

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ  
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**BRNO 2017**

**MARTIN BURIAN**



**Nekonvenční způsoby obrábění strojních součástí**  
Bakalářská práce

*Vedoucí práce:*  
Ing. Jiří Votava, Ph.D.

*Vypracoval:*  
Martin Burian



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Zpracovatel : **Martin Burian**  
Studijní program: Zemědělská specializace  
Obor: Provoz techniky  
Název tématu: **Nekonvenční způsoby obrábění strojních součástí**  
Rozsah práce: 30-40 stran

Zásady pro vypracování:

1. Systematicky rozdělte nekonvenční technologie používané ve strojírenství.
2. Porovnejte výhody a nevýhody jednotlivých metod oproti klasickému obrábění.
3. Zaměřte se na vyhodnocení přesnosti a produktivity práce v závislosti na kvalitě povrchu.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Nekonvenční způsoby obrábění strojních součástí“ vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....  
podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Votavovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost při konzultacích, které mi pomohly s vypracováním bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá souhrnem a charakteristikou nekonvenčních způsobů obrábění (používaných při výrobě strojních součástí), jako jsou chemické a elektrochemické obrábění, elektroerozivní obrábění, obrábění ultrazvukem, obrábění laserem, plazmou, nebo vodním paprskem. První část zahrnuje systematické rozdělení a charakteristiku jednotlivých metod. U každé metody je popsán princip obrábění, a rovněž podmínky důležité pro uskutečnění dané obráběcí technologie. Následující část je věnována jejich hlavním výhodám a nevýhodám, včetně typických oblastí použití jednotlivých nekonvenčních technologií v technické praxi. V závěrečné kapitole se nachází porovnání jednotlivých metod v závislosti na kvalitě povrchu – podle dosahované přesnosti rozměrů a drsnosti povrchu (parametru Ra).

**Klíčová slova:** Nekonvenční metody obrábění, elektroerozivní obrábění, laser, obrábění ultrazvukem, vodní paprsek.

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the summary and characteristics of the unconventional machining methods (used in the manufacture of machinery parts), such as chemical and electrochemical machining, electric discharge machining, ultrasonic machining, laser, plasma, or waterjet machining. The first section summarizes systematic distribution and characteristics of each methods. In each mentioned method, there is also a description of its machining principle and important conditions for the realization of the machining technology. The following section is devoted to their main advantages and disadvantages, including the typical fields of application of different unconventional technologies in technical practice. In the final chapter, there is a comparison of different methods depending on the surface quality – by achieved dimensional accuracy and surface roughness (Ra parameter).

**Key words:** Unconventional methods of machining, electric discharge machining, laser, ultrasonic machining, waterjet.

## OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce.....	10
3	Nekonvenční způsoby obrábění.....	11
3.1	Elektroerozivní obrábění.....	12
3.1.1	Princip metody.....	12
3.1.2	Nástrojové elektrody.....	14
3.1.3	Dielektrikum.....	16
3.1.4	Jednotlivé technologie elektroerozivního obrábění.....	17
3.1.4.1	Elektrojiskrové hloubení.....	17
3.1.4.2	Elektrojiskrové řezání.....	18
3.1.4.3	Elektrokontaktní obrábění.....	20
3.1.4.4	Anodomechanické obrábění.....	21
3.2	Obrábění laserovým paprskem.....	22
3.2.1	Konstrukce laseru.....	23
3.2.2	Druhy laserů.....	24
3.2.3	Řezání laserem.....	24
3.2.4	Vrtání laserem.....	25
3.3	Obrábění elektronovým paprskem.....	26
3.4	Obrábění iontovým paprskem.....	27
3.5	Obrábění paprskem plazmy.....	28
3.6	Chemické obrábění.....	30
3.6.1	Chemické rozměrové leptání.....	30
3.6.2	Chemické prostřihování.....	31
3.6.3	Chemické leštění.....	31
3.7	Elektrochemické obrábění.....	32

3.7.1	Elektrochemické obrábění v proudícím elektrolytu.....	33
3.7.2	Elektrochemické obrábění rotující elektrodou.....	34
3.7.3	Elektrochemické leštění.....	35
3.7.4	Elektrochemické odstraňování ostřin (otřepů).....	35
3.8	Obrábění ultrazvukem.....	36
3.9	Obrábění vodním paprskem.....	37
3.10	Obrábění proudem brusiva.....	39
4	Výhody a nevýhody jednotlivých metod.....	40
4.1	Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění.....	40
4.2	Výhody a nevýhody obrábění paprskem plazmy.....	40
4.3	Výhody a nevýhody obrábění elektronovým paprskem.....	41
4.4	Výhody a nevýhody obrábění iontovým paprskem.....	41
4.5	Výhody a nevýhody obrábění laserovým paprskem.....	42
4.6	Výhody a nevýhody chemického obrábění.....	42
4.7	Výhody a nevýhody elektrochemického obrábění.....	43
4.8	Výhody a nevýhody obrábění ultrazvukem.....	43
4.9	Výhody a nevýhody obrábění vodním paprskem.....	44
4.10	Výhody a nevýhody obrábění proudem brusiva.....	45
5	Porovnání jednotlivých metod v závislosti na kvalitě povrchu.....	45
6	Závěr.....	48
7	Seznam použité literatury.....	49
8	Seznam symbolů a zkratk.....	51
9	Seznam obrázků a tabulek.....	52



# 1 ÚVOD

Pod pojmem nekonvenční způsoby obrábění si mnoho lidí může představit něco neznámého a nového, avšak jedná se o metody běžně využívané již řadu let. Historie těchto technologií se začala psát již v 50. letech minulého století, ale k jejich výraznějšímu nástupu do průmyslu došlo zhruba o 30 let později. Důvodem jejich zavádění byly (stejně jako u většiny jiných technologií) rostoucí požadavky strojírenského průmyslu, zejména vývoj a používání nových materiálů (o velké pevnosti, tvrdosti, či houževnatosti), těžkoobrobitelných konvenčními metodami, a dále vyšší nároky na hospodárnost, přesnost a rychlost výroby.

Nekonvenční způsoby obrábění se zdokonalují spolu s rozvojem CNC strojů, jejichž řídicí systémy značně rozšiřují oblast aplikace nekonvenčních způsobů obrábění (řídicí systémy ovládají především úběr materiálu z obrobku). Tyto stroje umožňují díky přesnému naprogramování výrobu přesných a tvarově složitých součástí, a rovněž zvyšují produktivitu i bezpečnost práce.

Nekonvenční metody obrábění se od klasických způsobů obrábění liší zejména tím, že nevyužívají klasických řezných nástrojů pro úběr materiálu, nýbrž využívají chemických nebo fyzikálních principů úběru materiálu, případně jejich kombinací. Při obrábění nekonvenčními způsoby navíc nedochází ke vzniku klasické třísky (jako např. u frézování nebo soustružení), neboť nedochází k silovému působení nástroje na obrobek, tak jako je tomu u konvenčních obráběcích technologií. Nekonvenční metody jsou rovněž označovány pojmem fyzikální metody, nebo také progresivní metody obrábění (méně často netradiční způsoby obrábění).

Zatímco u klasických způsobů třískového obrábění je obrobitelnost materiálu omezena mechanickými vlastnostmi (např. pevnost, tvrdost), u nekonvenčních způsobů tomu tak není – obrobitelnost je zde převážně limitována chemickým složením materiálu a jeho fyzikálními vlastnostmi (elektrická vodivost, tepelná vodivost, teplota tavení, apod.). Tato skutečnost je významnou výhodou těchto způsobů, proto se využívají k obrábění těžkoobrobitelných materiálů, které lze jen velmi těžko (či vůbec) obrobit konvenčními metodami. Mezi v praxi často používané těžkoobrobitelné materiály lze zařadit zejména slituté karbidy, titanové slitiny, keramiku, nebo kompozity. Právě nutnost obrábět a dělit vysoce pevné materiály (především v leteckém a kosmickém průmyslu) byla hlavním důvodem zavádění nekonvenčních technologií do strojírenské výroby.

## **2 CÍL PRÁCE**

Cílem bakalářské práce je rešeršní zpracování tématu nekonvenčních způsobů obrábění, využívaných pro výrobu součástí ve strojírenství. Práce je rozdělena do tří základních kapitol. V první kapitole jsou jednotlivé nekonvenční metody systematicky rozděleny, u každé z nich je popsán obráběcí princip a také podmínky potřebné pro danou metodu obrábění. Druhá kapitola se zabývá shrnutím výhod a nevýhod jednotlivých metod, a použitím jednotlivých nekonvenčních způsobů v technické praxi. Cílem závěrečné kapitoly je porovnání všech uvedených metod v závislosti na kvalitě povrchu, a to za pomoci přesnosti rozměrů, a parametru Ra (tedy dosahovaných hodnot drsnosti povrchu).

### 3 NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění (NMO) představují soubor technologií, které nevyužívají pro obrábění a dělení materiálu klasických nástrojů, nýbrž procesů zakládajících se na přírodních zákonitostech o erozi materiálu. (PÍŠKA a kol., 2009)

Lépe výstižný je pojem fyzikální metody nebo také progresivní metody obrábění. (SADÍLEK, 2009)

Fyzikální technologie obrábění jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se většinou o bezsilové působení nástroje na obráběný materiál, bez tvoření klasických třísek, které vznikají při obrábění řeznými nástroji. (ŘASA a kol., 2001)

U těchto metod se nepoužívá standardní řezný nástroj, u kterého je možné definovat pracovní části (čelo, hřbet, břít, ostří, atd.) nebo nástrojové úhly. Při obrábění se netvoří tříska (ve smyslu definice podle standardních metod, např. soustružení, frézování, atd.), protože k úběru obráběného materiálu dochází převážně účinky tepelnými, chemickými, případně i mechanickými (převážně abrazivními) – nebo jejich vzájemnou kombinací. (HUMÁR, 2005)

Tab. 1 - Přehled nekonvenčních metod obrábění (MIČIETOVÁ, 2001)

Procesy	Metody	Označení
Mechanické procesy	Ultrazvukové obrábění	USM
	Obrábění vodním paprskem	WJM
	Obrábění proudem brusiva	AJM
Chemické procesy	Chemické obrábění	CHM
Elektrochemické procesy	Elektrochemické obrábění	ECM
Termoelektrické procesy (elektrotepelné)	Elektroerozivní obrábění	EDM
	Obrábění laserovým paprskem	LBM
	Obrábění elektronovým paprskem	EBM
	Obrábění iontovým paprskem	IBM
	Obrábění paprskem plazmy	PBM

Nekonvenční metody obrábění se rozčleňují na procesy (podle použité energie a způsobu úběru materiálu – viz. Tab. 1, str. 11):

- mechanické
- chemické
- elektrochemické
- termoelektrické (MIČIETOVÁ, 2001)

Kromě skupiny mechanických procesů je u tří zbývajících skupin vzhledem k principu úběru dána obrobitelnost materiálu:

- tepelnou vodivostí
- teplotou tání
- elektrickou vodivostí
- odolností proti elektrické erozi
- odolností proti chemické erozi
- vzájemnou vazbou atomů a molekul

U fyzikálních technologií obrábění těchto skupin tedy nezávisí obrobitelnost materiálu na jeho mechanických vlastnostech (tj. na pevnosti, tvrdosti, apod.), jako je tomu u klasického třískového obrábění a u skupiny mechanických procesů. (ŘASA, 2001)

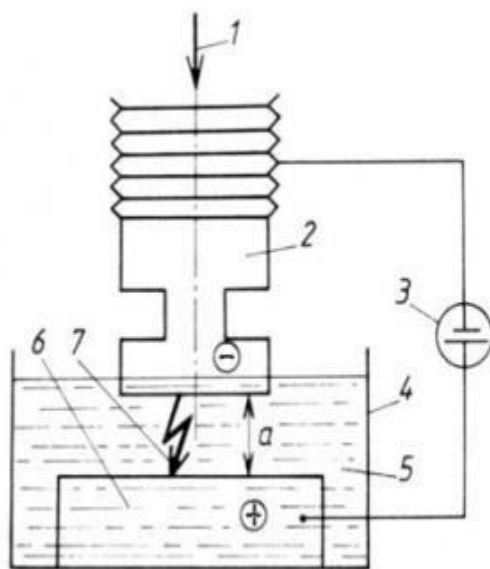
## **3.1 Elektroerozivní obrábění**

### **3.1.1 Princip metody**

Elektroerozivní obrábění je elektrotepelný proces, u kterého se dosahuje úběr materiálu elektrickými výboji mezi katodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a anodou (nejčastěji ji tvoří obrobek) ponořenými do tekutého dielektrika (viz. Obr. 1, str. 13), což je většinou kapalina s vysokým elektrickým odporem. Základem úběru materiálu je elektroeroze. Vlivem vysoké koncentrace energie ( $10^5$  až  $10^7$  W·mm<sup>-2</sup>) materiál taje a odpařuje se. Je nutné zdůraznit, že elektroerozivním obráběním lze opracovávat pouze elektricky vodivé materiály. (ŘASA, 2001)

Elektroerozivní obrábění zahrnuje řadu metod, které mají jeden společný znak – úběr materiálu je vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými, popř. obloukovými výboji. (KOCMAN a kol., 2001)

Nástrojová elektroda je vytvarována do požadovaného finálního tvaru obrobku.



1 – směr posuvu nástrojové elektrody,  
2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor,  
4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum,  
6 – obrobek, 7 – elektrický výboj

Obr. 1 - Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění (ŘASA, 2001)

Vznik výboje mezi elektrodami je vyvolán přivedením napětí na elektrody. Výše tohoto napětí závisí především na následujících faktorech:

- vzdálenosti mezi elektrodami
- vodivosti dielektrické kapaliny
- znečištění dielektrika (BARCAL, 1989)

Cílem elektroerozivního obrábění je dosáhnout opakovanými výboji na jedné elektrodě (obrobku) maximálního úběru materiálu a na druhé elektrodě (nástroji) naopak, co nejmenšího úbytku. (MÁDL a kol., 2000)

Fyzikální proces úběru materiálu má velmi komplexní průběh. Obrábění je založeno na principu dvou elektrod (musí být z elektricky vodivého materiálu), oddělených jiskrovou mezerou velikosti 0,01 až 0,50 mm, ponořených v dielektrické kapalině. Celkový proces odebrání materiálu se skládá ze střídajících se impulzních výbojů, statisticky rozložených po celé aktivní ploše nástroje. Při každém výboji dojde k narušení materiálu, na obrobku i elektrodě se vytvoří kráter. Doba vypnutí (přerušování toku elektrického proudu)

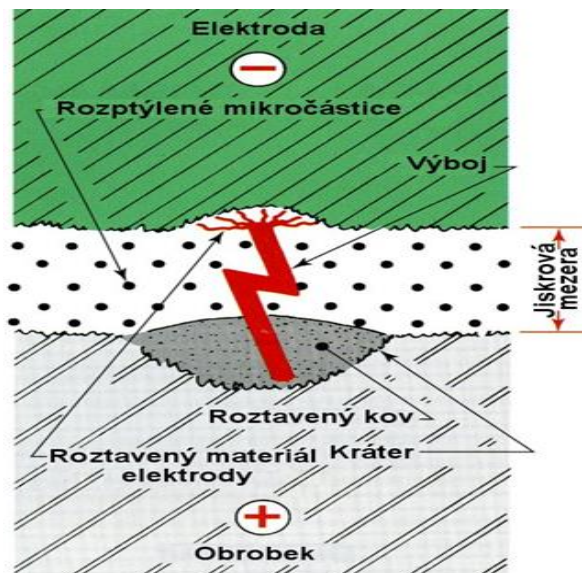
umožní, aby proudící kapalina odplavila z místa narušení všechny vzniklé mikročástice. (HUMÁR, 2005)

Čas přerušení výboje musí být delší než čas potřebný k deionizaci kapaliny, aby bylo zabráněno vzniku trvalého výboje a nechtěnému úběru materiálu pouze v jednom místě. (PÍŠKA a kol., 2009)

Oddělení materiálu probíhá tak, že stejnosměrný proud je dodáván do pracovního okruhu v pulzech, které mají čtvercový průběh. Přitom každý pulz vytváří jiskru. Narušení materiálu nastává v místech vzniku výboje mezi obrobkem a elektrodou. Když je elektroda vzdálena od obrobku, má napětí obvykle hodnotu 100 V. Když se elektroda přiblíží k obrobku, nastane ionizace oddělující kapaliny. Když nastane výboj, napětí klesne na nižší hodnotu. To se stane při vzdálenosti elektrod 0,01 až 0,4 mm. (KOCMAN a kol., 2001)

V místě výboje vzniká teplota 3000 až 12000 °C, dochází k tání a odpařování materiálu elektrod. Současně se vypařuje dielektrikum, vznikají bubliny, které praskají a vzniklé dynamické síly odebírají v místě výboje z obrobku částičky materiálu. (ŘASA a kol., 2001)

Proces znázorňující výboje mezi oběma elektrodami se nachází na Obr. 2.



Obr. 2 - Výboje mezi nástrojem a obrobkem (HUMÁR, 2005)

### 3.1.2 Nástrojové elektrody

Při řešení nástrojové elektrody je třeba vzít v úvahu její materiál, výrobu a opotřebování během daného procesu. Materiál elektrody má mít vysokou elektrickou vodivost,

dobrou obrobiteľnosť, vysoký bod tavení a dostatečnou pevnosť, aby sa pri vlastnej práci nedeformoval. (KOCMAN a kol., 2001)

Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění jsou uvedeny v Tab. 2.

Materiál nástrojové elektrody se volí podle materiálu obrobku, použitého stroje a relativního objemového opotřebení nástrojové elektrody. Výběru nástrojové elektrody musí být věnována velká péče. (ŘASA a kol., 2001)

Tab. 2 - Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění  
(KOCMAN a kol., 2001)

Materiál	Charakteristika
grafit	Nejčastěji používaný materiál, je dobře obrobiteľný a vykazuje dobré charakteristiky opotřebení. Nevýhodou je znečistení stroje.
měď	Má dobrou elektrickou vodivosť a příznivé charakteristiky opotřebení. Tato elektroda nepracuje tak dobře jako grafit nebo mosaz. Je výhodná pro obrábění karbidu wolframu.
měď – wolfram a stříbro – Wolfram	Jsou nákladné materiály. Používají se pro výrobu hlubokých drážek. Nejedná se o pravé slitiny. Wolfram je lisován a spékán s mědí nebo stříbrem. Tento materiál nemůže být tvarován po slinování, protože je velmi křehký.
měď – grafit	Jedná se o grafit s mědí. Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je výhodný pro obrábění karbidu wolframu.
mosaz	Relativně levný a snadno obrobiteľný materiál. Z hlediska opotřebení není výhodný.
wolfram	Pro výrobu malých děr, tj. menších než 0,2 mm.

Velikost elektrody musí být menší o vyjiskřovací mezeru než požadovaná dutina, avšak až v době dokončení operace, tedy při určitém opotřebení elektrody. U elektrod pro dokončování se počítá s menším proudem i s menší mezerou než při počátečním hrubém vyjiskřování. (DILLINGER, 2007)

K základním metodám výroby nástrojových elektrod patří obrábění, lisování, lití, prášková metalurgie, stříkání a galvanoplastika. Na opotřebení elektrody má největší vliv teplota tavení použitého materiálu, hodnotí se opotřebením boků, rohů a konce elektrody. Nejvýznamnější kritérium, které určuje trvanlivost elektrody a vymezuje nutnost její úpravy, je opotřebením rohů. (HUMÁR, 2005)

### 3.1.3 Dielektrikum

Pracovní prostředí (dielektrikum) působí jako izolátor mezi elektrodami, odvádí teplo a odebrané částice materiálu z pracovního prostoru. (MÁDL a kol., 2000)

Dielektrická kapalina má důležitý vliv na celý erozivní proces, a proto je potřebné věnovat pozornost její volbě. Na kapalinu jsou kladeny následující požadavky:

- musí zabezpečovat potřebnou vzdálenost mezi elektrodami, aby přechod proudu mezi oběma elektrodami vyústil do výboje
- musí mít malou viskozitu a dobrou smáčivost, aby se rychle obnovovala izolace po výboji
- musí být chemicky neutrální, aby zamezovala vzniku koroze
- musí mít dostatečně vysokou teplotu hoření, aby nedocházelo ke vzplanutí
- musí zabezpečovat chlazení elektrod a odebírání mikročástic třísky
- při práci nesmí vznikat jedovaté výpary a nepříjemný zápach
- nesmí podléhat chemickým změnám, musí být stálá, lehce vyrobitelná a levná
- musí zabezpečovat dobrý odvod (odplavení) erozních zplodin ze zóny úběru materiálu (MAŇKOVÁ, 2000)

Jako dielektrika se používají strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda a speciální dielektrika dodávaná výrobcem strojů. (ŘASA a kol., 2001)



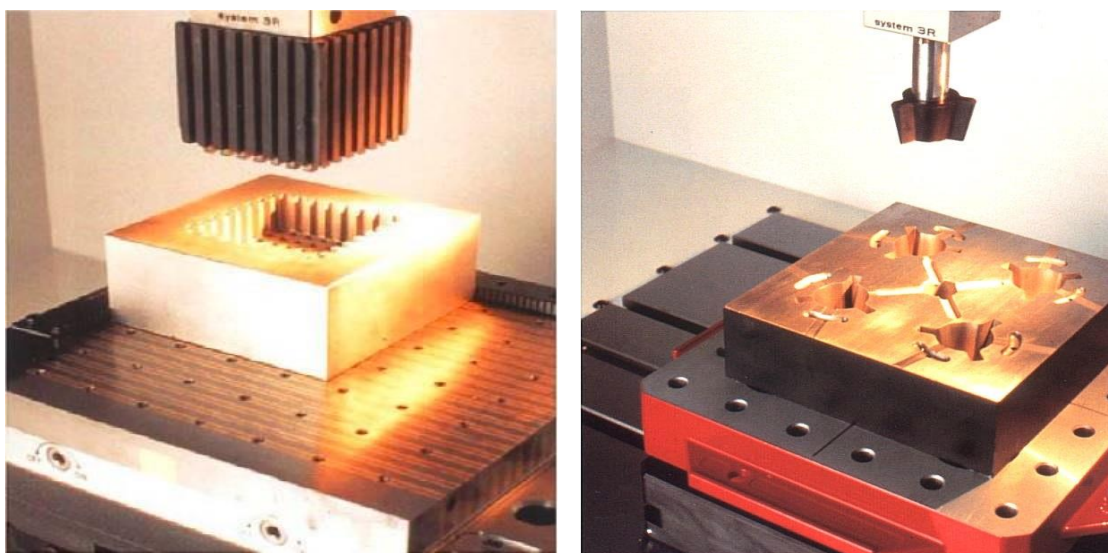
### 3.1.4 Jednotlivé technologie elektroerozivního obrábění

#### 3.1.4.1 Elektrojiskrové hloubení

Elektrojiskrové hloubení je základní typ elektroerozivních metod obrábění a jednou z nejrozšířenějších metod. (SADÍLEK, 2009)

Elektroerozivním hloubením se vytváří pomocí elektrody v obrobku dutina požadovaného tvaru. Tvar elektrody odpovídá buď úplně (při pohybu v jedné ose) nebo jen částečně (při CNC řízení ve více osách) tvaru vytvářené dutiny. (DILLINGER, 2007)

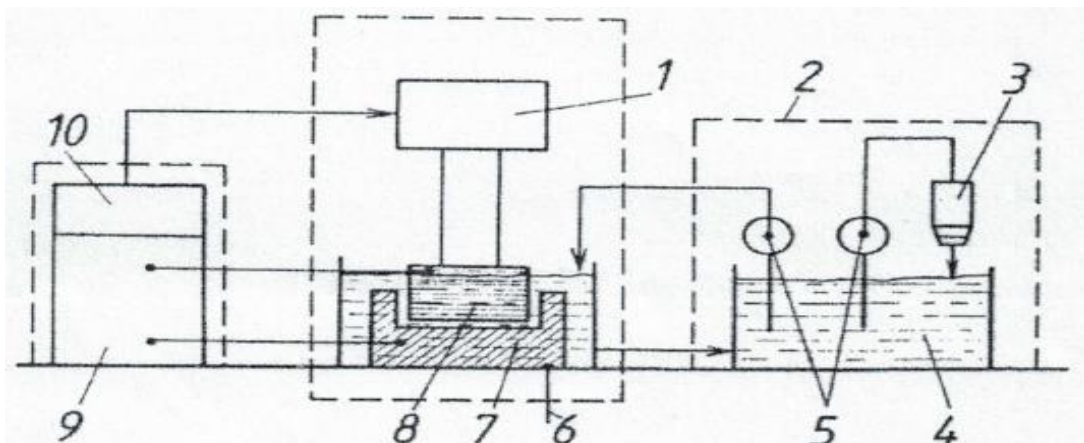
Nástrojová elektroda se při elektrojiskrovém hloubení automaticky posouvá proti obrobku, řídicí systém musí přitom udržovat konstantní velikost jiskrové mezery. Elektroda má negativní tvar obrobeneé plochy, který je prostřednictvím výbojů kopírován do obrobku (viz. Obr. 3). (HUMÁR, 2005)



Obr. 3 - Elektrojiskrové hloubení při pohybu v jedné ose (HUMÁR, 2005)

Výrazné zlepšení možností elektrojiskrového obrábění bylo dosaženo zavedením tzv. vychylovačů elektrod, které umožní vychylování elektrod do všech směrů. Toto přídatné zařízení umožňuje zhotovování složitějších tvarů pomocí jednoduchých elektrod. (KOCMAN a kol., 2001)

Základní části elektroerozivního stroje pro hloubení dutin zápustek a forem ukazuje schematicky Obr. 4, str. 18. U moderních strojů jsou všechny činnosti řízeny CNC řídicím systémem. (ŘASA a kol., 2001)



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

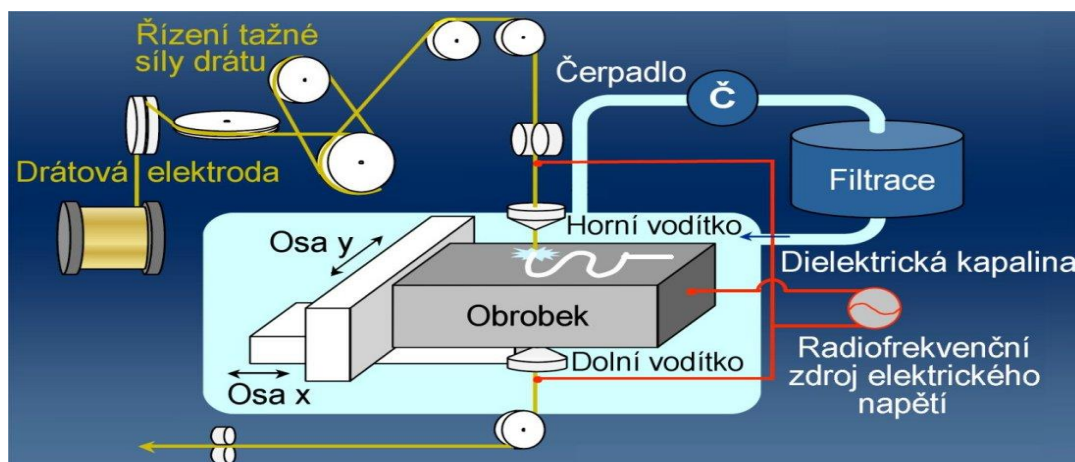
Obr. 4 - Schéma stroje pro elektrojiskrové hloubení (SADÍLEK, 2009)

### 3.1.4.2 Elektrojiskrové řezání

Elektrojiskrové řezání je metoda elektrojiskrového obrábění a vyznačuje se minimální šířkou řezu. Nástrojovou elektrodou je tenký drát, který se odvíjí (kvůli zamezení opotřebení) a přes vodící zařízení prochází místem řezu. (SADÍLEK, 2009)

Jako materiál se na drátové elektrody používá měď, na větší průřezy mosaz a pro velmi jemné řezy, realizované dráty průměru 0,03 až 0,07 mm, se doporučuje s ohledem na mechanickou pevnost použít molybden. (BARCAL, 1989)

Princip metody je znázorněn na Obr. 5.



Obr. 5 - Princip elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou (HUMÁR, 2005)

Nástrojová elektroda tvořená drátem je nástroj, který může odebírat materiál v každém směru, což umožňuje ve spojení se šesti osami souřadnic řízenými CNC řídicím systémem obrábět přesně i velmi složité tvary (viz. Obr. 6). Způsob zapojení nástrojové elektrody a obrobku do elektrického obvodu je dán polaritou a typem výbojů. U moderních strojů se používá tzv. přímá polarita, tj. nástrojová elektroda jako katoda a obrobek jako anoda. (ŘASA a kol., 2001)

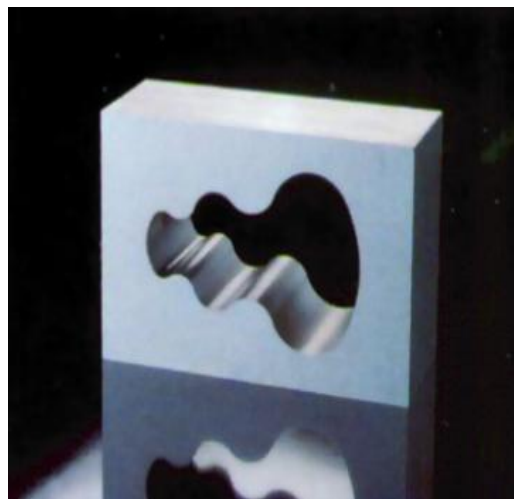
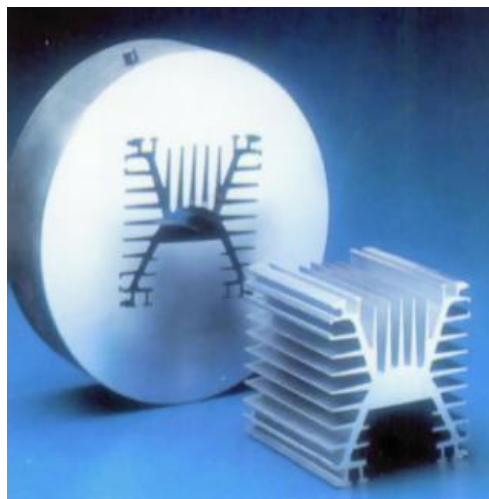
Drát je napínán konstantní tahovou silou (předpětí ovlivňuje přesnost řezu), prostor mezi obrobkem a drátem je zaplněn dielektrickou kapalinou. (HUMÁR, 2005)

Při řezání se jako dielektrikum používá destilovaná (deionizovaná) voda. Řezání začíná na okraji nebo ve vyvrtaném otvoru. (DILLINGER, 2007)

Pohyb suportů stroje je řízen CNC systémem, který zajišťuje přesnost odpovídající nástrojařským pracím. Stroje jsou rovněž vybaveny CNC řízeným nakláněním drátové elektrody v rozsahu 0 až 30°, což umožňuje vyřezávání kónických tvarů. (KOCMAN a kol., 2001)

V průběhu řezání jsou na nástrojovou elektrodu kladeny specifické požadavky:

- vysoká elektrická vodivost
- dostatečná mechanická pevnost
- úzká tolerance rozměrů (průměr) a tvaru (kruhovitost) (MÁDL a kol., 2000)



Obr. 6 - Příklady výrobků - řezání drátovou elektrodou (<http://mmspektrum.com>)

### 3.1.4.3 Elektrokontaktní obrábění

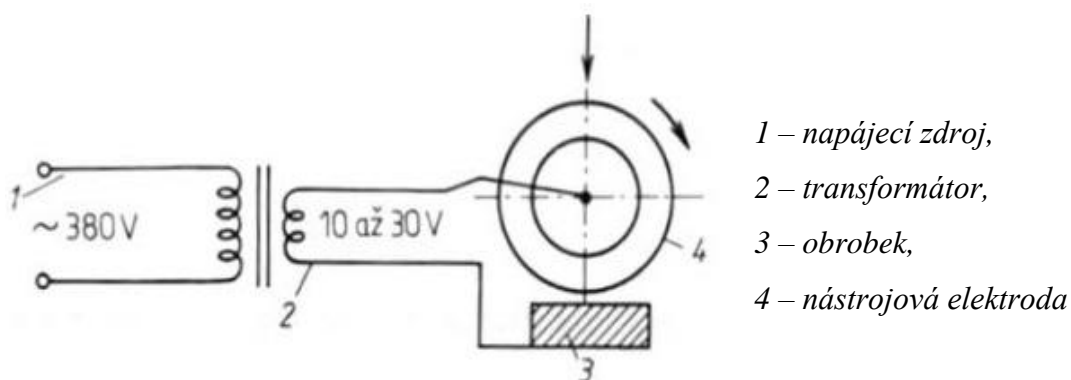
Elektrokontaktní obrábění je zvláštní případ elektroerozivního obrábění, při kterém dochází k úběru materiálu elektrickými nestacionárními kontaktními obloukovými výboji. Doba trvání výboje je až 0,01 s. Používá se transformátor o výkonu 10 až 250 kW při frekvenci 50 až 500 Hz. (ŘASA a kol., 2001)

Elektrokontaktní obrábění je založené na principu odporového odtavování materiálu stykem nástrojové elektrody s povrchem obrobku. (MIČIETOVÁ, 2001)

Tato metoda probíhá při použití střídavého proudu o nízkém napětí (25 V, někdy i více). Při přiblížení nástroje k obrobku vzniká krátkodobý oblouk, v místech přímého kontaktu se materiál obrobku začíná tavit, roste přechodový odpor a uvolňuje se velké množství tepla. K ochlazování nástroje slouží proud kapaliny (vody) nebo stlačeného vzduchu, který současně odstraňuje z místa řezu ztuhlé částice obráběného materiálu. (HUMÁR, 2005)

Pro zamezení svaření elektrod je nutné, aby se proti sobě elektrody pohybovaly. Děje se tak rotačním pohybem nástroje – elektrody. Tímto vzájemným pohybem ploch elektrod nastává přerušování kontaktů a na přerušovaných místech se vytvářejí elektrické oblouky. Současně vznikají tímto pohybem na dalších místech kontakty a jejich přerušování nové oblouky. (SADÍLEK, 2009)

Na Obr. 7 se nachází principiální schéma stroje pro elektrokontaktní obrábění.

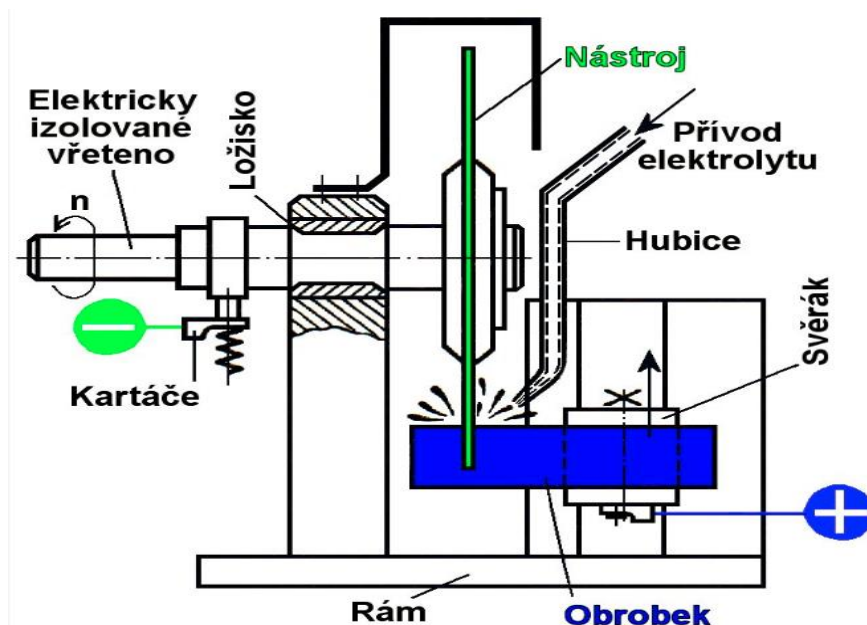


Obr. 7 - Princip stroje pro elektrokontaktní dělení materiálů (ŘASA a kol., 2001)

### 3.1.4.4 Anodomechanické obrábění

Z hlediska odebrání materiálu je anodomechanické obrábění na rozhraní elektroerozivního a elektrochemického obrábění. Zařazení do té které skupiny závisí zejména na energetických parametrech. Při použití vyšších napětí a větších proudových hodnot dochází k úběru materiálu elektrotermickým účinkem (elektroerozivní metoda), při použití nižších hodnot dochází k úběru elektrochemickým účinkem (elektrochemická metoda). Další složkou úběru je elektrochemické rozpouštění, protože jsou vytvořeny podmínky elektrolýzy. (KOCMAN a kol., 2001)

Zařízení na anodomechanické dělení materiálu má rám a na něm stojan s ložiskem, ve kterém je uloženo elektricky odizolované vřeteno nástroje. Nástroj je k vřetenu upevněn pomocí přírub a spolu s ním se otáčí tak, aby jeho obvodová rychlost dosahovala hodnot 9 až 12 m·s<sup>-1</sup>. Záporný pól elektrického zdroje je zapojen na nástroj, kladný pól na svěrák s upnutým obrobkem, svěrák je automaticky posouván proti nástroji. Elektrolyt (nejčastěji vodní sklo) je pomocí nastavitelné hubice přiváděn přímo do místa řezu. (HUMÁR, 2005)



Obr. 8 - Zařízení pro anodomechanické dělení materiálu (HUMÁR, 2005)

Proces probíhá při vysokých teplotách, přičemž roztavený kov je z místa obrábění odstraňován otáčejícím se nástrojem. Pracovní prostor je zaplaven kapalinou, která plní funkci izolátoru s chladicím účinkem. Výboj nastává v místě, kde nástroj svým otáčivým pohybem naruší izolační vrstvu. (KOCMAN a kol., 2001)

### 3.2 Obrábění laserovým paprskem

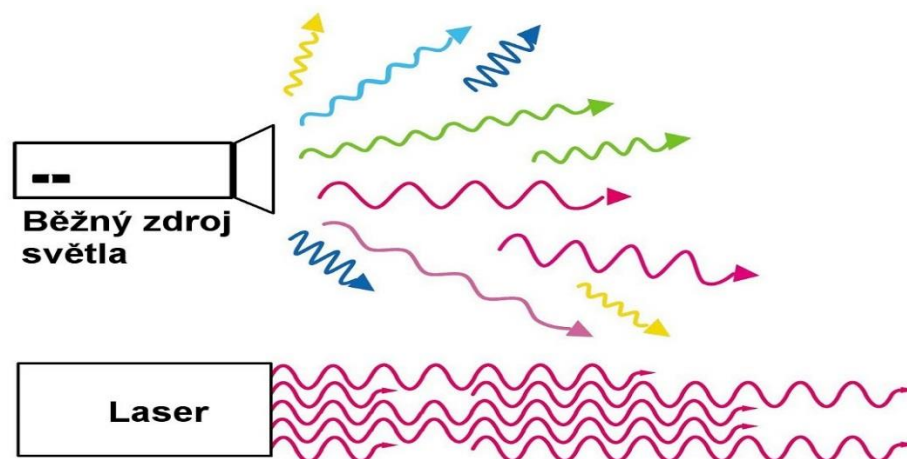
Obrábění a opracování materiálu laserem je založeno na přeměně světelné energie na tepelnou energii. Laser pracuje na principu indukované emise, tj. vynuceného záření. Záření je tvořeno malými částicemi, tzv. kvanty. Energie každého kvanta je úměrná kmitočtu. (ŘASA a kol., 2001)

Při laserovém obrábění dochází k odebírání materiálu účinkem úzkého paprsku silného monochromatického světla soustředěného na velmi malou plošku. V místě dopadu se energie světelného záření mění na energii tepelnou. Teplota, která se přitom vyvine, stačí k roztavení, popř. k odpaření materiálu obrobku. (KOCMAN a kol., 2001)

Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry, zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů (kvant elektromagnetického záření). (SADÍLEK, 2009)

Laser je tedy kvantový elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku, který má tyto základní vlastnosti:

- je vysoce monochromatický – světlo v laserovém paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku
- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence
- má minimální divergenci (rozbíhavost)
- má modální strukturu (v příčném průřezu paprsek vytváří buď jednoduchou stopu, nebo složitější obrazce)
- má vysokou výstupní intenzitu (MAŇKOVÁ, 2000)

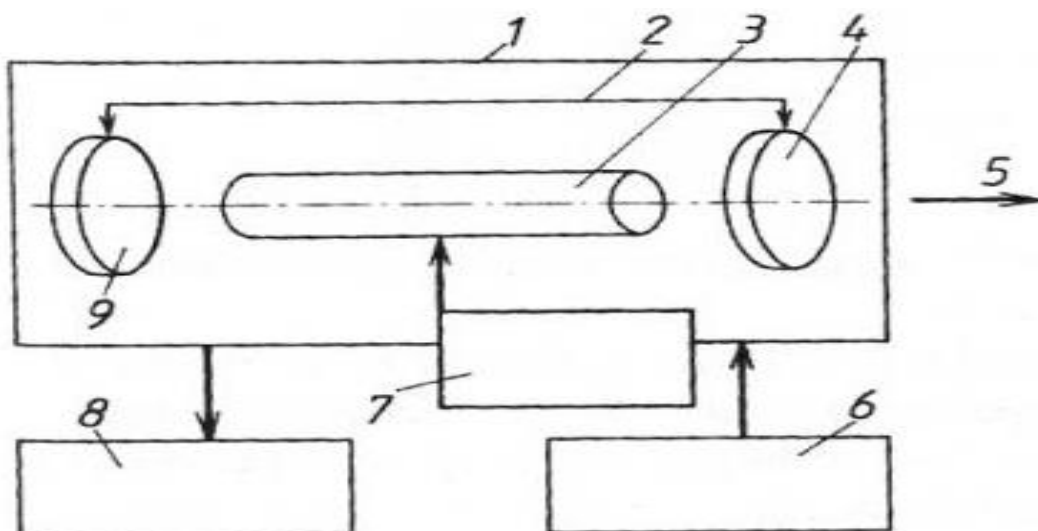


Obr. 9 - Záření běžného zdroje světla a laseru (HUMÁR, 2005)

### 3.2.1 Konstrukce laseru

Laserová hlavice obsahuje tzv. laserové medium (aktivní látku), které určuje vlnovou délku záření. Tato aktivní látka je směsí materiálů o vhodných energetických hladinách a může být pevného, plynného či kapalného skupenství. Laserové medium je uzavřeno v obalu z vhodného materiálu. Ten musí splňovat následující parametry – průhlednost a schopnost odvádět vzniklé teplo. Dále obsahuje rezonátor, což je optická soustava, která napomáhá usměrnění a zesílení vznikajícího záření. Je tvořen nejméně dvěma zrcadly, jejichž průměr a zakřivení určují divergenci (rozbíhavost) laserového paprsku, která je určována úhlem ve kterém se šíří. Další součástí hlavice je budicí zařízení. Způsob buzení je určen složením laserového media. Plynné medium je většinou buzeno elektrickým výbojem, pevné nejčastěji výbojkami nebo diodami. (PÍŠKA a kol., 2009)

Schéma zařízení pro obrábění laserem se nachází na Obr. 10.



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

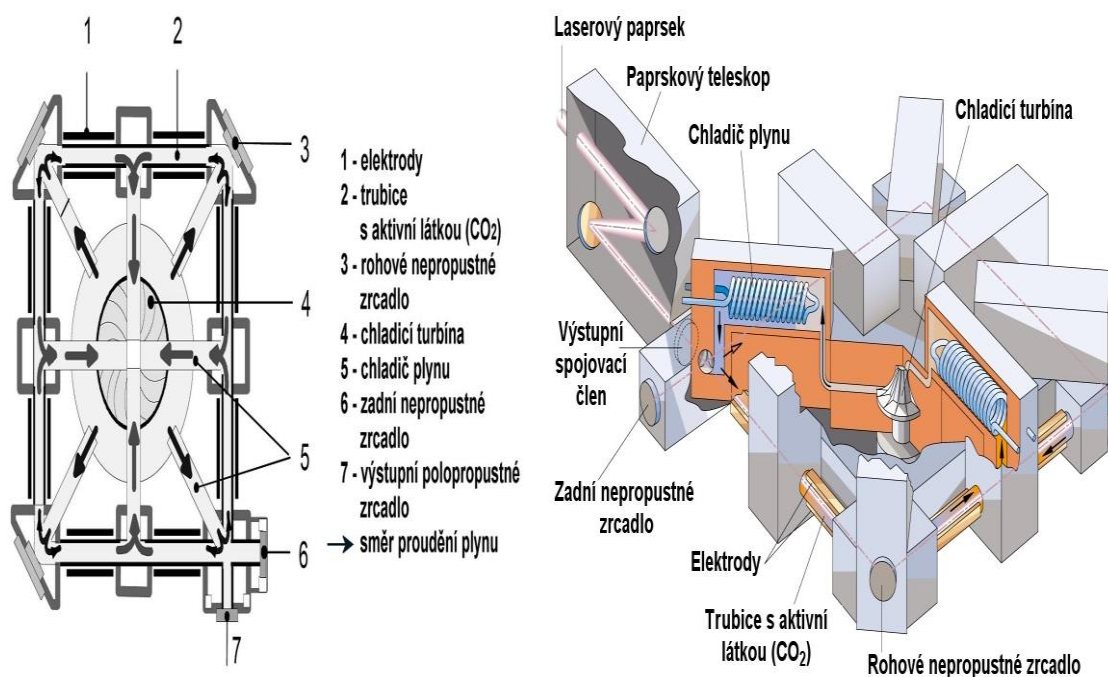
Obr. 10 - Schéma zařízení pro obrábění laserem (<http://mmspektrum.com>)

Chladicí zařízení odvádí nevyužitou energii, která se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve: vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). (ŘASA a kol., 2001)

### 3.2.2 Druhy laserů

Lasery mohou být klasifikovány dle různých hledisek, nejčastěji však podle laserového média:

- pevnolátkové – laserovým médiem je krystal vybroušený do tvaru válce, kotouče nebo hranolu, jehož čela jsou opticky vyleštěna. Pro technologické operace se převážně používá krystal Nd-YAG.
- plynové – laserovým médiem je směs plynů. Z technologických laserů mají největší význam CO<sub>2</sub> lasery.
- kapalinové – laserovým médiem jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin.
- polovodičové (ŘASA a kol., 2001)



Obr. 11 - Plynový laser - princip a schéma (HUMÁR, 2005)

### 3.2.3 Řezání laserem

Na řezání se nejvíce používají CO<sub>2</sub> lasery, většinou v kontinuálním režimu. Řezání (dělení) laserem je odstraňování materiálu postupným působením paprsku a proudu plynu. (MAŇKOVÁ, 2000).



Řezání může probíhat s využitím jednoho způsobu, nebo jejich kombinací:

- sublimační řezání – odstraňování materiálu především odpařováním.
  - tavné řezání – materiál je roztaven a asistenčním plynem odfukován.
  - řezání pálením – ohřátý materiál na zápalnou teplotu s přiváděným reaktivním plynem shoří v exotermické reakci. Z místa je odstraněn asistenčním plynem.
- (SADÍLEK, 2009)

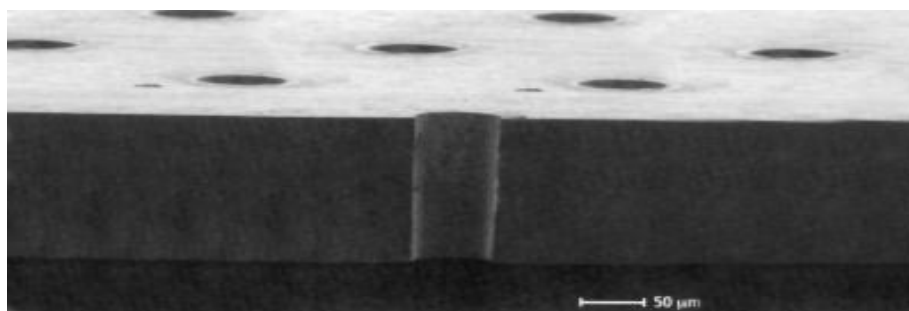
Na Obr. 12 se nachází schéma znázorňující působení laserového paprsku.



Obr. 12 - Působení laserového paprsku (HUMÁR, 2005)

### 3.2.4 Vrtání laserem

Vrtání děr (malých průměrů) laserem probíhá v pulzním režimu, kdy laser vysílá jednotlivé pulzy o vysoké intenzitě záření. Laserem lze vrtat těžkoobrobitelné kovové i nekovové materiály, vrtané díry mohou být kruhové i tvarové. (ŘASA a kol., 2001)



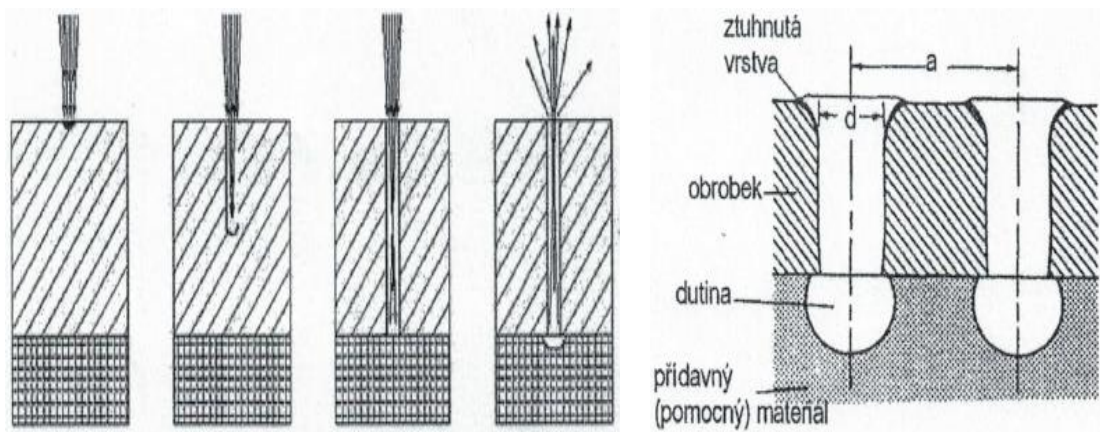
Obr. 13 - Příklad výrobku vrtáním laserem (<http://mmspektrum.com>)

V průmyslu se pro vrtání děr používají především Nd-YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W. Doba vrtání závisí na výstupním výkonu laseru a na tloušťce vrtaného materiálu. (<http://mmspektrum.com>).

### 3.3 Obrábění elektronovým paprskem

Tato metoda využívá kinetickou energii urychlených elektronů, která se při srážce s materiálem přemění na tepelnou energii schopnou natavit a odpařit materiál v místě dopadu. Proces probíhá ve vakuu. (MAŇKOVÁ, 2000)

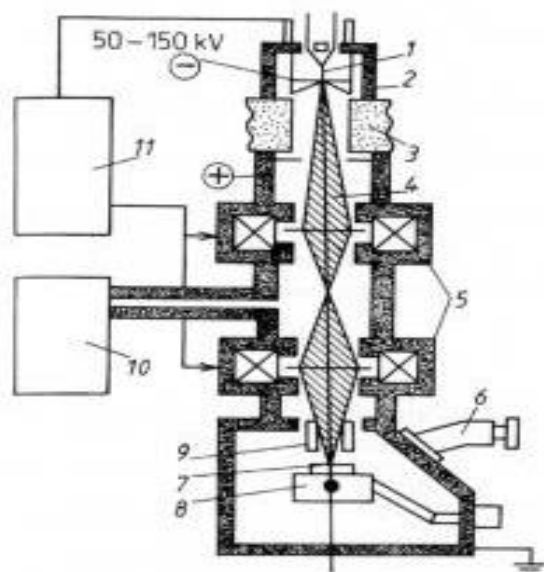
Obrábění paprskem elektronů využívá soustředěný svazek elektronů o vysoké rychlosti, který dopadá na obráběný materiál, ten natavuje a tím se odpařuje. Při vrtání děr touto metodou je nutné podkládat obráběný materiál dalším materiálem. Důvod je ten, že paprsek elektronů projde vrtaným materiálem a dostane se do styku s materiálem podkladovým, potom vysoký odpařovací tlak vytlačí natavený obráběný materiál a vytvoří díru v obrobku (viz. Obr. 14). Tuto metodu lze použít pro obrábění různých materiálů, u kterých jejich vlastnosti, jako je tvrdost, houževnatost, elektrická vodivost a bod tavení, nejsou omezujícími činiteli. (KOCMAN a kol., 2001)



Obr. 14 - Princip vrtání elektronovým paprskem a typický průřez vrtaného otvoru (SADÍLEK, 2009)

Pracovní režim, tj. styk paprsku elektronů s materiálem obrobku, může být nepřetržitý, tzv. kontinuální pracovní režim, nebo přerušovaný po určitých intervalech, tzv. pulzní pracovní režim. Přesné opracování se dosáhne při pulzním pracovním režimu, doba pulzu od 2  $\mu$ s do 0,01 s, při frekvenci pulzů 500 až 10000 Hz.

Výrobní zařízení pro obrábění elektronovým paprskem (Obr. 15, str. 27) sestává z elektronového děla, elektromagnetického zaostřovacího systému, ze systému pro vychylování paprsku, napájecího generátoru, pracovní komory a číslicového řídicího systému. Základem je zdroj elektronů, tzv. elektronové dělo, které je tvořeno žhavenou wolframovou katodou a anodou. Elektrony uvolněné z katody jsou vhodně řešenou anodou urychleny na rychlost rovnající se asi dvěma třetinám rychlosti světla. (ŘASA a kol., 2001)



1 – wolframový drát, 2 – elektronové dělo, 3 – izolátor, 4 – elektronový paprsek, 5 – elektromagnetické čočky, 6 – průzor, 7 – obrobek, 8 – pracovní stůl, 9 – elektrostatické vychylování elektronového paprsku, 10 – vývěvy, 11 – napájecí zdroj

Obr. 15 - Schéma zařízení pro obrábění paprskem elektronů (<http://mmspektrum.com>)

Ve strojírenské praxi se elektronový paprsek používá především pro svařování, pájení a pro vrtání dlouhých děr malých průměrů. Řezání materiálu je nahrazováno laserem. (ŘASA a kol., 2001)

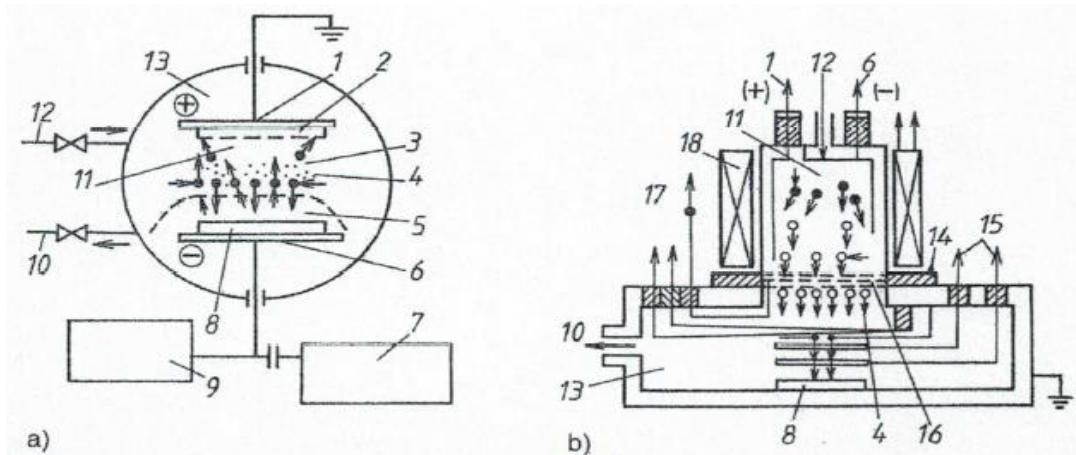
### 3.4 Obrábění iontovým paprskem

Iontový paprsek je svazek vysokoenergetických iontů inertního plynu (jako Argon, Krypton, Xenon), které mohou být lehce urychlované a řízené elektrickým polem. (MAŇKOVÁ, 2000)

Metoda je založena na využití kinetické energie iontů. Obrábění iontovým paprskem (viz. Obr. 16, str. 28) probíhá přes krycí masku, ve které je vytvořen tvar obráběné plochy, podobně jako u chemického obrábění. (SADÍLEK, 2009)

Je-li povrch obrobku bombardován ve vakuu svazkem iontů – zdrojem iontů je obvykle argon, dochází k uvolňování atomů z materiálu obrobku. Intenzita úběru materiálu je úměrná hustotě proudu iontů, energii dopadajících iontů, poměru hmotnosti iontů

a atomů materiálu obrobku a na úhlu dopadu iontového paprsku vzhledem k povrchu obrobku (např. pro obrábění SiO<sub>2</sub> ionty argonu je maximální intenzita úběru materiálu při úhlu dopadu 60°). (ŘASA a kol., 2001)



a) anizotropní leptání polovodičů, b) iontové leptání

1 – anoda, 2 – depozitní vrstva, 3 – elektrony, 4 – ionty, 5 – krycí maska, 6 – katoda, 7 – oscilátor, 8 – obrobek, 9 – voltmetr, 10 – vývěva, 11 – plazma, 12 – přívod argonu, 13 – vakuum, 14 – izolátor, 15 – snímač iontů, 16 – elektroda, 17 – potlačení elektronů, 18 – indukční cívky

Obr. 16 - Schéma iontového obráběcího zařízení (SADÍLEK, 2009)

### 3.5 Obrábění paprskem plazmy

Při obrábění paprskem plazmy je obráběný materiál postupně odtavován a odpařován paprskem plazmy, vystupujícím vysokou rychlostí z plazmového hořáku. Plazma – směs volných elektronů, pozitivně nabitých iontů a neutrálních atomů – má vysokou teplotu 10000 až 30000 °C. (KOCMAN a kol., 2001)

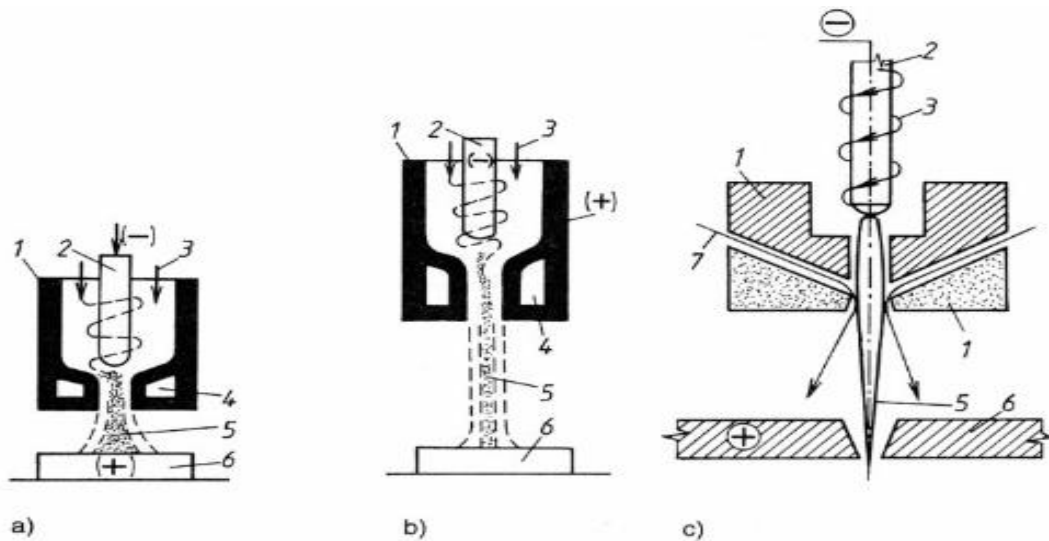
Plazma je elektricky vodivý stav plynu, který nastává při elektrickém výboji mezi anodou a katodou – vzniká ionizovaný plyn. (ŘASA a kol., 2001)

Vlastnosti plazmy jsou ovlivněny použitými plyny, které se podle funkce dělí na:

- plazmové – které jsou přiváděny přímo do obloukového výboje a vytvářejí plazmový paprsek – Ar, Ar + H<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vzduch,
- fokusační – které slouží ke zužování paprsku při jeho výstupu z trysky plazmového hořáku – Ar, Ar + H<sub>2</sub>, Ar + N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>,
- ochranné – které obklopují plazmový paprsek a oblast tavení materiálu a chrání je před účinky atmosféry – Ar. (HUMÁR, 2005)

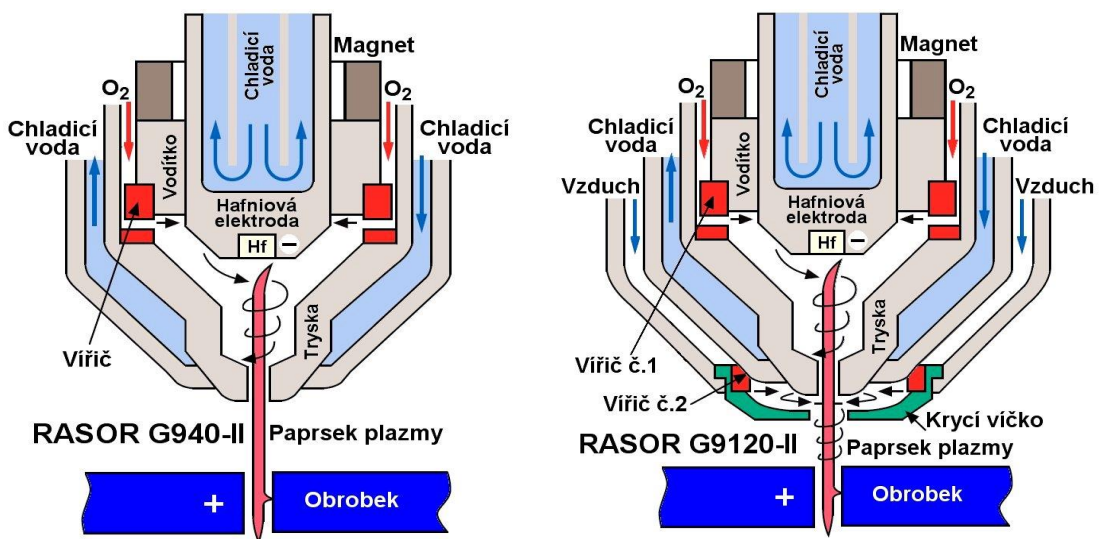
Dle druhu stabilizačního média rozeznáváme plazmové hořáky:

- s plynovou stabilizací – s transferovým obloukem (elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou v hořáku a obráběným materiálem), nebo s netransferovým obloukem (elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou v hořáku a výstupní tryskou – ta tvoří anodu)
- s vodní stabilizací – tryska má přídavné kanálky pro vstřík vody do plazmového hořáku. (SADÍLEK, 2009)



Plazmové hořáky s plynovou stabilizací: a) s transferovým obloukem, b) s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací (1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – obrobek, 7 – přívod vody).

Obr. 17 - Schéma zařízení pro obrábění paprskem plazmatu (PÍŠKA a kol., 2009)



Obr. 18 - Konstrukce plazmových hořáků (HUMÁR, 2005)

### 3.6 Chemické obrábění

Podstatou chemického obrábění je řízené odleptávání vrstev materiálu o tloušťce od několika setin milimetru do několika milimetrů z povrchu obrobku, založené na chemické reakci obráběného materiálu s pracovním prostředím (viz. Tab. 3), nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem. (KOCMAN a kol., 2001)

Místa, která nemají být leptána, jsou chráněna speciálním povlakem – maskou (tloušťka 0,2 až 2,0 mm). (HUMÁR, 2005)

Masky se nanáší na povrch buď nátěrem, nebo nástřikem ochranného povlaku. Masky tvoří chemicky odolnou vrstvu, která musí být lehce odstranitelná před a po leptání. (MAŇKOVÁ, 2000)

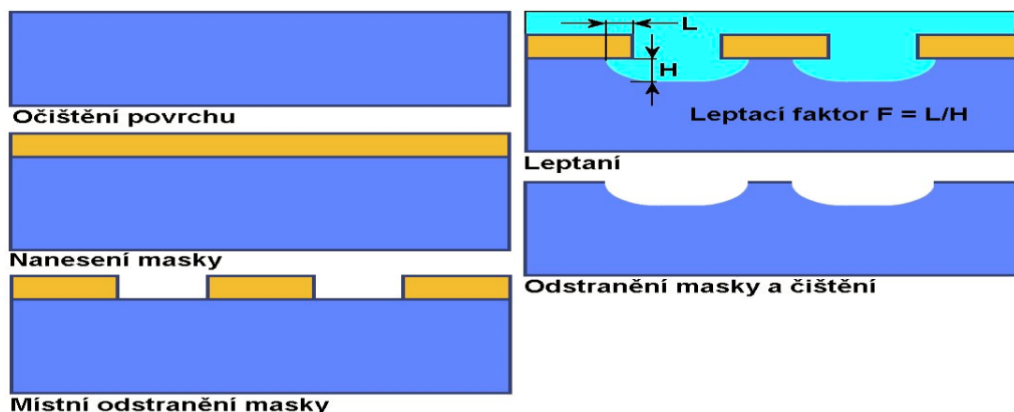
Tab. 3 - Typy pracovních kapalin (SADÍLEK, 2009)

Obráběný materiál	Pracovní kapalina	Rychlost leptání [mm·min <sup>-1</sup> ]	Leptací faktor [-]
Al	FeCl <sub>3</sub> (120 až 180 g·l <sup>-1</sup> )	0,020	1,75
Slitiny Al	NaOH (160 až 180 g·l <sup>-1</sup> )	0,025	
Cu a její slitiny	FeCl <sub>3</sub> (550 až 600 g·l <sup>-1</sup> )	0,050	2,75
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> (120 až 240 g·l <sup>-1</sup> )		
Mg a jeho slitiny	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,038	1,00
Si	HNO <sub>3</sub> + HF + H <sub>2</sub> O	velmi nízká	
Nízkouhlíkové oceli	FeCl <sub>3</sub> (550 až 600 g·l <sup>-1</sup> ), HNO <sub>3</sub> (10 až 15%), HCl + HNO <sub>3</sub>	0,025	2,00
Korozivzdorné oceli	FeCl <sub>3</sub> (550 až 600 g·l <sup>-1</sup> ), HCl + HNO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (2,5%)		
Slitiny Ti	HF (10 až 50%), HF + HNO <sub>3</sub>	0,025	1,00

#### 3.6.1 Chemické rozměrové leptání

Chemické rozměrové leptání (viz. Obr. 19, str. 31) je také označováno jako chemické frézování. Tvar obrobku se přenáší na polotovar podle šablon. Leptání se provádí ponořením do leptacích roztoků. Typickým jevem rozměrového leptání je tzv. „podřezávání“ materiálu, tj. odleptání materiálu v oblasti pod ochrannou maskou, které lze kvantifikovat hodnotou leptacího faktoru. (viz. Tab. 3).

Maximální hloubka odebírané vrstvy závisí na odolnosti masky proti jejímu narušení chemickou látkou použitou pro leptání. Materiály používané na vytváření masky umožňují maximální dobu leptání 8 až 10 hodin; používají se polyvinylové, polyamidové pryskyřice, nebo speciální laky. (SADÍLEK, 2009)



Obr. 19 - Chemické rozměrové leptání (HUMÁR, 2005)

### 3.6.2 Chemické prostřihování

Jedná se o metodu, která umožňuje výrobu tenkých a tvarově složitých výlisků z tenkého plechu či fólie bez otřepů. Principiálně jde o přenos obrysu výrobku na polotovar fotochemickým tištěním (na povrchu polotovaru je nanesea fotosenzitivní vrstva, která nejen lokalizuje odleptávaná místa, ale také chrání místa, která nemají být leptána). (PÍŠKA a kol., 2009)

### 3.6.3 Chemické leštění

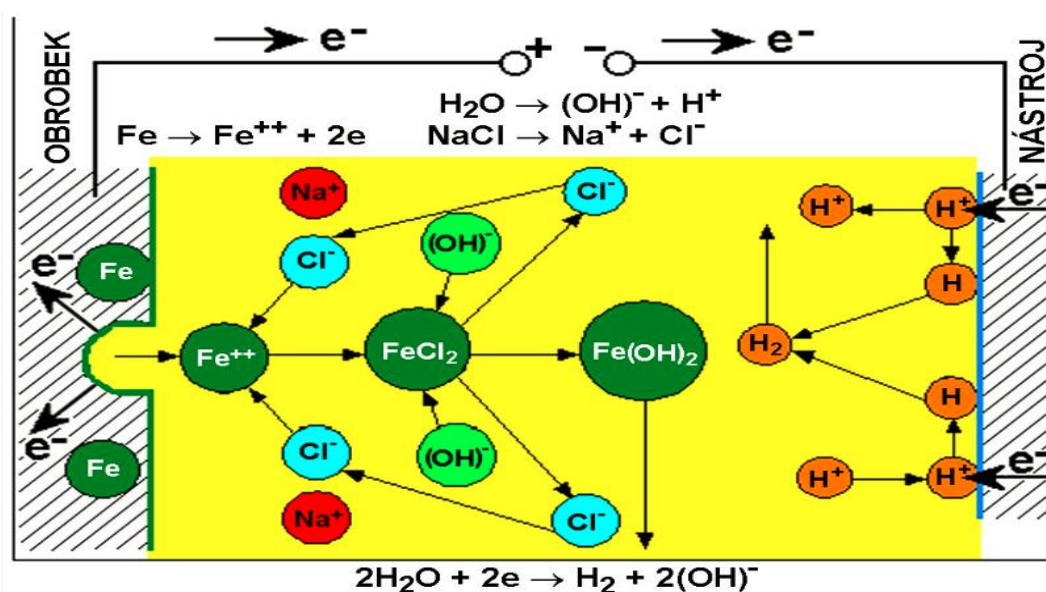
Chemické leštění je založeno na úběru materiálu chemickým působením vhodného roztoku na povrch obrobku. Dochází k chemické reakci, při které je nejdříve odebírána materiál na vrcholcích nerovností povrchu. Průběh a výsledek chemického leštění závisí na dokonalém očištění povrchu obrobku, složení a koncentraci roztoku, na jeho teplotě, času leštění a množství kovu rozpuštěného v roztoku.

Optimální teplota lešticího roztoku závisí na materiálu obrobku a pohybuje se v rozmezí 70 až 90 °C. Materiál se rozpouští na všech plochách rovnoměrně, přičemž vznikají plyny, které musí mít možnost volně z roztoku odcházet. Proto je třeba pozorně volit polohu obrobku v roztoku. (ŘASA a kol., 2000)

### 3.7 Elektrochemické obrábění

Jedná se o metodu beztržiskového (bezsilového) obrábění elektricky vodivých materiálů. Využívá poznatků o působení elektrického proudu na elektrolyt; podstatou metody je fyzikální jev zvaný elektrolýza. (ŘASA a kol., 2001)

Elektrochemické obrábění (viz. Obr. 20) je řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu (viz. Tab. 4, str. 33), který proudí mezerou (0,025 až 1,3 mm, rychlost proudění 10 až 50 m·s<sup>-1</sup>) mezi elektrodami (anoda je obrobek, katoda je nástroj), napájenými stejnosměrným zdrojem nízkého napětí (4 až 30 V) při vysoké hodnotě proudu (50 až 20000 A). (HUMÁR, 2005)



Obr. 20 - Elektrochemické reakce při obrábění Fe v roztoku NaCl (HUMÁR, 2005)

Intenzita rozpouštění je závislá na hustotě elektrického proudu. Její zvyšování nepříznivě ovlivňuje úběr obráběného materiálu, protože na povrchu elektrod se začínají usazovat oxidy, které vytvářejí pasivační vrstvu, zabraňující dalšímu rozpouštění materiálu obrobku. Vrstva oxidů pak musí být odstraňována přiváděním elektrolytu pod tlakem. (SADÍLEK, 2009)

Roztok elektrolytu zajišťuje v pracovním prostoru:

- vedení elektrického proudu
- odvádí vzniklé teplo a produkty elektrochemických reakcí
- určuje podmínky rozpouštění anody (MIČIETOVÁ, 2001)



Tab. 4 - Elektrolyty pro elektrochemické obrábění (ŘASA a kol., 2001)

Typ elektrolytu	Hmotnostní koncentrace (%)	Obráběné materiály	Poznámka
NaCl	5 až 20	Slitiny na bázi Fe, Ni, Cu, Al, Mg, Ti	Silně korozivní, malý vliv na pasivaci; nejedovatý a levný.
NaNO <sub>3</sub>	10 až 20	Slitiny na bázi Fe, Al, Cu, Zn	Univerzální použití, výrazně pasivační účinky.
NaClO <sub>3</sub>	20 až 45	oceli	Vysoký úběr a přesnost; nebezpečná manipulace, nebezpečí vznícení
HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	do 10	slitiny Ni, Cr, Co	Náročné na bezpečnost, agresivní prostředí, elektrolyt se spotřebovává
NaOH	do 10	W, Mo, SK	Leptací účinek, obtížná manipulace

Materiál použitý pro nástroje musí mít dostatečnou tuhost, musí být snadno obrobitelný, mít dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a být odolný proti chemickému působení elektrolytu. (KOCMAN a kol., 2001)

Nástroj má negativní tvar obrobené plochy hotové součásti, konkrétní rozměry jsou po celé jeho funkční ploše upraveny tak, aby v každé fázi obrábění byla zachována požadovaná konstantní mezera mezi nástrojem a obrobkem. V některých případech jsou potřebné plochy na nástroji opatřeny izolační vrstvou, aby bylo možné cíleně řídit průchod elektrického proudu. Izolační materiály (např. teflon, epoxidové pryskyřice) jsou nejčastěji nanášeny stříkáním. (HUMÁR, 2005)

### 3.7.1 Elektrochemické obrábění v proudícím elektrolytu

Tato technologie patří k nejrozšířenějším aplikacím hloubení tvarů a dutin v těžkoobrobitelných materiálech. (KOCMAN a kol., 2001)

Nástroj a obrobek jsou odděleny pracovní mezerou 0,05 až 2 mm, kterou protéká elektrolyt rychlostí 10 až 50 m·s<sup>-1</sup>, pod tlakem až 2,5 MPa. Přísuvová rychlost nástrojové

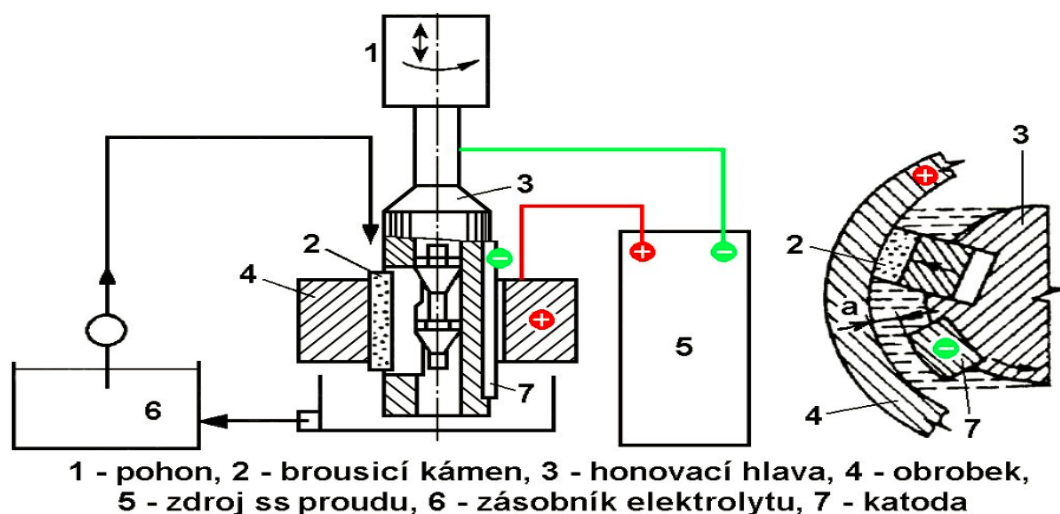
elektrody závisí na pracovním proudu a obráběné ploše (velikost, složitost tvaru) a pohybuje se v rozsahu  $0,5$  až  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . (HUMÁR, 2005)

Pro dosažení přesného tvaru obráběné plochy je nutné provádět korekci tvaru nástroje, nebo nanést na boky nástroje izolaci (používá se vhodná pryskyřice), která brání v daných místech nežádoucímu úběru materiálu obrobku. (ŘASA a kol., 2001)

### 3.7.2 Elektrochemické obrábění rotující elektrodou

Je kombinací standardního broušení s účinkem elektrochemickým, přičemž brusným účinkem se odstraňuje méně než 10 % materiálu. Obráběná součást (anoda) je připojena ke kladnému pólu stejnosměrného zdroje a brousící kotouč (katoda) na záporný pól zdroje. Pracovní mezera je vytvářena zrný brusiva, které vystupují z elektricky vodivého pojiva. Vystupující zrna brusiva rovněž odstraňují oxidovou anodickou vrstvou vznikající na povrchu v důsledku pasivačních jevů při elektrolytickém rozpouštění. Pro obrábění ocelí je vhodným brusivem oxid hlinitý, pro obrábění slinutých karbidů a velmi tvrdé oceli se používá diamant. (KOCMAN a kol., 2001)

Do této skupiny metod lze zařadit také elektrochemické honování (viz. Obr. 21). Kinematika obrábění je stejná jako u klasického honování. Honovací hlava má nevodivé lišty a je připojena na záporný pól stejnosměrného napětí, obráběná součást je připojena na kladný pól a od rámu stroje je odizolována. Elektrochemické honování zvyšuje až 6krát produktivitu práce oproti klasickému honování. (ŘASA a kol., 2001)



Obr. 21 - Elektrochemické honování – schéma (HUMÁR, 2005)

### 3.7.3 Elektrochemické leštění

Základem je anodické rozpouštění výstupků a nerovností povrchu materiálu v elektrolytu při průchodu stejnosměrného proudu. (ŘASA a kol., 2001)

V průběhu leštění se na obráběném materiálu vytváří vrstva produktů anodického rozpouštění, které se usazují zejména v prohlubních, zatímco na vrcholcích nerovností se tvoří pouze tenký film. (HUMÁR, 2005)

Hustota proudu je v místech výstupků vyšší než v místech prohlubní (velký odpor anodové vrstvy v prohlubních), proto na vrcholcích dochází k intenzivnějšímu rozpouštění a nerovnosti se postupně vyhlazují. (SADÍLEK, 2009)

Množství rozpouštěného materiálu závisí na hustotě proudu, teplotě a složení elektrolytu, druhu obráběného materiálu a na umístění obrobku v elektrolytu. (KOCMAN a kol., 2001)

### 3.7.4 Elektrochemické odstraňování ostřin (otřepů)

Princip této metody spočívá v intenzivnějším anodickém rozpouštění ostřin, které je způsobeno velkou koncentrací hustoty elektrického proudu na ostrých hranách a na vrcholcích ostřin. (KOCMAN a kol., 2001)

Otřep na hraně obrobku zmenšuje pracovní mezeru, tím se v tomto místě zvýší proudová hustota a dojde k rozpuštění materiálu otřepu, a to bez porušení základního materiálu, tedy bez poškození tvaru dané hrany obrobku. (ŘASA a kol., 2001)

Odstraňování ostřin se provádí tvarovou elektrodou nebo v lázni. Elektrochemické odstraňování ostřin tvarovou elektrodou je vhodné zejména pro průchozí díry. Přívod elektrolytu je orientován tak, aby aktivně působil pouze v místě ostřin. (HUMÁR, 2005)

Elektrochemické odstraňování ostřin v lázni je vhodné pro ostřiny s malou výškou. Používá se zařízení pro kontinuální elektrochemické leštění, případně rotační nebo vibrační bubny, kde grafitové kuličky plní funkci elektrod. (KOCMAN a kol., 2001)

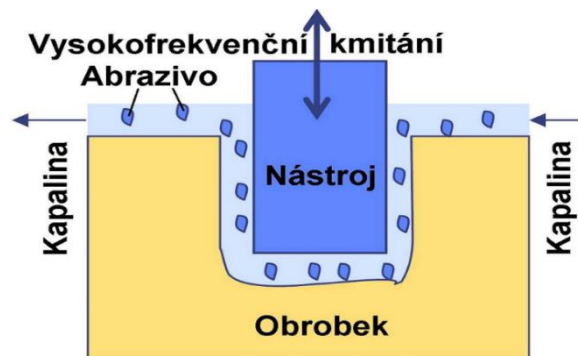
### 3.8 Obrábění ultrazvukem

Obrábění ultrazvukem je založeno na mechanickém úběru materiálu. K řízenému rozrušování obráběného materiálu dochází v důsledku mechanického účinku pohybu abrazivních zrn a působení kavitační a chemické eroze. (PÍŠKA a kol., 2009)

Princip metody (viz. Obr. 22) je následující: zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá v kolmém směru na obráběný povrch kmito o ultrazvukové frekvenci 18 až 25 kHz. Zrna jsou nástrojem přitlačována řízenou stálou silou na obráběný povrch, čímž dochází k překopírování tvaru pracovní části nástroje do obrobku. (ŘASA a kol., 2001)

Velká kinetická energie zrn abraziva způsobuje narušování celistvosti obráběného povrchu, kavitační účinky navíc umožňují rychlou výměnu opotřebovaných zrn za nová. Kapalné prostředí (voda, benzín, petrolej, líh) umožňuje lepší pronikání ultrazvukové energie do místa obrábění, nejlepších výsledků se dosahuje při použití vody. (HUMÁR, 2005)

Jako brusivo se používají brousící zrna z diamantu, kubického nitridu boru (KNB), karbidu boru, karbidu křemíku (SiC) a oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ). Koncentrace zrn v kapalině je 30 až 40 %. Zrna se při obrábění opotřebovávají, proto je nutné zajistit jejich dokonalou výměnu. (ŘASA a kol., 2001)



Obr. 22 - Technologie obrábění ultrazvukem - princip metody (HUMÁR, 2005)

Nástroje pro obrábění ultrazvukem jsou z pružných a houževnatých materiálů: měď a mosaz – pro menší úběry, korozivzdorné oceli. Obrobitelnost materiálu ultrazvukem (viz. Tab. 5, str. 37) je dána jeho tvrdostí a křehkostí. Obrábět lze elektricky vodivé i nevodivé materiály, sklo, křemík, ferity, kalené oceli, slinuté karbidy, keramické materiály, grafit, polodrahokamy. Naopak nelze obrábět plastické materiály. (SADÍLEK, 2009)

Tab. 5 - Obrobitelnost materiálů ultrazvukem (ŘASA a kol., 2001)

Obráběný materiál	Relativní (poměrná) obrobitelnost	Obráběný materiál	Relativní (poměrná) obrobitelnost
Sklo	1,0 (etalon)	Křemík	0,5
Rubín	0,9	Keramika	0,3
Ferit	0,8	Achát	0,3
Germanium	0,6 až 0,3	Slinutý karbid	0,05 až 0,02

Je třeba uvést, že ultrazvukové kmity se rovněž používají u nedestruktivních zkoušek materiálu (zkouška ultrazvukem).

V ultrazvukové defektoskopii využíváme podélných a příčných ultrazvukových vln o vysoké frekvenci (1 až 10 MHz). Ultrazvukové vlny se v homogenním prostředí šíří přímočaře, na rozhraní dvou prostředí (např. voda, rozhraní kovů, hrana předmětu, aj.) se odrážejí a lámou. Nejrozšířenější jsou metody odrazová a průchodová. U průchodové metody se ultrazvukové vlny zavádějí (vysílají) do zkoušeného předmětu na jedné straně a přijímají se na straně protilehlé. Je-li v materiálu vada, ultrazvukové vlny se odrážejí na její ploše, takže za vadou vzniká tzv. ultrazvukový stín. (HLUCHÝ a kol., 1999)

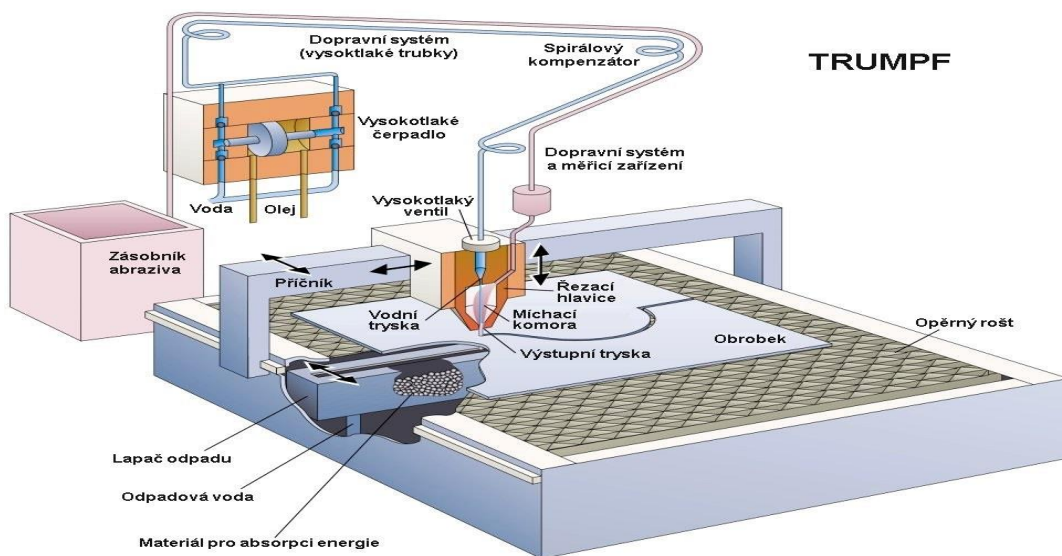
### 3.9 Obrábění vodním paprskem

Obrábění materiálů kapalinovým paprskem je založeno na přeměně kinetické energie molekul kapaliny (příp. směsi kapaliny a zrn brousicího materiálu) na mechanickou práci, za současného působení kavitační koroze. Paprsek pracovní kapaliny vystupuje při vysokých tlacích z pracovní trysky rychlostí až čtyřikrát větší než je rychlost zvuku a svým účinkem na okolí se chová jako pevné těleso. (ŘASA a kol., 2001)

Kapalinový paprsek lze při technologických aplikacích použít jako:

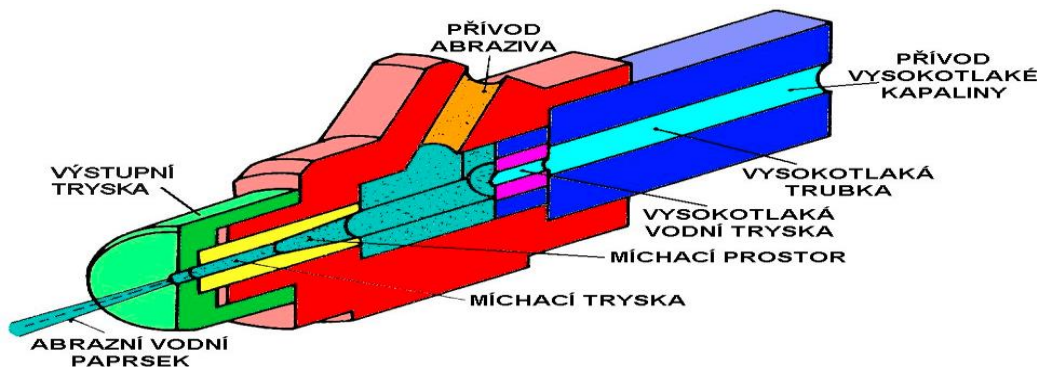
- Čistý kapalinový paprsek – pro řezání měkkých a málo houževnatých materiálů.
- Abrazivní paprsek – pro řezání tvrdých a houževnatých materiálů. Lze řezat materiály o tloušťce více než 100 mm. (SADÍLEK, 2009)

Hlavními prvky zařízení pro řezání vodním paprskem (viz. Obr. 23) jsou hydraulická jednotka s čerpadlem a multiplikátorem (násobičem tlaku), filtry, ventily, potrubí pro rozvod vody, systém dávkování abraziva, řezací hlavice (viz. Obr. 24), zařízení pro pohyb řezací hlavice, opěrný rošt pro podepření obrobku, lapač nečistot, systém úpravy a recyklace vody a řídicí NC nebo CNC systém. (HUMÁR, 2005)



Obr. 23 - Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem (HUMÁR, 2005)

Řezací hlavice (viz. Obr. 24) je utvářecí prvek samotného pracovního nástroje – paprsku. Společně s vysokotlakým vodním čerpadlem a soustavou vodní a abrazivní trysky dodávají samotné technologii její efektivitu. Vodní trysky jsou koncipovány do tvaru zužující se dýzy, což znásobuje rychlost paprsku a vytváří kontinuální proud pohybující se rychlostí 1 až 4 Mach. Po průchodu vodní tryskou se paprsek dostává do směšovací komory, ve které (pakliže se bude jednat o AWJM) bude podtlakem nasáto abrazivo, paprsek se tímto abrazivem obalí a dál prochází abrazivní tryskou ven z řezací hlavice, odkud je již distribuován přímo do místa samotného řezu. (PÍŠKA a kol., 2009)



Obr. 24 - Schéma řezací hlavice (HUMÁR, 2005)

Používané druhy abraziva:

- granát ( $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$  nebo  $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)]_3$ ) – nejčastěji používaný, vyšší cena, vyšší účinek, více opotřebovává trysku, není příliš vhodný pro recyklaci,
- oxid hlinitý –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- olivín –  $(\text{Mg,Fe})_2(\text{SiO}_4)$ ,
- křemičitý písek – nízká cena, nižší účinek a opotřebení trysky, nevhodný pro recyklaci,
- ocelová drť nebo broky. (SADÍLEK, 2009)

### 3.10 Obrábění proudem brusiva

Obrábění proudem brousicích zrn se od obrábění kapalinovým paprskem liší svou podstatou. Úběr materiálu se děje pouze volným brusivem unášeným velkou rychlostí proudem vzduchu. (ŘASA a kol., 2001)

Základem zařízení je vysokotlaký kompresor s rozvodem tlakového vzduchu (5 MPa) a soustavou trysek s přisáváním abraziva do pracovního média. Jako abrazivo se nejčastěji používá oxid hliníku nebo karbid křemíku. (MÁDL a kol., 2000)

Hlavní parametry mající vliv na proces úběru jsou:

- druh obráběného materiálu
- rychlost proudění abraziva
- druh, velikost a koncentrace abraziva
- vzdálenost mezi obrobkem a tryskou (SADÍLEK, 2009)

Obrábění vzdušným proudem s abrazivem je poměrně pomalý proces (úběr se pohybuje okolo  $10 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Síly působící na obrobek jsou omezené a nevznikají problémy při ohřívání, protože proud vzduchu současně ochlazuje povrch obrobku. (MIČIETOVÁ, 2001)

## 4 VÝHODY A NEVÝHODY JEDNOTLIVÝCH METOD

### 4.1 Výhody a nevýhody elektroerozivního obrábění

K výhodám elektroerozivního obrábění patří možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost), velký rozsah pracovních parametrů – výroba povrchů různých jakostí, a výroba součástí složitých tvarů (snižuje se pracnost při jejich výrobě) včetně provádění operací neuskutečnitelných jinými metodami obrábění (výroba děr se zakřivenou osou). Vzniká menší odpad než při konvenčním mechanickém obrábění, na obrobek nepůsobí žádné mechanické zatížení, a na jeho hranách nezůstávají otřepy, jednoduchá výroba nástrojových elektrod a snadná automatizace. (SADÍLEK, 2009)

K nevýhodám této technologie patří nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobene plochy, nutnost ponoření obrobku do kapaliny v průběhu obrábění, a poměrně nízká produktivita při obrábění měkkých materiálů. (HUMÁR, 2005)

Využití v praxi se odvíjí dle použité technologie elektroerozivního obrábění:

- Elektrojiskrové řezání – nachází uplatnění zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů a při dělení ultratvrdých materiálů s minimální šířkou řezu.
- Anodomechanické obrábění – pro rozřezávání tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, tenkostěnných trubek, pro vyřezávání profilů a pro tvarové broušení nástrojů ze slinitých karbidů. (KOCMAN a kol., 2001)
- Elektrojiskrové hloubení – představuje základní metodu EDM, která je určena pro výrobu zápuštěk, licích forem, apod. (PÍŠKA a kol., 2009)
- Elektrokotní obrábění – je vhodné pro řezání nálitků, vtoků, opracování svarů, apod. (<http://www.mmspektrum.com>)

### 4.2 Výhody a nevýhody obrábění paprskem plazmy

Mezi výhody řezání paprskem plazmy patří lepší kvalita řezu při řezání materiálů větší tloušťky a kratší časy řezání (ve srovnání s řezáním plamenem) a nižší náklady při řezání tenkých plechů (ve srovnání s laserem). (HUMÁR, 2005)



K nevýhodám se řadí vyšší náklady (oproti řezání plamenem), horší kvalita řezu a opracování (oproti laseru), a velká tepelně ovlivněná oblast. (PÍŠKA a kol., 2009)

Díky vysoké hustotě výkonu plazmatu a vysoké dosahované teplotě lze plazmatem řezat takřka všechny kovové materiály. Omezením je tloušťka materiálu, což je způsobeno poklesem tlaku plazmového plynu se vzrůstající tloušťkou materiálu. (<http://www.mmspektrum.com>)

### **4.3 Výhody a nevýhody obrábění elektronovým paprskem**

Předností elektronového paprsku je zejména jeho vysoká účinnost (větší než 95 %), nižší náklady na provoz stroje a jednodušší uspořádání (při porovnání s lasery poskytují urychlovače elektronů homogenní elektronové svazky s vysokým průnikem, u kterých lze snadno regulovat energii svazku a délku časového impulsu). (MÁDL a kol., 2000)

Mezi hlavní nevýhody patří vznik škodlivého RTG záření, pracovní cyklus ve vysokém vakuu ( $10^{-3}$  až  $10^{-4}$  Pa), problémy při opracování el. nevodivých materiálů (izolantů), a také vysoké pořizovací náklady na zařízení. (SADÍLEK, 2009)

Využití této technologie je v praxi široké, neboť obrobiteľnosť materiálů pomocí této metody není závislá na jejich mechanických vlastnostech. Proudem elektronů lze obrábět i těžkoobrobiteľné materiály jako jsou žáruvzdorné oceli, austenitické oceli určené pro stavbu jaderných reaktorů, slitiny zinku a niobu, titanové a hliníkové slitiny, slitiny určené pro letecký či kosmický průmysl apod. (PÍŠKA a kol., 2009)

### **4.4 Výhody a nevýhody obrábění iontovým paprskem**

Předností této metody je, že nezanechává žádné zbytkové napětí, nevytváří se teplo, nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy, a proces obrábění je plně kontrolovatelný s přesností lepší než 0,1  $\mu\text{m}$ . Lze obrábět téměř všechny materiály (včetně optického skla), proces není citlivý na mechanické a fyzikální vlastnosti opracovaného materiálu, stěny vyrobených drážek jsou kolmé, obrobený povrch má vysokou kvalitu.

Nevýhodou tohoto způsobu obrábění je vysoká cena potřebného zařízení, a nutnost aplikace ve vakuu. (SADÍLEK, 2009)

Obecně lze říci, že se obrábění iontovým paprskem používá především při výrobě integrovaných obvodů, polovodičů, součástí pro mikroelektroniku, pro leštění čoček, výrobu miniaturních součástí, čištění a hlazení povrchů. (ŘASA a kol., 2001)

#### **4.5 Výhody a nevýhody obrábění laserovým paprskem**

Velkou výhodou této metody je možnost obrábění v nedostupných místech pro jiné nástroje (na přenos laserového paprsku do těžko dostupných míst lze použít zrcadla nebo optické kabely), začátek řezu je možný i bez předchozího navrtání. Tepelnou energii lze koncentrovat na velmi malou plochu bez použití mechanických sil – lze obrábět i velmi křehké materiály bez nebezpečí jejich mechanického poškození. (SADÍLEK, 2009)

Další výhody laseru spočívají v tvorbě tenkých a čistých řezů, možnosti řezání složitých tvarů, a hospodárnosti i při malých výrobních sériích. Za nevýhody lze považovat vznik tepelně ovlivněné oblasti, malou tloušťku průřezu, možnost vzniku mikrotrhlin, a nutnost odsávání vznikajících karcinogenních plynů (zvláště při řezání Al-slitin a plastů). Při chybném nastavení mohou vznikat otřepy na výstupu paprsku z materiálu. (PÍŠKA a kol., 2009)

V technologii se laser používá pro svařování, vrtání, řezání, tepelné zpracování, značení a gravírování, povrchové úpravy, povlakování, metody tvorby modelů a prototypů (Rapid Prototyping) a pro laserovou podporu konvenčního obrábění.  
(<http://www.mmspektrum.com>)

#### **4.6 Výhody a nevýhody chemického obrábění**

Výhodou metody je možnost obrábění většiny kovových slitin, metoda zabezpečuje rovnoměrné obrábění složitých profilů, a lze vytvářet velmi tenké profily, při nízkých provozních nákladech. Úběr materiálu nezpůsobuje vznik zbytkových napětí v obrobku, tvrdost a křehkost obráběného materiálu nejsou limitujícími faktory. (HUMÁR, 2005)

Jako nevýhody chemického obrábění lze uvést nekontrolovatelné podřezání, nemožnost vytvoření ostré hrany, a nehospodárnost hlubokých tvarů. Rovnoměrnost odleptané vrstvy je podmíněna homogenitou struktury oceli, svary a nálitky jsou obtížně obráběné

(mají různou strukturu – vznik tzv. jamkovitého povrchu), náklady na proces závisí na kvalitě obráběného povrchu (vrypy, stopy po korozi). Rozměry dílce jsou limitované rozměry nádrže, do které se ponoří; je nutná zvýšená bezpečnost práce. (SADÍLEK, 2009)

Chemické obrábění se využívá v následujících oblastech výroby: přesné modelování tvarových součástek, tvarování rozměrných rovinných ploch, odstraňování tenkých vrstev v malosériové výrobě, opracování velkých dílců z těžkoobrobitelných materiálů, redukce hmotnosti křídlových panelů letadel plošným odleptáním nadbytečného kovu z vyznačené oblasti. (MAŇKOVÁ, 2000)

#### **4.7 Výhody a nevýhody elektrochemického obrábění**

Mezi přednosti této technologie patří, že elektrody nepodléhají opotřebení (dlouhá životnost), opracované díly jsou bez otřepů, a vysoká kvalita opracovaného povrchu. Lepší funkční vlastnosti povrchu, než mech. obrobené (odolnost proti opotřebení, tření, korozi), opracovaný povrch není tepelně ovlivněn a neobsahuje zbytkové napětí.

Mezi nevýhody spadá problematické obrábění materiálů s větším obsahem uhlíku (problémy s usazováním na anodě), problémy s obráběním oceli tř. 19 a cementační oceli, téměř neobrobitelná šedá litina. Každá slitina má svůj specifický úběr (nevhodný elektrolyt, nebo parametry zapříčiní nerovnoměrný úběr). Ni a Ti mají silný sklon k pasivaci, proto je slitiny Ni a Ti v roztocích  $\text{pH} > 9$  nemožné obrábět. (SADÍLEK, 2009)

K základním aplikacím elektrochemického obrábění patří výroba tvarově složitých součástí (zápustky, lisovací nástroje, lopatky turbín), obrábění materiálů s vysokou pevností a tvrdostí (kalené oceli, žárovečné slitiny, slinuté karbidy) a obrábění součástí s malou tuhostí, které by se účinkem řezných nebo upínacích sil mohly při klasickém obrábění deformovat. (HUMÁR, 2005)

#### **4.8 Výhody a nevýhody obrábění ultrazvukem**

Hlavní výhodou této technologie je schopnost obrábět tvrdé a křehké materiály – sklo, křemík, keramika, grafit, kompozity, slinuté karbidy. Dalším kladem jsou nástroje odolné vůči opotřebení působením abrazivních zrn – jsou vyráběny z pružných a houževnatých materiálů (korozi-vzdorné oceli, měď, mosaz). (PÍŠKA a kol., 2009)

Mezi hlavní nedostatky ultrazvukového obrábění patří velké pohlcování energie, menší výkonnost s velkým opotřebením nástroje (zejména při obrábění slinutých karbidů), obtížnost správného nastavení nástroje. (MIČIETOVÁ, 2001)

Ultrazvukové technologie jsou charakteristické širokou oblastí použití, do které patří např. dělení materiálů, hloubení drážek a děr kruhových i nesymetrických tvarů, výroba tvarově složitých elektrod pro elektrojiskrové metody obrábění, výroba tvářecích nástrojů ze slinutých karbidů, řezání a vrtání kompozitních materiálů, apod. (HUMÁR, 2005)

#### **4.9 Výhody a nevýhody obrábění vodním paprskem**

Výhody technologií WJM a AWJM lze při porovnání s jinými metodami obrábění shrnout následovně: vysoká energetická účinnost (až 80 %); relativně studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplo; malé ztráty materiálu v důsledku úzkého řezu, možnost řezání pod hladinou vody, vysoká životnost trysek (100 hodin u WJM, 50 hodin u AWJM), jedno vysokotlaké čerpadlo může současně napájet až 70 trysek paprsku bez abraziva nebo 8 trysek paprsku s abrazivem. Obrobené hrany nevykazují tepelnou ani mechanickou deformaci, obrobky není třeba upínat; v obrobené ploše nejsou zbytková napětí ani mikrotrhliny; proces je bezprašný, vysoká flexibilita i při složité geometrii výřezu, šetrnost k životnímu prostředí, mimořádná spolehlivost a jednoduchost obsluhy. (HUMÁR, 2005)

Hlavní nevýhoda je, že řezaný materiál musí snášet přímý kontakt s vodou – nesmí být vodou znehodnocen (např. při řezání ocelí dochází k rychlému korodování nového povrchu). Dalšími nevýhodami jsou hlučnost provozu, a zvýšené riziko delaminace u sendvičových materiálů. (PÍŠKA a kol., 2009)

Ve strojírenském průmyslu je využití technologie obrábění vodním paprskem následující: řezání titanu, wolframu, tantalu, uranu, velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, superslitiny na bázi Ni nebo Co), kompozitů, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástí (lopatky a díly proudových a raketových motorů, turbín a kompresorů), řezání vláknitých materiálů. (SADÍLEK, 2009)

#### **4.10 Výhody a nevýhody obrábění proudem brusiva**

Jako hlavní výhody lze uvést, že materiál obrobku se neohřívá, levné médium, a také možnost obrábět tvrdé materiály. Naopak velkou nevýhodou je nízká rychlost obrábění. (SADÍLEK, 2009)

Tato metoda se hlavně používá k výrobě drážek a rýh v oblasti elektrotechnického průmyslu (výroba polovodičů) a dále pro odstraňování otřepů (chirurgické jehly, hydraulické ventily, apod.). (MÁDL a kol., 2000)

### **5 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD V ZÁVISLOSTI NA KVALITĚ POVRCHU**

Pro porovnání uvedených nekonvenčních technologií obrábění byla zvolena kritéria drsnosti povrchu ( $R_a$ ) a přesnosti rozměrů.

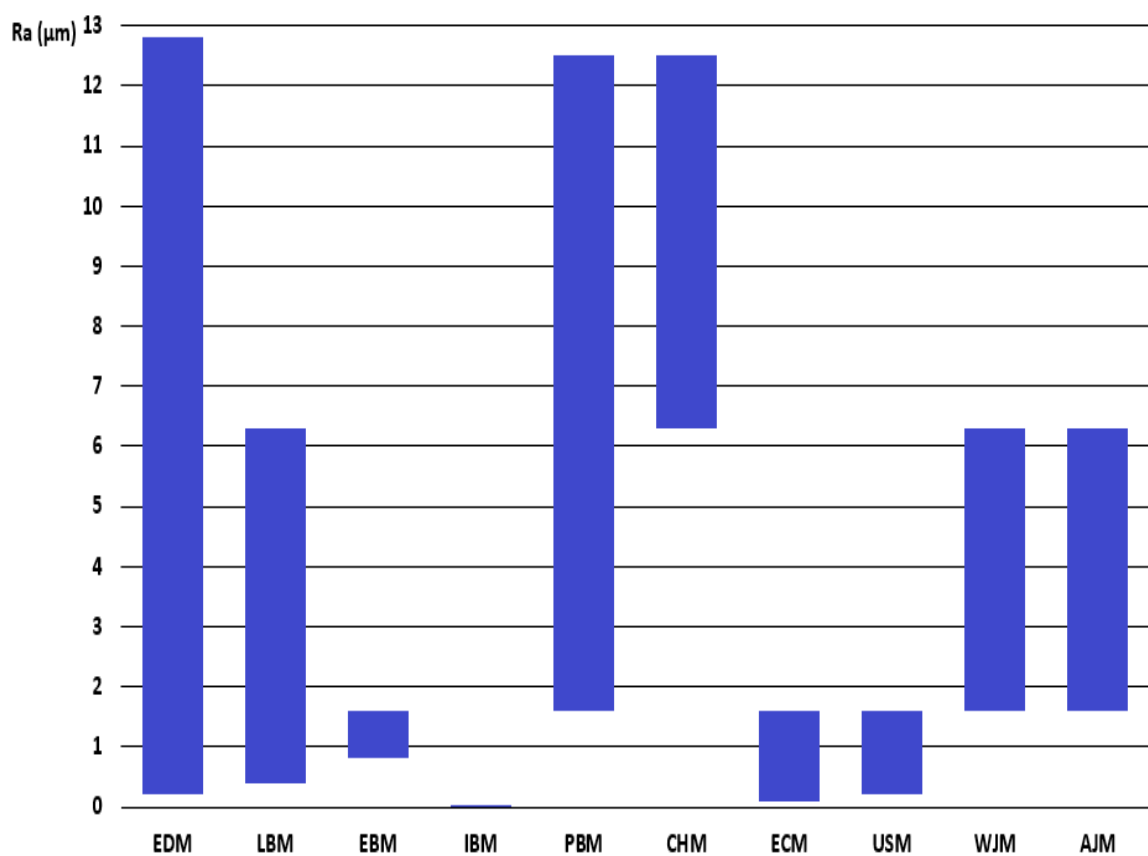
Základním kritériem pro porovnání výsledného povrchu obrobených součástí je drsnost povrchu, která je číselně vyjádřena jako průměrná aritmetická úchylka profilu (označována  $R_a$ ). Ta nám udává, jakých hodnot lze zvolenými technologiemi dosáhnout (viz. Tab. 6, str. 46). Dosahované hodnoty  $R_a$  jsou graficky znázorněny na Obr. 25, str. 46.

Kontrolu drsnosti povrchu lze provádět metodami kvalitativními (porovnání kontrolovaného povrchu s povrchem vzorovým – zrakem, nebo hmatem), nebo kvantitativními (pomocí číselného vyjádření parametru  $R_a$ , přičemž hodnota je udána měřicím přístrojem přímo, nebo je pořízen grafický záznam, z něhož je drsnost vyhodnocena). Používané přístroje u kvantitativních metod mohou pracovat způsobem bezdotykovým, nebo dotykovým. Nejvíce rozšířené jsou ve strojírenství dotykové elektronické přístroje (dotykové profilometry), jejichž předností je přesnost, vysoká citlivost, rychlost měření umožňující zobrazení profilové křivky, jednoduchá obsluha, a především přímé měření parametru  $R_a$ . Základním prvkem přístroje je snímač s diamantovým hrotem, který se posunuje po povrchu a snímá jeho nepravidlosti. Pohyby hrotu se přeměňují na elektrický signál, který se zesiluje a vyhodnocuje. (ŠČERBEJOVÁ, 1993)

Tab. 6 - Výběr nekonvenční technologie z hlediska kvality povrchu  
(MIČIETOVÁ, 2001)

Ra [ $\mu\text{m}$ ]	USM	WJM	AJM	CHM	ECM	EDM	LBM	EBM	PBM
< 0,2					X				
0,2 až 0,4	X				X	X			
0,4 až 0,8	X				X	X	X		
0,8 až 1,6	X				X	X	X	X	
1,6 až 3,2		X	X			X	X		X
3,2 až 6,3		X	X			X	X		X
6,3 až 12,5				X		X			X
12,5 <						X			

Dosahovaná drsnost povrchu při iontovém obrábění (leštění) je cca  $Ra = 0,02 \mu\text{m}$ .  
(SADÍLEK, 2009)



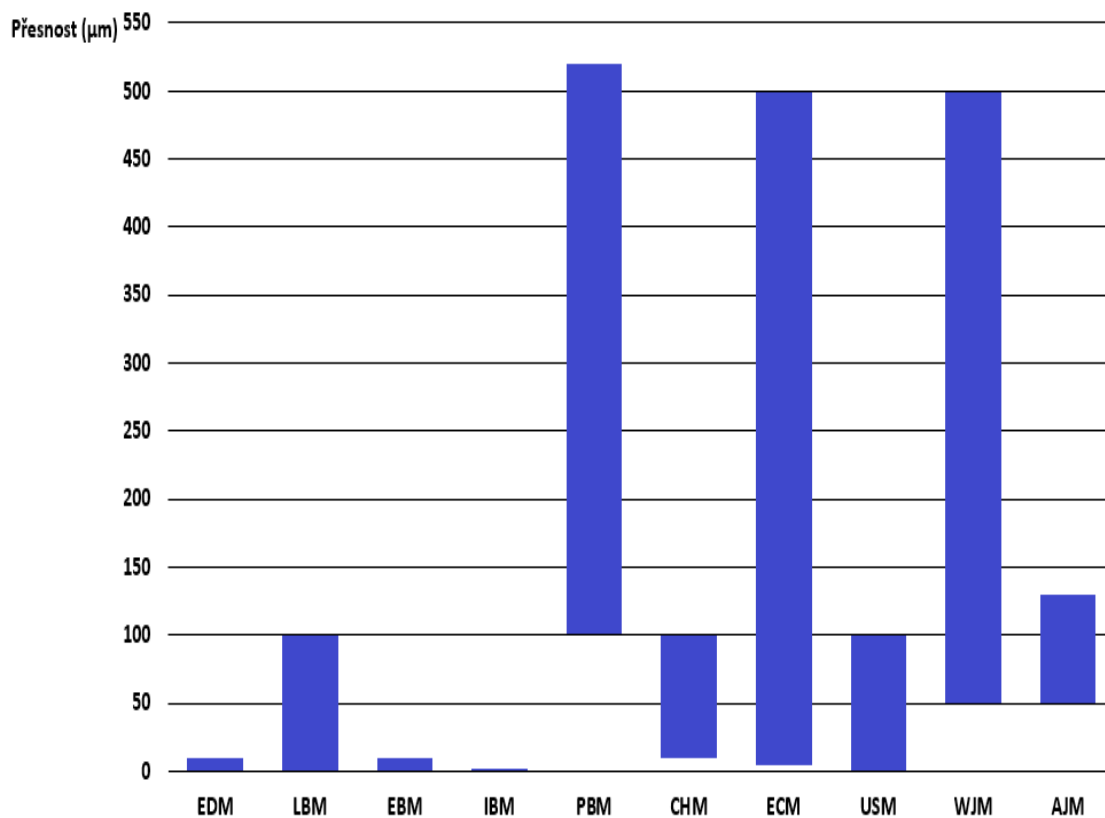
Obr. 25 – Porovnání nekonvenčních technologií dle dosahované drsnosti povrchu

Dalším důležitým kritériem, ovlivňujícím ve velké míře kvalitu a jakost výrobku, je jeho geometrická a rozměrová přesnost. Hodnoty přesnosti výroby nekonvenčních metod obrábění jsou uvedeny v Tab. 7, a graficky znázorněny na Obr. 26.

Tab. 7 - Výběr nekonvenční technologie z hlediska přesnosti výroby (MIČIETOVÁ, 2001)

Přesnost [ $\mu\text{m}$ ]	USM	WJM	CHM	ECM	EDM	LBM	EBM	IBM	PBM
$< \pm 1$							X	X	
$\pm 1$ až $\pm 5$	X				X	X	X		
$\pm 5$ až $\pm 10$	X			X	X	X	X		
$\pm 10$ až $\pm 50$	X		X	X		X			
$\pm 50$ až $\pm 100$	X	X	X	X		X			
$\pm 100$ až $\pm 500$		X		X					X
$\pm 500 <$									X

Dosahovaná přesnost rozměrů u technologie AJM (obrábění proudem brusiva) se pohybuje v rozsahu 0,05 až 0,13 mm, tj. 50 až 130  $\mu\text{m}$ . (SADÍLEK, 2009)



Obr. 26 – Porovnání nekonvenčních technologií dle dosahované přesnosti výroby

## 6 ZÁVĚR

Především neustálý tlak ze strany konkurence a náročné požadavky zákazníků jsou v dnešní době hlavními důvody, které nutí technology a také konstruktéry pracovat na nových řešeních a postupech při strojírenské výrobě, z čehož plyne i potýkání se s novými problémy. Mezi nejčastější problémy či požadavky, které se musí řešit, patří snaha o co největší zlepšení kvality výrobku (součásti), zjednodušení výrobního postupu, zkrácení strojních časů při jednotlivých operacích, možnost rychlé změny výrobního programu, a v neposlední řadě ekonomické hledisko. Výhodiskem pro řešení složitých situací, vznikajících prostřednictvím výše zmíněných požadavků, a často se vyskytujících v technické praxi, je použití nekonvenčních způsobů obrábění.

S rostoucími požadavky na vyšší produkci obrábění vysoce pevných, nebo tvrdých materiálů (např. kompozitní materiály, titan, slinuté karbidy, atd.), se nekonvenční metody obrábění dostávají stále více do popředí. Hlavním důvodem je, že konvenční metody obrábění nejsou vždy ekonomicky výhodné a technicky vhodné pro obrábění zmíněných materiálů. Nekonvenční metody obrábění tedy nachází uplatnění zejména v případech, kdy jsou konvenční (klasické) způsoby nevhodné, nebo příliš málo účinné. Avšak i nekonvenční technologie obrábění mají své slabé stránky, mezi které patří vysoká pořizovací cena obráběcího zařízení, u některých metod vysoká energetická náročnost (laser), nebo menší produktivita, a samozřejmě také nutnost ekologické likvidace pracovních kapalin, používaných při obrábění.

Nekonvenční způsoby obrábění využívají pro odebrání materiálu nejrůznější fyzikální principy (tepelné, mechanické, chemické, elektrochemické). Pro výběr optimální nekonvenční technologie je zapotřebí brát v úvahu celou řadu hledisek. Obecně však nelze jednoznačně říci, která z technologií je nejlepší či nejhorší, každá má své výhody i nevýhody. Volba optimální nekonvenční technologie závisí na technologovi, který musí při jejím výběru zohlednit profil a funkci obráběné součástky, a rovněž další parametry, jako např. drsnost povrchu, přesnost rozměrů, pevnost, apod.

Všeobecně platí, že nejlepšími výsledky drsnosti povrchu, dosahujeme při obrábění iontovým paprskem. Rovněž z hlediska přesnosti výroby má obrábění iontovým paprskem nejlepší hodnoty, avšak značnou nevýhodou je vysoká pořizovací cena technického zařízení. Naopak nejméně přesnou metodou je obrábění paprskem plazmy.



## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

### Literární zdroje

- [1] BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: ČVUT, 1989. 122 s.
- [2] DILLINGER, J. *Moderní strojírenství pro školu i praxi*. Praha: Europa Sobotáles, 2007. 612 s. ISBN 978-80-86706-19-1.
- [3] HLUCHÝ, M. – KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu – 1. díl*. 2. vyd. Praha: Scientia, 1999. 216 s. ISBN 80-7183-150-6.
- [4] KOČMAN, K. – PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [5] MÁDL, J. – KAFKA, J. a kol. *Technologie obrábění – 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000. 81 s. ISBN 80-01-02091-6.
- [6] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Košice: Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [7] MIČIETOVÁ, A. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. 376 s. ISBN 80-7100-853-2.
- [8] PÍŠKA, M. a kol. *Speciální technologie obrábění*. Brno: CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [9] ŘASA, J. – GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3, 1. díl*. Praha: Scientia, 2000. 256 s. ISBN 80-7183-207-3.
- [10] ŘASA, J. – GABRIEL V. – POKORNÝ P. *Strojírenská technologie 3, 2. díl*. Praha: Scientia, 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.

- [11] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [12] ŠČERBEJOVÁ, M. *Strojírenská technologie*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. 132 s. ISBN 80-7157-083-4.

### **Elektronické zdroje**

- [13] HUMÁR, A. *Technologie I, technologie obrábění – 3. část* [online]. Brno, 2005, [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)>.
- [14] ŘASA, J. – KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění* [online]. 2007-07-19 [cit. 2017-01-28]. Dostupné z: <<http://mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>>
- [15] ŘASA, J. – KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 4. díl* [online]. 2008-03-19 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <<http://mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>>.
- [16] ŘASA, J. – KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 5. díl* [online]. 2008-05-12 [cit. 2016-10-19]. Dostupné z: <<http://mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>>.
- [17] ŘASA, J. – KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 6. díl* [online]. 2008-06-11 [cit. 2016-10-21]. Dostupné z: <<http://mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>>.
- [18] ŘASA, J. – KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 8. díl* [online]. 2008-10-08 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <<http://mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>>

## 8 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AJM	Abrasive jet machining	Obrábění proudem brusiva
AWJM	Abrasive water jet machining	Obrábění abrazivním vodním paprskem
EBM	Electron beam machining	Obrábění elektronovým paprskem
ECM	Electro chemical machining	Elektrochemické obrábění
EDM	Electro discharge machining	Elektroerozivní obrábění
CHM	Chemical machining	Chemické obrábění
IBM	Ion beam machining	Obrábění iontovým paprskem
LBM	Laser beam machining	Obrábění laserovým paprskem
PBM	Plasma beam machining	Obrábění paprskem plazmy
USM	Ultrasonic machining	Ultrazvukové obrábění
WJM	Water jet machining	Obrábění vodním paprskem
YAG	Yttrium aluminium granát	( $Y_3Al_5O_{12}$ )

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

### Seznam obrázků

Obr. 1 - Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění (ŘASA, 2001).....	13
Obr. 2 - Výboje mezi nástrojem a obrobkem (HUMÁR, 2005).....	14
Obr. 3 - Elektrojiskrové hloubení při pohybu v jedné ose (HUMÁR, 2005) .....	17
Obr. 4 - Schéma stroje pro elektrojiskrové hloubení (SADÍLEK, 2009) .....	18
Obr. 5 - Princip elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou (HUMÁR, 2005).....	18
Obr. 6 - Příklady výrobků - řezání drátovou elektrodou ( <a href="http://mmspektrum.com">http://mmspektrum.com</a> ) .....	19
Obr. 7 - Princip stroje pro elektrokontaktní dělení materiálů (ŘASA a kol., 2001).....	20
Obr. 8 - Zařízení pro anodomechanické dělení materiálu (HUMÁR, 2005).....	21
Obr. 9 - Záření běžného zdroje světla a laseru (HUMÁR, 2005).....	22
Obr. 10 - Schéma zařízení pro obrábění laserem ( <a href="http://mmspektrum.com">http://mmspektrum.com</a> ).....	23
Obr. 11 - Plynový laser - princip a schéma (HUMÁR, 2005) .....	24
Obr. 12 - Působení laserového paprsku (HUMÁR, 2005).....	25
Obr. 13 - Příklad výrobku vrtáním laserem ( <a href="http://mmspektrum.com">http://mmspektrum.com</a> ) .....	25
Obr. 14 - Princip vrtání elektronovým paprskem a typický průřez vrtaného otvoru (SADÍLEK, 2009).....	26
Obr. 15 - Schéma zařízení pro obrábění paprskem elektronů ( <a href="http://mmspektrum.com">http://mmspektrum.com</a> ) .....	27
Obr. 16 - Schéma iontového obráběcího zařízení (SADÍLEK, 2009) .....	28
Obr. 17 - Schéma zařízení pro obrábění paprskem plazmatu (PÍŠKA a kol., 2009).....	29
Obr. 18 - Konstrukce plazmových hořáků (HUMÁR, 2005) .....	29
Obr. 19 - Chemické rozměrové leptání (HUMÁR, 2005) .....	31
Obr. 20 - Elektrochemické reakce při obrábění Fe v roztoku NaCl (HUMÁR, 2005)...	32
Obr. 21 - Elektrochemické honování – schéma (HUMÁR, 2005) .....	34
Obr. 22 - Technologie obrábění ultrazvukem - princip metody (HUMÁR, 2005).....	36
Obr. 23 - Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem (HUMÁR, 2005) .....	38
Obr. 24 - Schéma řezací hlavice (HUMÁR, 2005).....	38
Obr. 25 – Porovnání nekonvenčních technologií dle dosahované struktury povrchu ....	46
Obr. 26 – Porovnání nekonvenčních technologií dle dosahované přesnosti výroby .....	47

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Přehled nekonvenčních metod obrábění (MIČIETOVÁ, 2001) .....	11
Tab. 2 - Materiály nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění (KOCMAN a kol., 2001) .....	15
Tab. 3 - Typy pracovních kapalin (SADÍLEK, 2009) .....	30
Tab. 4 - Elektrolyty pro elektrochemické obrábění (ŘASA a kol., 2001) .....	33
Tab. 5 - Obrobitelnost materiálů ultrazvukem (ŘASA a kol., 2001).....	37
Tab. 6 - Výběr nekonvenční technologie z hlediska kvality povrchu (MIČIETOVÁ, 2001) .....	46
Tab. 7 - Výběr nekonvenční technologie z hlediska přesnosti výroby (MIČIETOVÁ, 2001) .....	47