Obrázek č. 54.: ukázka hrany po elektroerozivním řezání	str. 75
Tabulka č. 5 výhody a nevýhody při elektroerozivním řezáním drátem	str. 61
Tabulka č. 6 výhody a nevýhody při elektroerozivním hloubení	str. 66
Tabulka č. 7 technické údaje stroje FARLEY LASERLAB profile plus	str. 68
Tabulka č. 8 technické údaje stroje Aquacut 6001	str. 71
Tabulka č. 9 technické údaje stroje AGIE	str. 72
Tabulka č. 10 technické údaje stroje Makino	str. 73
Tabulka č. 11 porovnání jednotlivých metod dělení materiálů	str. 76
Tabulka č. 12 náklady na provoz dílčích metod pro dělení	str. 76
Tabulka č. 13 komparace metod řezání z hlediska měrné práce, úběru, příkonu	str. 78
Tabulka č. 14.: využití pokrokových metod u těžkozpracovatelných materiálů	str. 79
Tabulka č. 15.: komparace pokrokových metod ze společnosti JOSA s.r.o. a Českobudějovické společnosti	str. 80

PŘÍLOHY

Seznam příloh:

- Příloha č. 1 Zadání diplomové práce
- Příloha č. 2 Drátová řezačka MAKINO EU64
- Příloha č. 3 Eletroerozivní hloubička AGIE compact
- Příloha č. 4 Ukázka výrobku po laserovém řezání ve dřevě
- Příloha č. 5 Ukázka výrobku po laserovém řezání - nevhodný materiál
- Příloha č. 6 ukázka na odpadní části výrobku tečného nájezdu a výjezdu u laserového paprsku
- Příloha č. 7 Povrch po laserovém řezání na straně odpadu
- Příloha č. 8 Ukázka na odpadní části výrobku tečného nájezdu a výjezdu u vodního paprsku
- Příloha č. 9 Ukázka výrobku z hliníku po řezání vodním paprskem
- Příloha č. 10 Seznam použitých symbolů a zkratek
- Příloha č. 11 Seznam vzorců

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Fakulta pedagogická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jana JANOVÁ**
Osobní číslo: **P14876**
Studijní program: **N7503 Učitelství pro základní školy**
Studijní obory: **Učitelství fyziky pro 2. stupeň základních škol**
Učitelství technické výchovy pro 2. stupeň základních škol
Název tématu: **Pokrokové metody dělení materiálů se zaměřením na laser, vodní paprsek, elektroerosivní řezání drátem a hloubení**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované fyziky a techniky**

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

1. Sama vyhledejte novou vhodnou literaturu k danému tématu
2. Ve vhodné aktuální literatuře se detailně seznamte s pokrokovými způsoby dělení materiálů se zaměřením na laser, vodní paprsek, elektroerosivní řezání a hloubení drátem
3. Proveďte souhrn z rešerší z prostudované literatury, přehledně a utřídte poznatky týkající se technologií dělení materiálů
4. Zaměřte se zejména na laser, vodní paprsek, elektroerosivní hloubení a řezání drátem ve firmách na Českobudějovicku
5. V úvodu práce proveďte rozbor základních pojmů z oblasti pokrokového dělení materiálů
6. Vysvětlete význam těchto technologií a popište pracovní postupy v pokrokovém dělení materiálů
7. Proveďte komparaci rozdílů mezi technologiemi pokrokového dělení materiálů,
8. Proveďte přehled a rozdělení a popis strojů pro pokrokové dělení materiálů
9. Vypracujte srozumitelný metodický text pro výklad dělení materiálů těmito technologiemi, se zaměřením na laser, vodní paprsek, elektroerosivní řezání drátem a hloubení
10. Metodický text po rozsahové i obsahové stránce vypracujte tak, aby byl dobře použitelný při výuce daného téma na PF a vybraných technicky zaměřených SŠ
11. Vypracujte prezentaci práce v PowerPoint, kterou použijete při obhajobě práce

Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **60-80 stran včetně příloh**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Odborná literatura není předepisována: Schopnost orientace v odborné literatuře a vhodnost jejího výběru jsou jedním z kritérií hodnocení splnění zadané práce.

Vedoucí diplomové práce: **PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.**
Katedra aplikované fyziky a techniky

Datum zadání diplomové práce: **4. května 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **30. dubna 2016**



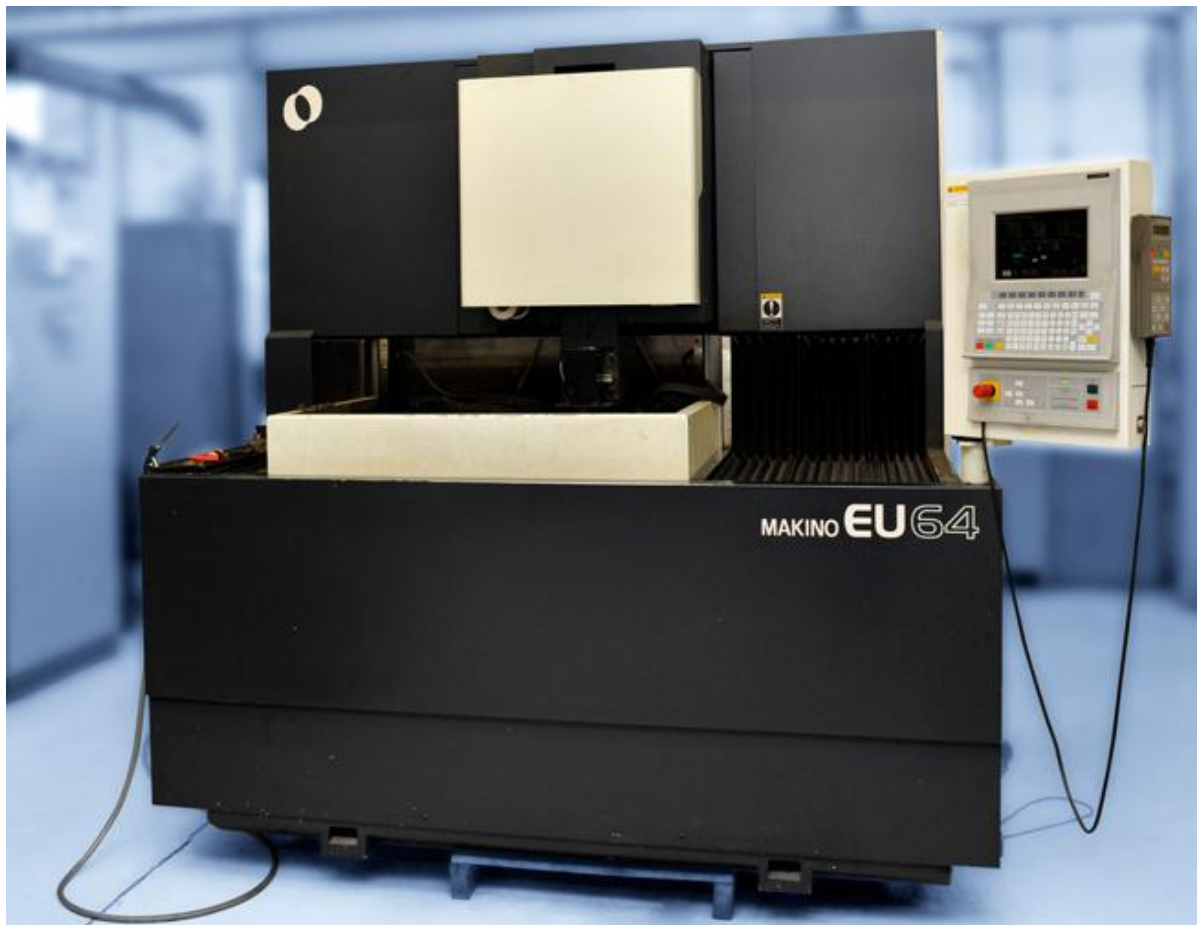
Mgr. Michal Vančura, Ph.D.
děkan



doc. PaedDr. Jiří Tesař, Ph.D.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 4. května 2015

Příloha č. 2.: Drátová řezačka MAKINO EU64



Příloha č. 3. : Elektroerozivní hloubička AGIE compact



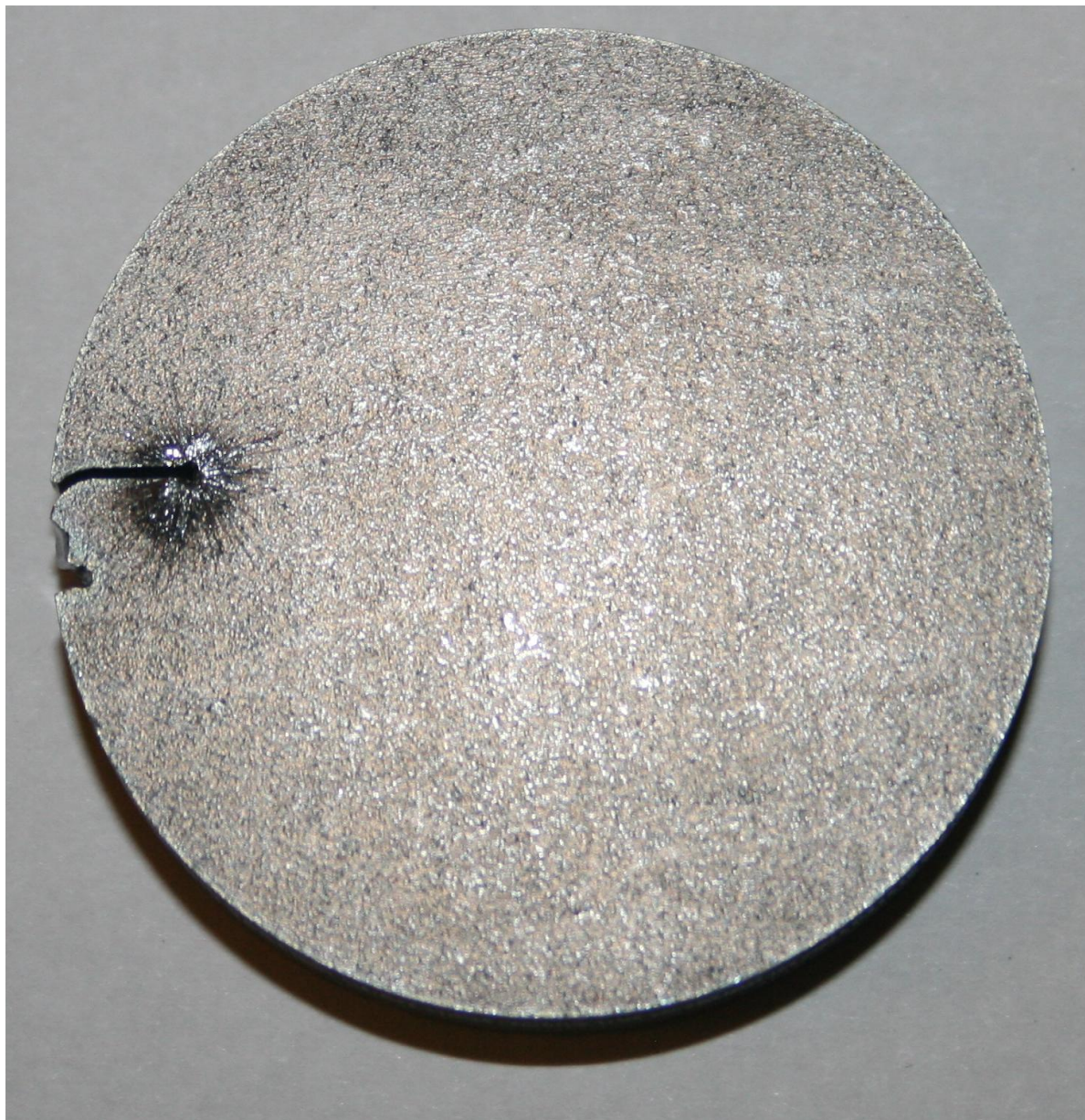
Příloha č. 4.: Ukázka výrobku po laserovém řezání ve dřevě



Příloha č. 5 ukázka výrobku po laserovém řezání - nevhodný materiál, došlo zde k tepelné korozi



Příloha č. 6.: ukázka na odpadní části výrobku tečného nájezdu a výjezdu u laserového paprsku



Příloha č. 7.: povrch po laserovém řezání na straně odpadu



Příloha č. 8.: ukázka na odpadní části výrobku tečného nájezdu a výjezdu u vodního paprsku



ukázka výrobku rohatky k ozubené západce po řezání vodním paprskem s abrazivem, zde je názorně vidět váznutí paprsku, striace.



Příloha č. 9.: Ukázka výrobku z hliníku po řezání vodním paprskem



Příloha č.10.: Seznam použitých symbolů a zkratk

- LBM - Laser beam Machining (obrábění paprskem laseru)
- WJM - Water Jet Machining (obrábění paprskem vody)
- AWJ - Abrasive Water Jet (obrábění pomocí abrazivních částic)
- EDM -Elektro Discharge Machining (elektroerozivní metody obrábění)
- MNO - Nekonvenční metody obrábění
- CNC - Computerized Numerical Control (řízené stroje)
- It systém - Informační technologie
- 2D - Dvourozměrný prostor
- 4D - Čtyřrozměrný prostor
- CAD - Computer Aided Design.
- CAM - Computer Aided Manufacturing
- NC - Numerical Control
- WEDM - Wire Electrical Discharge Machining.
- ISO - International Organization for Standardization
(Mezinárodní organizace pro normalizaci)

Příloha č. 11.: Seznam vzorců

Vzorec č. 1.: Rovnice spontánní emise	str. 19
vzorec č. 2.: Rovnice pro absorpci záření	str. 20
vzorec č. 3.: Pascalův zákon	str. 49
vzorec č. 4.: Pro výpočet nákladů stroje	str. 77