



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Nekonvenční technologie obrábění

Non-conventional Material Removal Processes

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor:

Vedoucí práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Ondřej Doucha

Praha 2015

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny jsem uvedl dle zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, v seznamu použité literatury.

V Praze, dne 27. 5. 2015

Podpis:

Děkuji Ing. Pavlovi Novákovi, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce a za cenné rady. Dále bych rád poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku této bakalářské práce a také těm, kteří mi byli oporou po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje nekonvenčním technologiím obrábění a možnostem jejich využití v technické praxi. Jsou v ní stručně popsány mechanismy úběrů jednotlivých technologií, jejich výhody, nevýhody a limity použití stejně tak jako výčet praktických použití, materiálů pro výrobu nástrojů či látek používaných při obrábění.

Součástí práce je také srovnání uvedených metod na základě různých kritérií.

Klíčová slova: obrábění, konvenční metody, nekonvenční metody, mechanické obrábění, elektrotepelné obrábění, chemické obrábění, elektrochemické obrábění.

DOUCHA, O. *Nekonvenční technologie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Abstract

This bachelor thesis is focused on non-conventional material removal processes and possibilities of their practical use. Mechanisms of material removing for each process are briefly described, advantages, disadvantages and use limitations are listed as well as a list of practical applications, tool materials or other chemical substances used in these methods.

This thesis also includes a comparison of methods based on various criteria.

Key words: machining, conventional processes, non-conventional processes, mechanical processes, thermal processes, chemical processes, electro-chemical processes

DOUCHA, O. *Non-conventional material removal processes*. Prague: Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, 2015. 51 p. Tutor Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Obsah

Obsah	5
1 Úvod	7
2 Konvenční metody obrábění	8
2.1 Metody s definovanou geometrií nástroje	8
2.2 Metody s nedefinovanou geometrií nástroje	8
3 Nekonvenční metody obrábění	9
3.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění	9
3.2 Mechanický princip	10
3.2.1 Ultrazvukové obrábění	10
3.2.2 Obrábění vodním paprskem	13
3.2.3 Obrábění proudem brusiva	16
3.3 Chemický princip	19
3.3.1 Chemické obrábění	19
3.4 Elektrochemický princip	22
3.4.1 Elektrochemické technologie obrábění	22
3.5 Elektrotepelný princip	26
3.5.1 Elektroerozivní technologie obrábění	26
3.5.2 Obrábění paprskem fotonů (Laser)	30
3.5.3 Obrábění paprskem plazmy	34
3.5.4 Obrábění paprskem elektronů	37
3.5.5 Obrábění paprskem iontů (IBM)	40
4 Srovnání konvenčních a nekonvenčních metod obrábění	43
5 Závěr	47
6 Seznam použité literatury a internetových zdrojů, seznam obrázků a tabulek	48
6.1 Seznam tabulek:	48
6.2 Seznam obrázků	49
6.3 Seznam použité literatury a internetových zdrojů	50

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
NMO	-	Nekonvenční metody obrábění
USM	-	Ultrasonic Machining
WJM	-	Water Jet Machining
AJM	-	Abrasive Jet Machining
CHM	-	Chemical Machining
ECM	-	Electro-chemical Machining
EDM	-	Electro Discharge Machining
LBM	-	Laser Beam Machining
EBM	-	Electron Beam Machining
IBM	-	Ion Beam Achining
PBM	-	Plasma Beam Machining
AWJM	-	Abrasive Water Jet Machining
IJM	-	Ice Jet Machining
ASJ	-	Abrasive Slurry Water Jet
GAP	mm	Mezera mezi nástrojem a obrobkem
CBN	-	Kubický nitrid boru
Ra	μm	Drsnost

1 Úvod

Nekonvenční nebo také fyzikální metody obrábění většinou k úběru materiálu nepoužívají mechanickou práci. Mnohé z nich už jsou v praxi dlouhodobě používány a jsou velmi progresivní.

Vybral jsem si toto téma práce právě proto, že v dnešní době je velmi důležité se orientovat v různých metodách obráběcích procesů, aby bylo možné pro každý úkol zvolit vhodný výrobní postup.

Ve druhé kapitole rozdělím a stručně popíšu konvenční metody obrábění, ve třetí kapitole se budu věnovat rozdělení, popisu, vysvětlení principů a některým oblastem použití nekonvenčních metod, ve čtvrté kapitole se budu snažit vzájemně porovnat metody obrábění podle různých kritérií.

2 Konvenční metody obrábění

Tabulka 1: Základní rozdělení konvenčních metod obrábění, vlastní zdroj, zpracováno dle [5]

2.1 <u>Metody s definovanou geometrií nástroje</u>	
1. Soustružení	- nejpoužívanější metoda pro výrobu rotačních a rovinných ploch, závitů, dělení materiálu - hlavní rotační pohyb obrobek, posuvy nástroj
2. Frézování	- druhá nejpoužívanější metoda, výroba rovinných a tvarových ploch, drážek, závitů a ozubení - hlavní rotační pohyb nástroj, ostatní pohyby obrobek (u některých nástrojů vřeteník)
3. Vrtání, vyhrubování, vystružování a zahlubování	- vytvoření a zpřesnění děr, výroba kuželovitých otvorů, úprava ploch - hlavní rotační pohyb i posuv většinou nástroj
4. Vyvrtávání	- obrábění předzhotovených děr, pro větší průměry - hlavní rotační pohyb nástroj
5. Hoblování a obrážení	- výroba rovinných a tvarových ploch - hlavní přímočarý pohyb obrobek nebo nástroj
6. Protahování a protlačování	- velmi produktivní, výroba tvarových a rovinných ploch - hlavní přímočarý pohyb nástroj
2.2. <u>Metody s nedefinovanou geometrií nástroje</u>	
1. Broušení	- ke hrubování i dokončování, různé metody, často vysoké řezné rychlosti
2. Leštění	- minimální úběr materiálu, především vzhledové
3. Honování	- dokončování vnitřních a vnějších válcových ploch
4. Lapování	- obrábění volným brusivem mezi obrobkem a nástrojem, vysoká přesnost a jakost povrchu
5. Superfinašování	- dokončování rotačních a rovinných ploch, superpozice pohybu nástroje a obrobku

3 Nekonvenční metody obrábění

„Pod souhrnné označení Nekonvenční metody obrábění (dále jen NMO) zahrnujeme způsoby obrábění, které na rozdíl od klasických technologií třískového obrábění, v převážné míře nevyužívají mechanické práce pro úběr materiálu.“(1)

Základní rozdělení NMO je možné podle principu, na kterém pracují. Dále se budu věnovat jednotlivým metodám zvlášť.

Tabulka 2: Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění, zpracováno dle [5]

3.1 Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění	
3.1 Mechanický princip	
Abrazivní obrábění	
• <i>Ultrazvuk</i>	USM – ultrasonic machining
• <i>Vodní paprsek</i>	WJM – water jet machining
• <i>Proud brusiva</i>	AJM – abrasive jet machining
3.2 Chemický princip	
Chemické obrábění	CHM – chemical machining
3.3 Elektrochemický princip	
Elektrochemické obrábění	ECM – electro-chemical machining
3.4 Elektrotepelný princip	
Elektroerozivní obrábění	EDM – electro discharge machining
Obrábění paprsky koncentrované energie	
• <i>Fotonů (laser)</i>	LBM – laser beam machining
• <i>Elektronů</i>	EBM – electron beam machining
• <i>Iontů</i>	IBM – ion beam machining
• <i>Plazmy</i>	PBM – plasma beam machining

3.2 Mechanický princip

3.2.1 Ultrazvukové obrábění

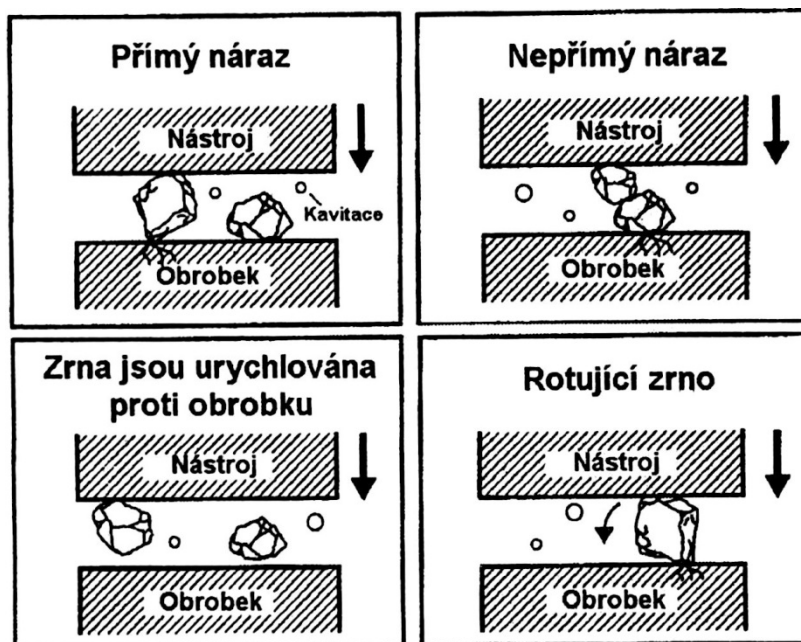
Ultrasonic machining - USM

Při ultrazvukovém obrábění dochází k odběru tvrdých a křehkých materiálů pomocí nástroje, který ve směru své osy osciluje ve frekvencích 18–20 kHz. Během obrábění jsou do prostoru, kde dochází k úběru materiálu neustále doplňovány abrazivní částice, nejčastěji B₄C nebo SiC o velikosti 10-40μm. [2]

Nástroj je většinou vyroben z měkké, houževnaté oceli, nebo z mosazi, jeho vibrace se přenášejí do kapaliny, která unáší částice.

Při ultrazvukovém obrábění využíváme tři mechanismy úběru materiálu:

- Na částice působí statický tlak vyvolaný nástrojem, který způsobuje, že brusná zrna vyštípují z povrchu obrobku části materiálu přibližně své velikosti.
- Rozkmitaná kapalina uděluje hybnost brusným zrnům, které volně naráží do materiálu obrobku a obrušují ho.
- Kmitání nástroje vyvolává v kapalině kavitační jevy, které nadále rozrušují povrch obrobku. Tyto jevy zároveň napomáhají obměně částic v oblasti obrábění.



Obrázek 1: Mechanismy úběru materiálu při USM, [3]

Tvar obráběné plochy odpovídá tvaru nástroje, k největším úběrům dochází v rovinách, které jsou kolmé na směr kmitání, k abrazivnímu otěru pak i na bocích nástroje (odběr je ale řádově menší).

Efektivita ultrazvukového obrábění přímo souvisí s tvrdostí a křehkostí materiálu obrobku – čím je materiál tvrdší, tím méně pohlcuje vibrace a tím lépe se obrábí. Metoda je proto vhodná zejména pro obrábění skla, drahých kamenů a keramiky, slinuté karbidy jsou ultrazvukem obrobitelné již špatně a měkkí materiály touto metodou obrábět prakticky nejde. Z tohoto důvodu jsou nástroje vyráběny z houževnatých materiálů.

Ultrazvukové obrábění je vhodné například pro:

Řezání

- vhodné pro dělení tyčí z křemene či rubínu do tloušťky přibližně 5mm

Hloubení průchozích a neprůchozích děr

- nástroj má tvar trubky pro průchozí díry, max. tloušťka obrobku 10mm
- nástroj má tvar válce pro neprůchozí díry, max. průměr 120mm, hloubka 6mm

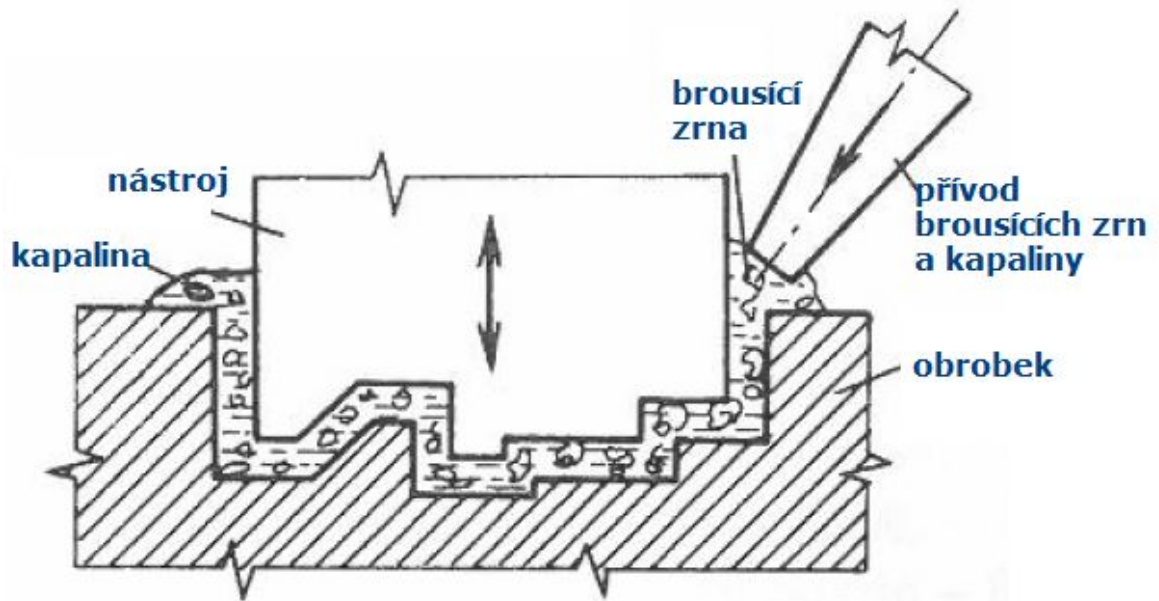
Broušení rovinných ploch

- nástroj většinou tvar misky
- buď s volným brusivem (nástroj měkká konstrukční ocel) nebo diamantový kotouč

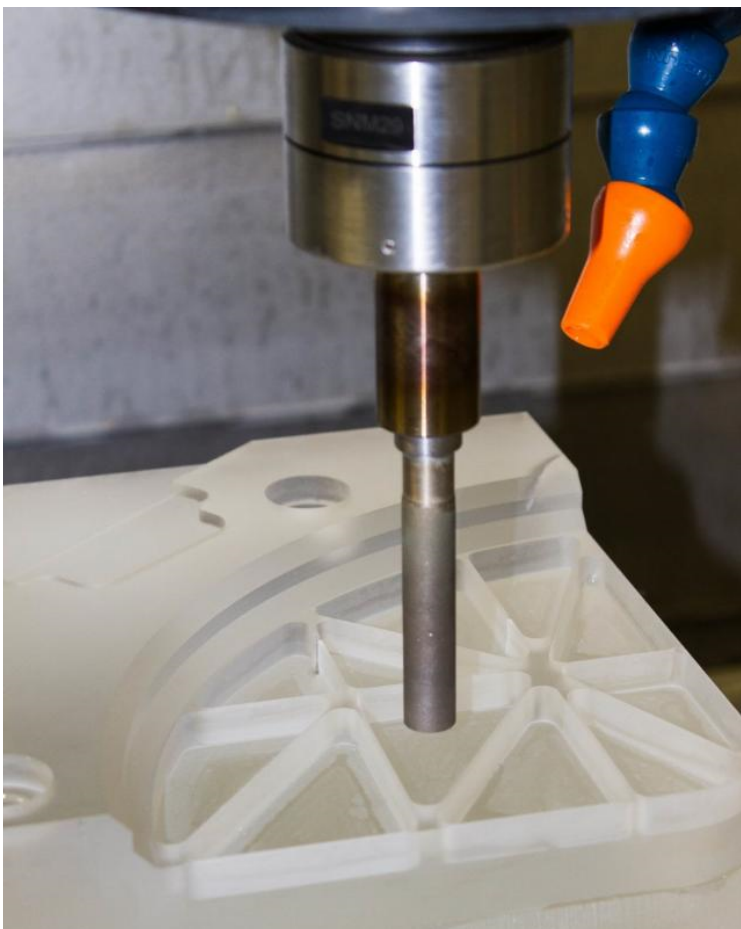
Soustružení, frézování

- bez nárůstku na noži
- lepší kvalita obrobené plochy
- kmitání nástroje redukuje jeho vlastní chvění

Mikroobrábění



Obrázek 2: Princip obrábění ultrazvukem, [18]



Obrázek 3: USM - příklad nástroje a obrobku, [20]

3.2.2 Obrábění vodním paprskem

Water Jet Machining – WJM

Abrasive Water Jet Machining - AWJM

Klíčovým elementem při řezání je zde vodní paprsek. Voda (s případnou příměsí brusiva) putuje rychlostí až 900 m/s a prořezává dělený materiál. V případě dělení tvrdších materiálů je možné do proudu vody přidávat různé druhy brusiva, například granát, Al_2O_3 , křemičitý písek, ocelovou drť a jiné. Je možné použít různé režimy paprsku - pulzující, kontinuální anebo kavitační. [1]

Při řezání je materiál z oblasti proříznuté vrstvy unášen vodním paprskem do kalové nádrže, která se nachází pod řezacím roštem – proto je tato technologie vhodná pro práci v oblastech s vysokými nároky na hygienu nebo pro řezání toxických materiálů. Některé druhy brusiva je možné také recyklovat, stejně tak je možné druhotné použití odpadních materiálů z kalových nádrží. Je možné také recyklovat použitou vodu a snížit tak nároky na provoz stroje.

Oblast řezu není po proříznutí vodním paprskem mechanicky ani tepelně ovlivněna, je proto možné řezat kompozitní materiály jako karbon, či měkké materiály jako papír, dále například kámen nebo potraviny. Samozřejmě je pak i použití pro klasické slitiny a oceli. Další výhodou této metody je relativně vyšší energetická účinnost (85%) proti laseru (10%). [3]

Pro použití například v potravinářském průmyslu je možné nahradit vodu jiným médiem, například olejem. Další modifikací této technologie je řezání paprskem ledových krystalů (IJM – Ice Jet Machining nebo CryoJet).

V současné době brusivo do vodního paprsku přiváděno dvěma způsoby:

- systém s přímým přívodem brusiva (AWJ – Abrasive Water Jet), kde je brusivo přivedeno do směšovací komory a vysokotlaký vodní paprsek ho strhává a urychluje. (Tlak vody 7-400 MPa, průtok abraziva $1-20 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$.) [3]
- systém s přímým vstřikováním brusiva (ASJ – Abrasive Slurry Water Jet), do dýzy se přivádí již smíšená suspenze brusiva s vodou. (Tlak do 100 MPa, průtok suspenze okolo $20 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$.) [3]

System ASJ umožňuje využít kompaktnější dýzu a menší průměr paprsku.

Vodní paprsek je vhodný například pro:

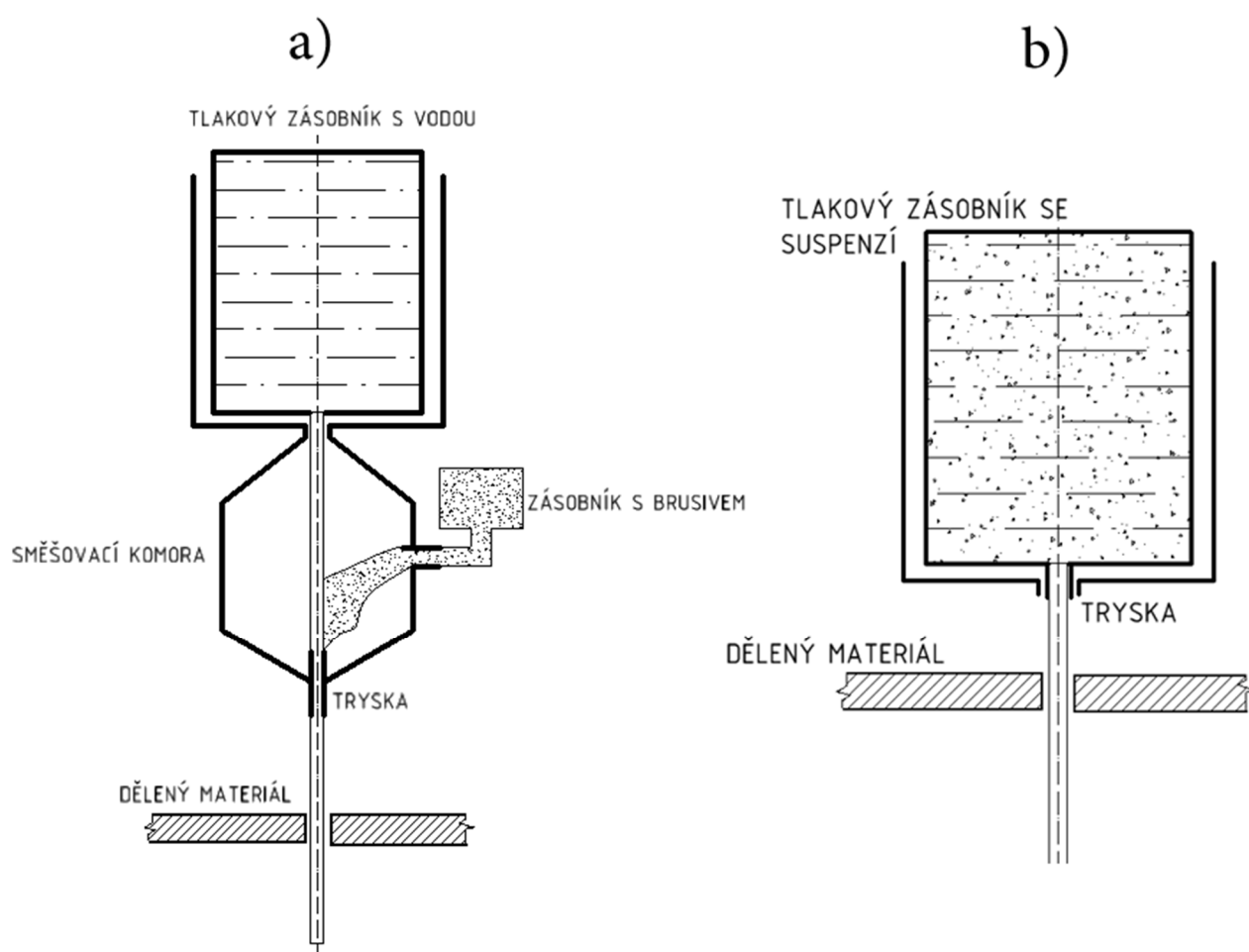
Řezání:

- možno použít pro velkou variaci materiálů, široké možnosti přizpůsobení, hlavní oblast využití vodního paprsku

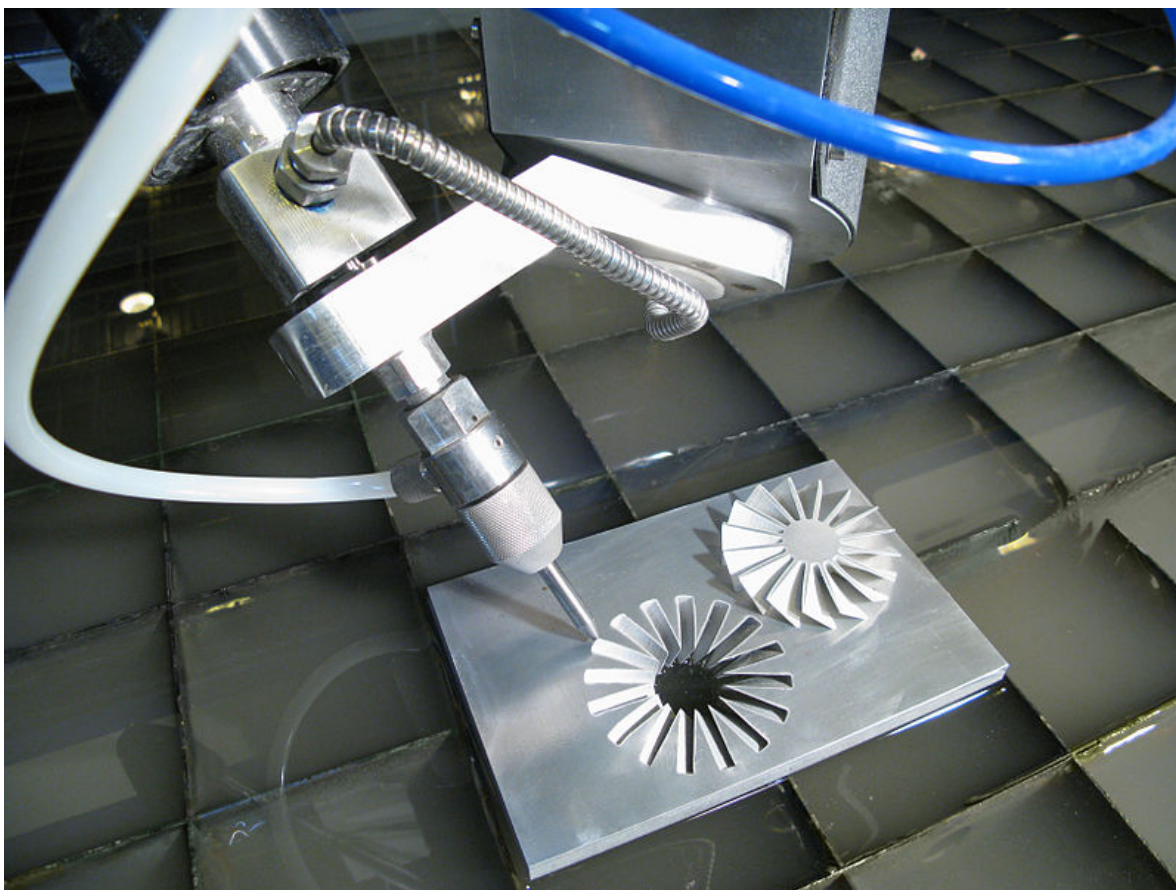
Otryskávání

Gravírování

Odstraňování otřepů



Obrázek 4: a) schéma systému AWJ, b) schéma systému ASJ, vlastní zdroj



Obrázek 5: WJM – příklad řezací hlavy a obrobku, [19]

3.2.3 Obrábění proudem brusiva

Abrasive Jet Machining – AJM

Abrasive Flow Machining - AFM

Při této metodě obrábění je odběr materiálu realizován proudem brusiva, které je unášeno stlačeným plynem (vzduch, CO₂, NO₂) rychlostí 150-300 m.s⁻¹. Tato směs je na povrch obrobku směřována tryskou, většinou z umělého saříru, wolframu nebo slinutého karbidu, o velikosti výstupního otvoru 0,05 – 0,2 mm². [3]

Kužel brusiva má po výstupu z trysky úhel přibližně 60°. Z toho vyplývají limity této metody zejména v oblasti přesnosti. Velikost obráběné plochy je ovlivněna mezerou mezi ústím trysky a obrobkem, ta se pohybuje mezi 0,25 – 50mm. [1]

Ve srovnání s pískováním (SB – sandblasting) jsou použité částice brusiva menší a systém kontrolující množství brusiva přesnější.

Používaná brusiva jsou například Al₂O₃ – vhodný pro silné čištění, řezání a odjehlování, MgCO₃ je doporučován pro lehké čištění a gravírování, NaHCO₃ je používán pro velmi jemné čištění a řezání měkkých materiálů. [2]

Pro tuto metodu se nedoporučuje recyklace použitých brusiv, neboť kontaminace a ohlazení brusných částic zpomaluje rychlost obrábění.

Množství brusiva ve směsi je regulováno amplitudou vibrací v mísící komoře nebo přímo množstvím brusiva přidávaným v dýze do směsi (systém podobný AWJ).

Výhodou této metody je možnost obrábět těžkoobrobitelné a křehké materiály, relativně levný provoz vzhledem k možnosti použití vzduchu jako hnacího média a, mimo jiné, minimální ohřev obrobku. Nevýhodou je velký rozptyl paprsku a nízká rychlost obrábění. [5]

Pod řezaný materiál je proti trysce umístěn lapač. Jeho úkolem je ztlumit energii paprsku a zachytit částice řezaného materiálu a brusivo. Jedná se například o trubky plněné keramickými kuličkami.

Modifikací metody AJM je metoda AFM, při které je polotekuté brusné médium protlačováno přes zúženou plochu tvořenou přípravkem a obrobkem. Tato metoda je vhodná pro obrábění průchozích děr, odhraňování obrobku, zaoblování hran či leštění. Používá se například pro leštění forem či povrchovou úpravu svodů spalovacích motorů nebo rotorů turbodmychadel a turbín. Výhodou je také možnost obrábět více děr najednou.

Obrábění proudem brusiva je vhodné například pro:

Vrtání a řezání

- zejména malé otvory a tvary ve skle, keramice či tvrdých litinách

Opracovávání otvorů v elektrotechnice

Gravírování

- například registrační čísla na motorech automobilů

Pískování a matování

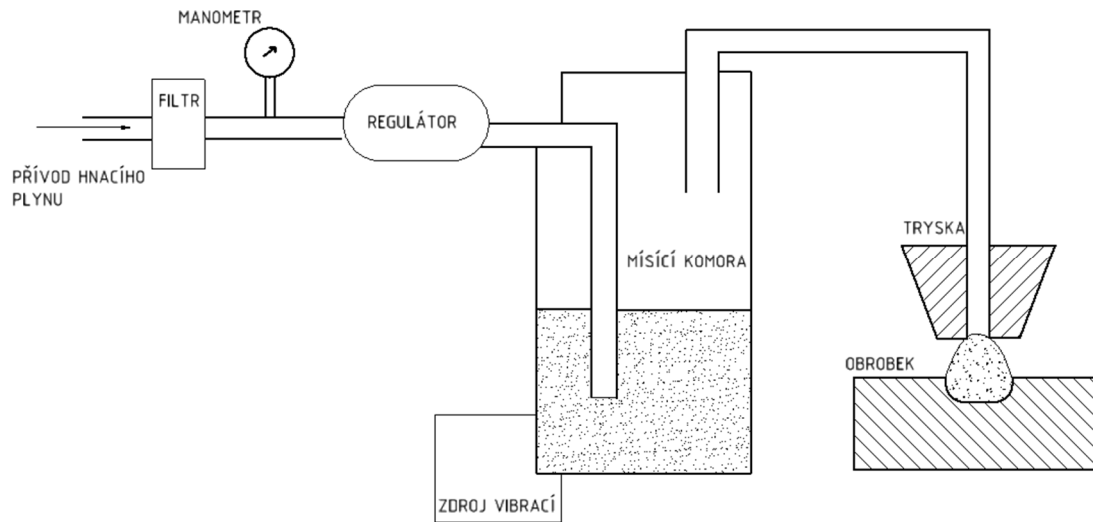
- matování skel
- pískování čísel do tvrzených autoskel

Odjehlování

- například pro turbíny proudových letadel, chirurgické jehly, písty motorů nebo i plastové díly



Obrázek 6: AFM - Lopatky turbíny po obrábění, [21]



Obrázek 7: Schéma stroje pro obrábění proudem brusiva, vlastní zdroj



Obrázek 8: AFM - příklad obrobku před a po obrábění, [8]

3.3 Chemický princip

3.3.1 Chemické obrábění

Chemical Machining – CM

Chemické rozměrové obrábění je jinak označováno také jako chemické frézování. Jedná se o proces, kdy je materiál obrobku leptán při reakci s lázní. Obráběná místa jsou vyznačena šablonou (maskou), která zakrývá plochy, které nechceme leptat. Tyto masky jsou vytvářeny z polyvinylových nebo polyamidových pryskyřic, případně ze speciálních laků. Rychlost obrábění ovlivňuje teplota lázně.

Charakteristické pro tuto metodu je, že doba leptání nezávisí na obráběné ploše ale pouze na hloubce a že dochází k tzv. podřezávání. – úběru materiálu i rovině rovnoběžné s maskou. Podřezávání je charakterizováno leptacím faktorem, viz Obrázek 10.

Doba, po kterou je možné nechat součást v leptací lázni, se odvíjí od odolnosti krycí masky proti proleptání. Od této doby se odvíjí hloubka, do které můžeme maximálně obrábět (udává se maximálně 10-12,7 mm). [4]

Reaktivní prostředí či leptadlo je chemická sloučenina standardně dostupných chemikálií, do které se přidávají látky pro zvýšení smáčivosti (aby bylo zaručeno leptání celé plochy). Použité leptadlo závisí od materiálu obrobku. Pro leptání ocelí a hliníku jsou vhodné kyseliny, pro nikl a měď zásady. Některá doporučená leptadla jsou uvedena v tabulce.

Tabulka 3: Vybraná doporučená leptadla, zpracované podle [4]

Materiál	Druh leptadla	Drsnost Ra [μm]
Titanové slitiny	HF, HNO ₃	0,75÷1,5
Nízkolegované ocele	HNO ₃	1÷2
Korozivzdorné ocele	HNO ₃	0,75÷1,5
Hořčík a jeho slitiny	H ₂ SO ₄	1÷1,5
Hliník a jeho slitiny	NaOH + Na ₂ S	2,5÷4

Při volbě leptadla musíme zvažovat mimo jiné finanční náročnost, požadovanou kvalitu povrchu, hloubku leptání či možnosti chemického poškození materiálu.

Tloušťky masek se většinou pohybují mezi [0,2÷0,4 mm]. Jejich materiál se liší podle materiálu obrobku a leptadla. [4]

Chemické obrábění je vhodné například pro:

Mělké, tvarově složité reliéfy

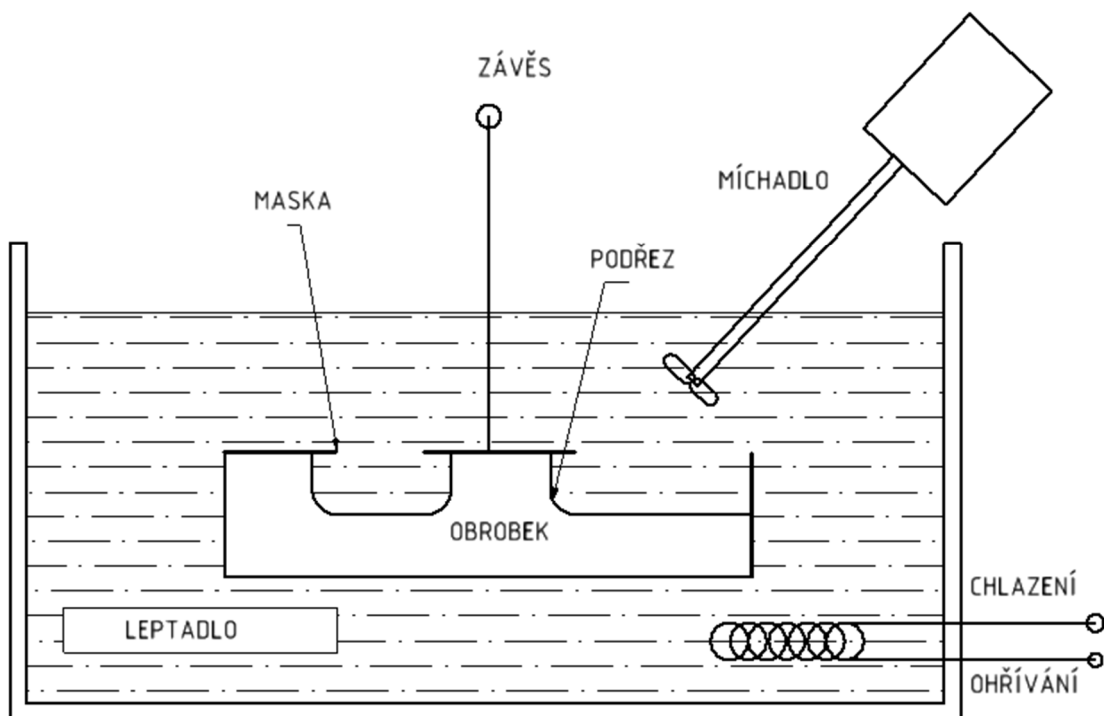
Úběr velkých ploch a malých tloušťek

- Nosníky leteckých konstrukcí, hliníkové plechy pro křídla

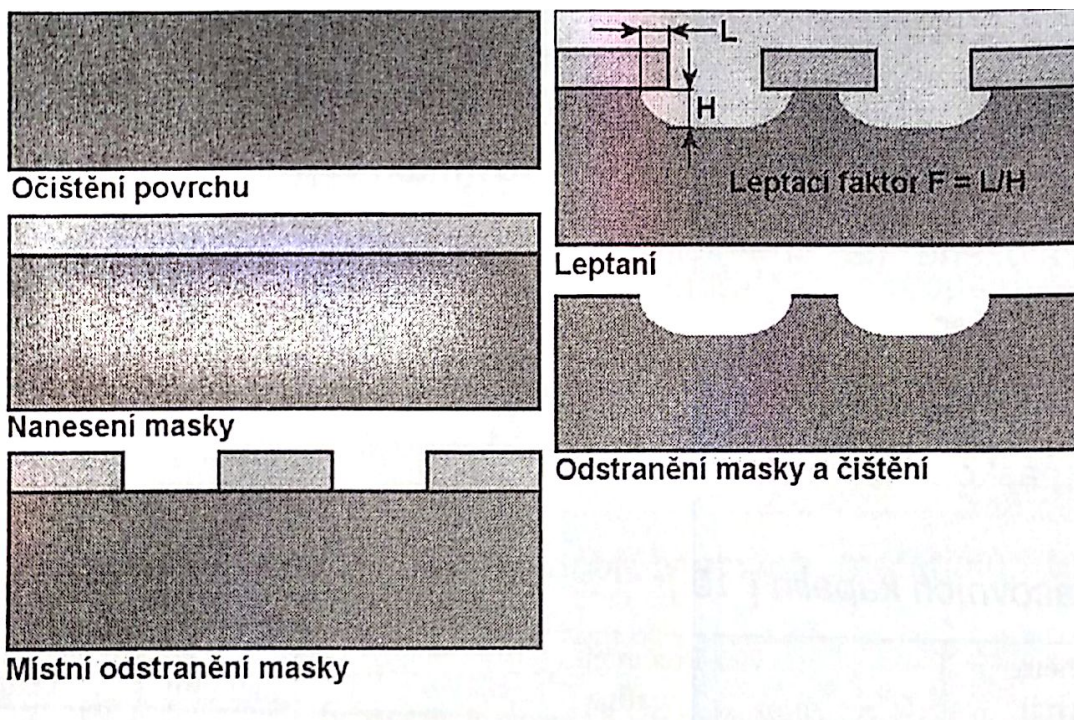
Výroba děr do tenkostěnných a málo tuhých součástí

Desky plošných spojů

Odlehčování součástí



Obrázek 9: Schéma leptací sestavy, vlastní zdroj



Obrázek 10: Chemické rozměrové leptání, [3]



Obrázek 11: CM – hliníkové dveře motorového prostoru Boingu 747 po obrábění, [9]

3.4 Elektrochemický princip

3.4.1 Elektrochemické technologie obrábění

Electro Chemical Machining - ECM

Elektrochemické obrábění je řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu. [3] Tento fyzikální jev je označován jako elektrolýza.

Při tomto procesu dochází na obráběné ploše – anodě k rozpouštění a tvar nástroje – katody se přenáší na obrobek. Nástroj i obrobek jsou ponořeny v kapalině – elektrolytu.

Elektrolýza se řídí Faradayovými zákony.

1. Faradayův zákon: Hmotnost látky vyloučené na elektrodě závisí přímo úměrně na elektrickém proudu, procházejícím elektrolytem, a na čase, po který elektrický proud procházel.
2. Faradayův zákon: Látková množství vyloučená stejným nábojem jsou pro všechny látky chemicky ekvivalentní

Obvod je napájen stejnosměrným či pulzním zdrojem, proudová hustota v místě obrábění se pohybuje mezi 0,5 a 5 A/mm², napětí mezi 10-30 V (El-Hofy uvádí 0,2 – 30V).[2]

Provozní teplota elektrolytů se pohybuje mezi 24 až 65 °C, rychlost posuvu nástroje závisí na obráběném materiálu a parametrech procesu, pohybuje se mezi 0,25 až 20 mm·min⁻¹. [3]

Velikost mezery mezi obrobkem a nástrojem (GAP) závisí na rychlosti posuvu nástroje a na rychlosti obrábění. Při postupném snižování rychlosti úběru materiálu a zachování konstantní rychlosti nástroje dojde ke zkratu. Je proto nutné řízení posuvu s ohledem na změnu rychlosti během obrábění.

Hlavním úkolem elektrolytu je vedení elektrického proudu a odvod tepla a produktů chemických reakcí z prostoru obrábění. Při nedostatečném proudění by docházelo ke zpomalení či zastavení obrábění, kapalina je vedena relativně vysokou rychlostí, až 5 m·s⁻¹. Proudění elektrolytu je velmi důležité a vzhledem k prováděné operaci jsou možné různé způsoby vedení kapaliny v GAP.

Nástroje pro elektrochemické obrábění musí být vyrobeny z elektricky vodivých materiálů a je u nich kladen důraz na dobrou obrobiteľnost, odolnost proti korozi a výbojům. Důležitá je také dostatečná pevnost nástroje. Často jsou používány bronzy, mosazi, korozivzdorné oceli či titan (někdy dokonce slinuté karbidy).

Tvar nástroje má negativní tvar obrobené plochy. Rozměry musí být upraveny dle velikosti nástrojové mezery. Pro cílené řízení průchodu elektrického proudu se nástrojové elektrody opatřují izolační vrstvou, která zamezí kontaktu elektrolytu s povrchem nástroje mimo zvolené oblasti.

Výhodou elektrochemického obrábění je například vysoká kvalita opracovaného povrchu, odpadající nutnost dokončovacích operací (žádné otřepy), nevnášení zbytkových napětí či žádné tepelné ovlivnění povrchu. Další výhodou je dlouhá výdrž nástrojů, které nepodléhají opotřebení.

Elektrochemické obrábění je vhodné například pro:

Hloubení tvarů a dutin

- Dutiny forem, lopatky turbín, tvarové otvory

Hloubení otvorů malých průměrů

- Výroba otvorů do průměru 1 mm do těžkoobrobiteľných materiálů
 - o elektrolytické vrtání tvarovou trubicou
 - o jemné elektrochemické vrtání
 - o elektrolytické vrtání proudem elektrolytu

Elektrochemické soustružení

- rotační tvary obtížně vyrobiteľné na konvenčním soustruhu

Elektrochemické odstraňování otřepů

- dokončovací metoda, výhodné využití vyšší proudové hustoty na hranách

Elektrochemické dělení materiálu

- vyřezávání složitých tvarů či dělení materiálu
 - o rotujícím kotoučem
 - o drátovou elektrodou
 - o štěrbinovým nástrojem

Elektrochemické broušení

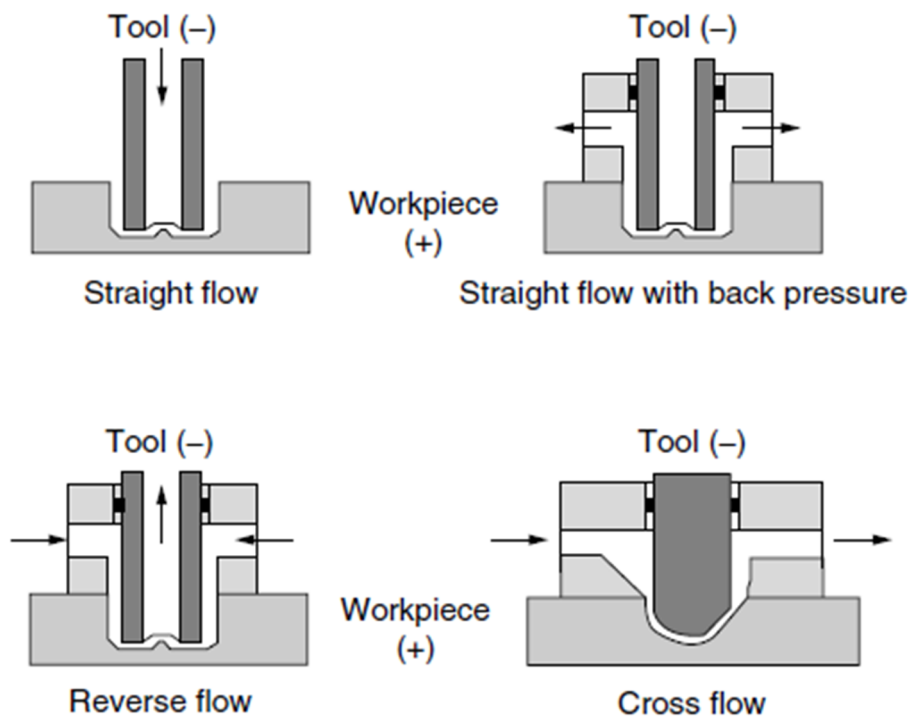
- odběr materiálu zároveň anodickým rozpouštěním a mechanickým účinkem zrn brusného kotouče
 - o broušení s vodivým brusným kotoučem
 - o broušení s nevodivým brusným kotoučem
 - o broušení s volným brusivem

Elektrochemické leštění

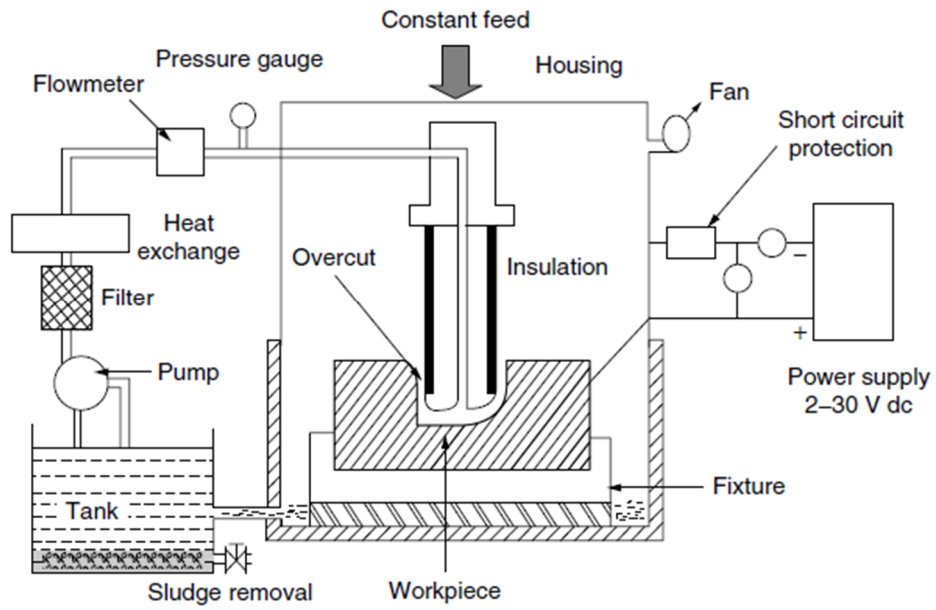
- anodické rozpouštění vrcholků nerovností, využití snížené proudové hustoty v místech s usazeninami (v prohlubních)
- příprava metalografických vzorků, cisterny v potravinářském průmyslu

Elektrochemické honování

- honovací hlavy jsou doplněny elektrodami, většinu materiálu odebrává ECM



Obrázek 12: Různé způsoby vedení elektrolytu [2]



Obrázek 13: Možná sestava ECM přístroje [2]



Obrázek 14: ECM - využití pro výrobu forem, [10]

3.5 Elektrotepelný princip

3.5.1 Elektroerozivní technologie obrábění

Electro Discharge Machining - EDM

Při elektroerozivním obrábění se využívá jevu označovaného jako elektroeroze, jedná se o úběr materiálu v důsledku tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Tento jev se projevuje u všech vodivých materiálů a jeho působením vznikají na povrchu materiálů drobné krátery, jejichž velikost závisí na energii a době trvání výboje.

Nástrojová elektroda i obrobek jsou ponořené do dielektrika s velkým odporem (elektroeroze může probíhat i v plynném prostředí). K odběru materiálu dochází zároveň na obrobku i na nástroji, je proto nutné počítat s postupnou změnou rozměrů nástroje. Impulzní výboje jsou rozloženy po celé aktivní ploše nástroje.

Dielektrikum musí být mimo nízké vodivosti také odolné vůči chemickým změnám, musí mít dostatečně vysokou teplotu vzplanutí, aby nedošlo k ohrožení, nesmí způsobovat korozi ponořených součástí a mělo by mít nízkou viskozitu a dobrou smáčivost, která zajistí rychlé obnovení izolační vrstvy po zániku elektrického výboje.

Většinou nežádoucím jevem (žádoucím při hrubování) je vznik nestacionárního výboje - elektrického oblouku. Je totiž špatně kontrolovatelný a způsobuje velké úběry na obou elektrodách.

Prostor mezi elektrodami je přibližně 0,01 – 0,50 mm, výboj může vznikat buď ve formě jiskry, která má nízkou energii ale teplotu kolem 10 000°C, nebo ve formě oblouku s vysokou energií a teplotou kolem 3600°C, v závislosti na pracovních podmínkách. Tlak v jiskrovém kanálu může dosáhnout až 20 MPa. [2]

Mechanismus úběru materiálu viz Obrázek 15.

Mezi výhody EDM patří možnost obrábění všech vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti, velké možnosti pracovních parametrů, snadná automatizace, jednoduchá výroba nástrojů a realizace operací, které nejsou uskutečnitelné jinými metodami obrábění (výroba děr se zakřivenou osou).

Velkou nevýhodou je nepřímá úměra mezi produktivitou obrábění a jakostí povrchu obrobku a také složité určení výsledné jakosti povrchu, která je ovlivněna mnoha parametry.

Materiál obrobku je po elektrojiskrovém obrábění do určité hloubky tepelně i chemicky ovlivněn.

Elektrojiskrové obrábění je vhodné například pro:

Elektrojiskrové hloubení

- Vytváření tvarově složitých vnějších a zejména vnitřních ploch
- Výroba zápustek, forem pro lití, nástrojů pro lisování plastů, odstraňování zalomených nástrojů

Elektrojiskrové řezání

- Řezání drátovou elektrodou nebo tvarovou drátovou elektrodou
- Výroba střížných a lisovacích nástrojů, dělení velmi tvrdých materiálů

Elektrojiskrové děrování – výroba mikrootvorů

- Výroba otvorů průměru 0,02 až 5mm, hloubka až 100mm [3]
- Elektroda z wolframu

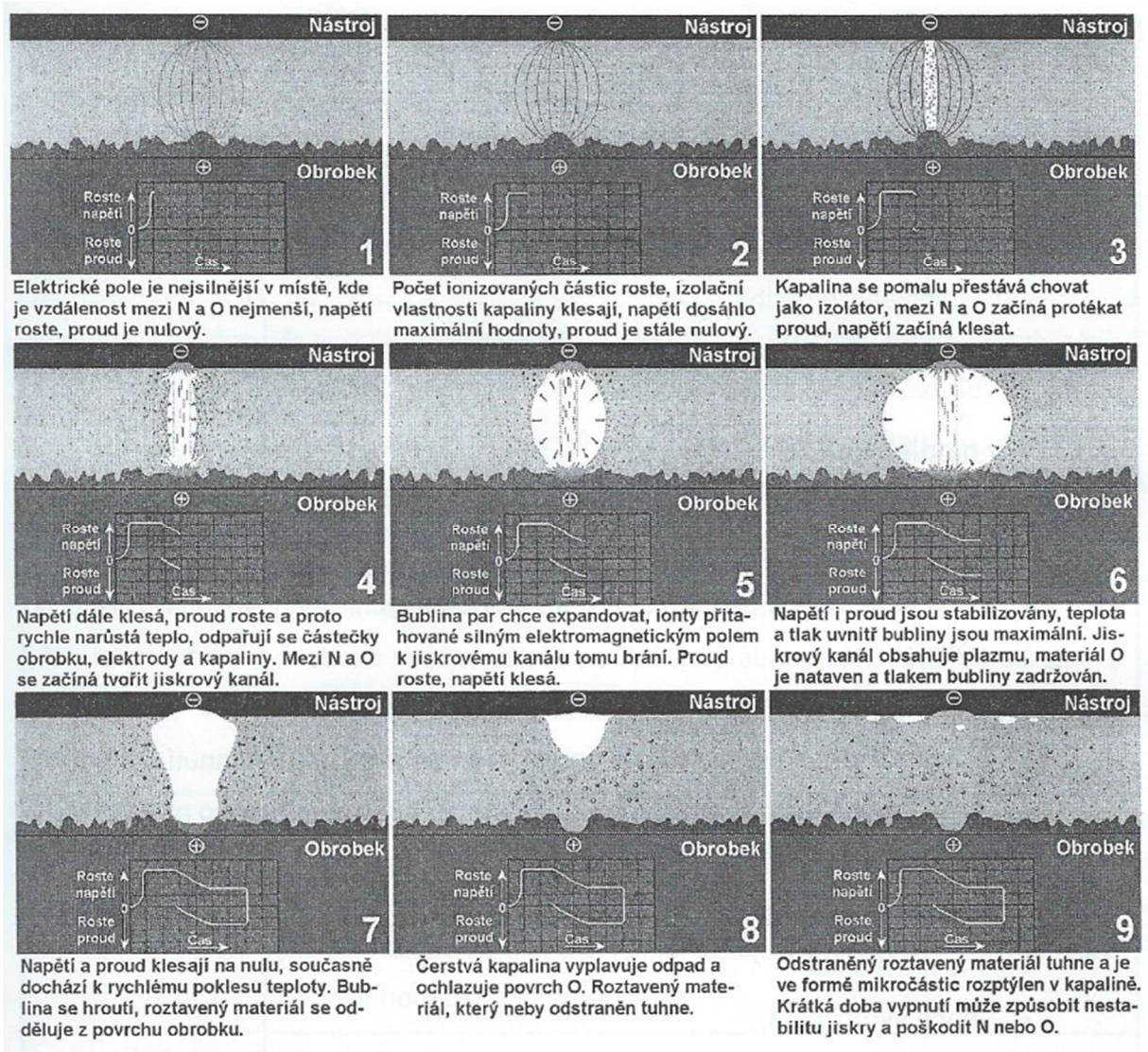
Elektrojiskrové leštění

- Pro menší formy do 100 cm²
- Krátké nízkoenergetické pulzy
- Leštěné elektrody

Elektrojiskrové popisování

Tabulka 4: Materiály nástrojových elektrod, dle [3]

Materiál elektrody	Charakteristika
Mosaz	+ levný, snadno obrobitelný - velké opotřebení
Měď	+ dobrá vodivost, nízké opotřebení - nepracují tak dobře jako mosazné nebo grafitové elektrody
Měď – grafit	vhodný pro obrábění karbidu wolframu
Grafit	+ dobře obrobitelný, nízké opotřebení - znečišťuje hloubicí stroj
Wolfram	vhodný pro výrobu malých děr do průměru 0,2 mm
Měď – wolfram stříbro - wolfram	pro hluboké drážky, vyrábění slinováním - velmi křehké



Obrázek 15: Průběh výboje mezi nástrojem a obrobkem, [3]



Obrázek 16: EDM - otvor pro povolení zalomeného šroubu M72 v lodním motoru, [11]



Obrázek 17: EDM - nástroje pro výrobu formy na těla telefonů (na obrázku nahoře), [12]

3.5.2 Obrábění paprskem fotonů (Laser)

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - LASER

Při obrábění laserem se využívá stimulované emise záření k produkci světelného paprsku. Tento paprsek je téměř dokonale monochromatický a prostorově koherentní.

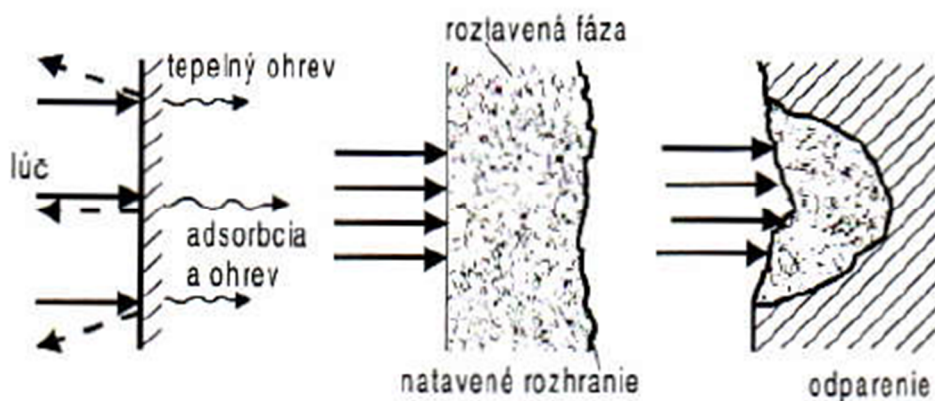
Při ozařování určitých materiálů u jejich atomů k přijetí energie a k excitaci elektronů na vyšší energetickou hladinu. Takový atom se nazývá vybuzeným. Jestliže do jeho sestavy dodáme foton o stejné frekvenci, vrátí se vybuzený atom na nižší energetickou hladinu a dojde k odevzdání energie za jejího současného zesílení. Charakteristickým znakem vynuceně emitovaného záření je monofrekvenčnost a fázová i frekvenční koherence se zářením stimulujícím.

V průmyslu se používají různé aktivní materiály, druhy laserů se většinou rozlišují právě podle druhu aktivní látky (například CO₂ laser). Lasery mohou pracovat buď v pulzním, nebo v kontinuálním režimu.

Tabulka 5: Rozdělení laserů, [4]

Druh lasera	Aktivní látka		Vlnová délka [μm]	Typ lúča	Výkon lasera	Oblasti aplikácie
PEVNÝ	Rubin	Cr ³⁺	0,6943	pulzný	5 W	Holografia
	Nd-YAG	Nd ³⁺	1,064	kontinuálny pulzný	100 až 1 200W	Strojársky priemysel
	Nd-sklo	Nd ³⁺	1,064	pulzný	2mW	
	alexandrit		0,7 – 0,818	pulzný	10W	
POLOVODIČOVÝ	GaAs		0,80 – 0,90	pulzný	2 až 10mW	Informačné technológie optoelektronika
PLYNOVÝ	CO ₂ (N ₂ + He)	CO ₂	10,6	kontinuálny alebo pulzný	500 až 15 000W	Strojársky priemysel
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuálny	20mW	Metrologia, geodézia, holografia
	Ar	Ar ⁺	0,4764; 0,488; 0,5145	Kontinuálny alebo pulzný	1 až 5 000W	Laserová chirurgia
	Excimer (ArCl) (XeCl) (XeF) (KrF)		0,170 0,308 0,351 0,248	pulzný	20W až 250W	Fotolitografia, Laserová chirurgia Strojárstvo
KVAPALINOVÝ	Farbivo Rhodamine 6	Etanol, metanol	0,34 – 1,175	pulzný	100W	Fotochémia, spektroskopia

Paprsek záření emitovaný laserem je usměrňován jednou nebo více čočkami na malou plochu na povrchu obrobku. Paprsek vyvolává takzvanou fotonovou erozi, při které dochází k rozkládání a odstraňování obráběného materiálu důsledkem tepelného působení paprsku. Nejdříve dojde k natavení vrchní vrstvy, ve které došlo k převodu kinetické energie fotonů v tepelnou energii. Při dalším působení paprsku dojde k odpaření materiálu.



Obrázek 18: Účinek laserového paprsku na obráběný materiál, [4]

Vliv na účinnost přenosu energie do materiálu má zejména odrazivost, průsvitnost a tepelná vodivost obrobku. Látky s vysokou odrazivostí absorbují málo tepelné energie a jsou proto laserem obtížně obrobitelné, průsvitné materiály naopak laserový paprsek částečně propouštějí, což také snižuje obrobitelnost. Materiály s vysokou tepelnou vodivostí jsou vzhledem k fotonové erozi méně poddajné. [4]

Odráživost materiálu se mění vzhledem k vlnové délce dopadajícího laserového paprsku, vhodně zvoleným laserem můžeme tento problém minimalizovat.

Posuvy při této metodě vykonává obrobek nebo optická soustava, samotný laser zůstává na místě. Tok laserového paprsku je usměrňován zrcadly a pomocí polopropustných zrcadel či optických vláken může být rozveden i na více pracovišť z jednoho emitoru.

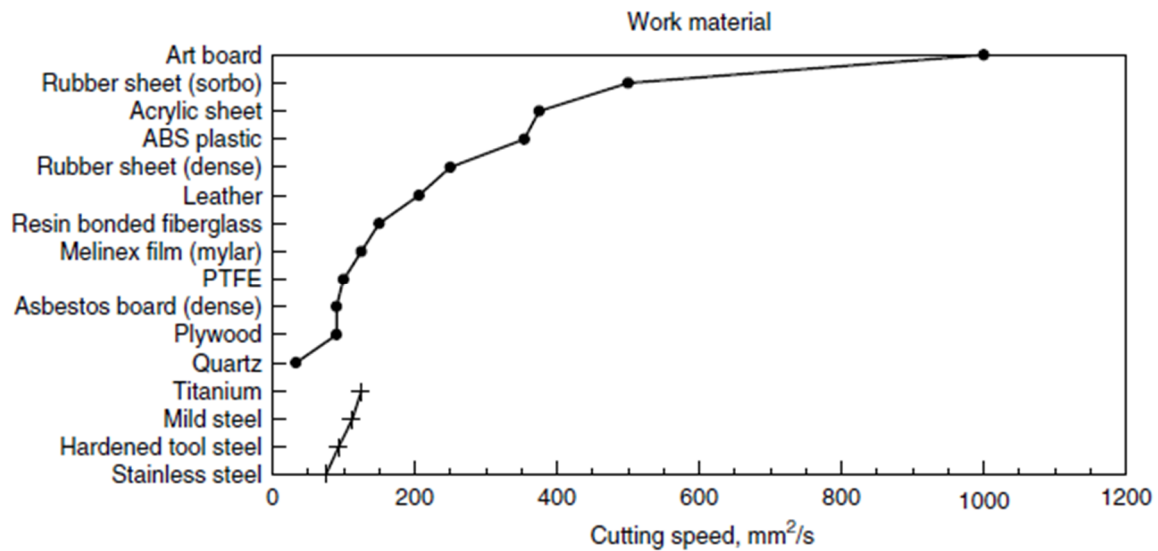
Mezi výhody obrábění laserem patří vysoká rychlost obrábění, výborná možnost automatizace, nedochází k opotřebení stroje, levný provoz, možnost obrábění tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů.

Nevýhodou je například vysoká cena zařízení, obtížná výroba neprůchozích děr, omezená tloušťka řezaného materiálu, kuželovitý tvar proříznuté mezery.

Obrábění laserem je vhodné například pro:

Laserové řezání

- Nejčastěji pomocí CO₂ laseru, až 80% z celkového počtu nasazených laserů [4]
- Roztavený materiál je z řezu vytlačován proudem takzvaného asistenčního plynu, který může být inertní (např. pro zabránění opalu - argon) či například oxidační, pro vznik přídavného tepla (kyslík).



Obrázek 19: Řezné rychlosti CO₂ laseru, [3]

Vrtání otvorů pomocí laseru

- pro vrtání malých otvorů do slabých materiálů (folie)
- pro obrábění velmi těžko obrobitelných slitin například pro proudové motory kde ostatní nekonvenční metody zaostávají svou pomalostí
- vrtání děr do diamantových kalibrů pro výrobu drátů tažením
- vrtání děr pod úhlem

Popisování pomocí laseru

- odstranění malé povrchové vrstvy, případně barevné odlišení zahřátého kovu



Obrázek 20: LASER - vzor pro přerušování třísky na CBN destičce, [13]



Obrázek 21: LASER - stenty pro roztahování cév, složený a rozložený tvar, [14]

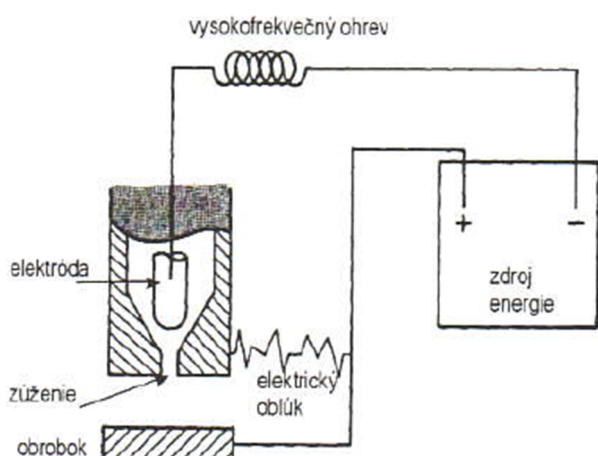
3.5.3 Obrábění paprskem plazmy

Plasma Beam Machining – PBM

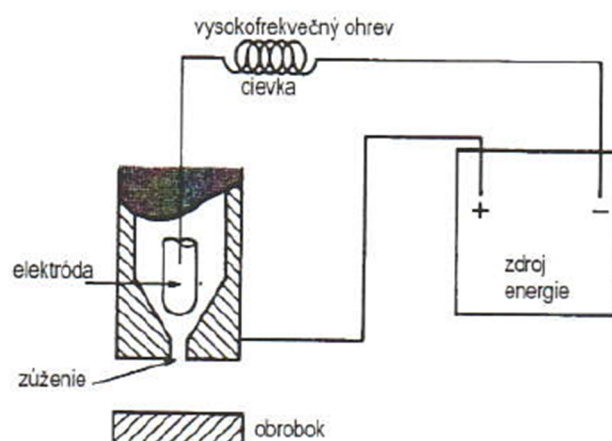
Při zvýšení teploty plynu nad 2000 °C dochází k rozdělení molekul na jednotlivé atomy, při dalším zvýšení teploty se tyto atomy ionizují. Plyn v tomto stavu se nazývá plazma.

Obrábění plasmou probíhá buď přímo odpařením materiálu, nebo jeho roztavením a následným vyfouknutím asistenčním plynem. Dalším možným využitím je obrábění s předeřevem, při kterém plazmový hořák zvýší teplotu obrobku a následně konvenční třísková technologie nahřátý materiál odebere. Se zvýšenou teplotou se sníží tvrdost a pevnost obráběného materiálu.

Metody obrábění paprskem plazmy se liší způsobem vytvoření ionizovaného plynu. Ten může vznikat průchodem proudu plynu elektrickým obloukem, který hoří mezi netavicí se katodou a vodivým obrobkem (transferovaný plazmový oblouk). Při tomto způsobu vznikají teploty až 33 000 °C. [2]



Obrázek 23: Řezání transferovaným plazmovým obloukem, [4]



Obrázek 22: Řezání netransferovaným plazmovým obloukem, [4]

Dalším způsobem je umístění chlazené anody přímo jako součásti řezací trysky (netransferovaný plazmový oblouk). Je možné řezání i nevodivých materiálů ale vzniká výrazně nižší teplota (16 600 °C) [2] protože anodické teplo odvádí chladicí médium a toto teplo není použito pro řezání.

Při použití asistenčního plynu je často využívání clonění pomocí kuželu dalšího plynu či vody, který kolem řezného paprsku vytváří bariéru a zabraňuje negativnímu ovlivnění řezu atmosférickým vzduchem.

Stejně jako u řezání laserem dochází v obrobku k teplotnímu ovlivnění. Hloubka tepelně ovlivněné vrstvy je 0,25 až 1,25mm. [3]

Při použití této metody vzniká relativně široká řezná mezera. Její stěny mají navíc rozdílnou kolmost, vzhledem k vířivému pohybu plynu.

Mezi výhody metody patří vyšší kvalita řezu při řezání tlustších materiálu ve srovnání s řezání plamenem a nižší náklady pro řezání tenkých plechů ve srovnání s laserem.

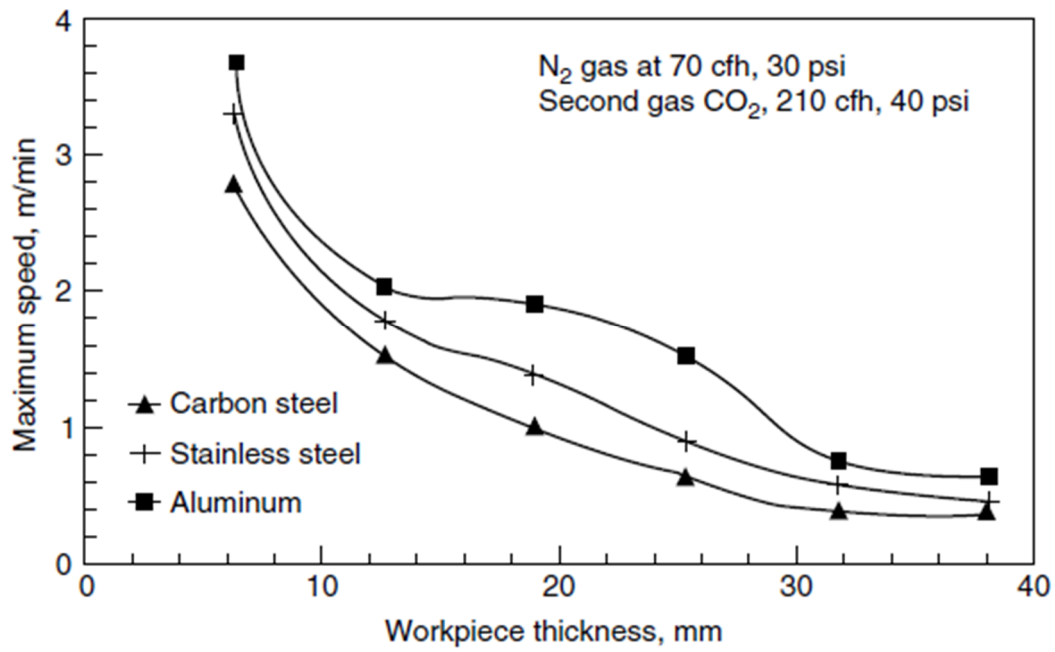
Nevýhodou jsou například vyšší náklady oproti řezání plamenem, horší kvalita řezu ve srovnání s laserem a silný odklon roviny řezu.

Obrábění plazmou je vhodné například pro:

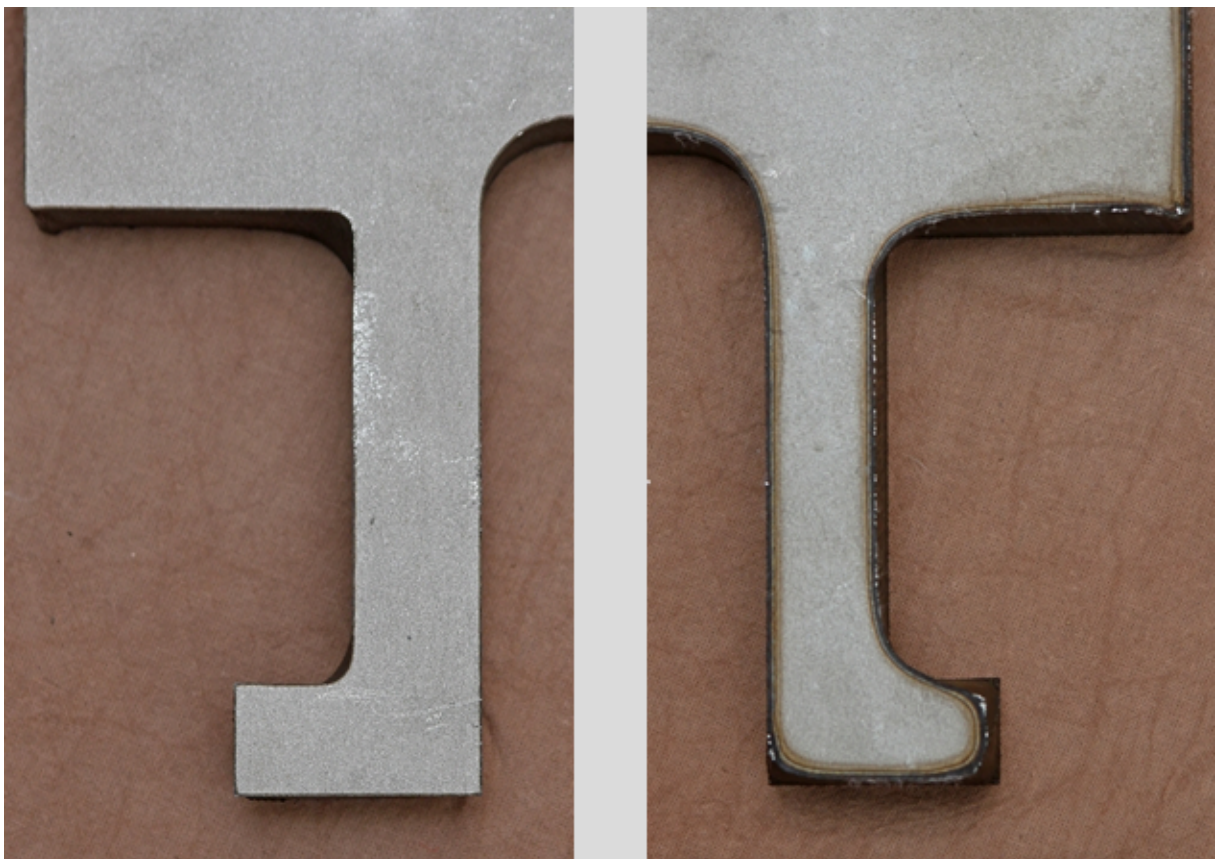
Řezání paprskem plazmy

- Slitiny hliníku a mědi, korozivzdorné oceli

Obrábění s předehřevem plazmovým paprskem



Obrázek 24: Obrobitelnost různých materiálu pomocí plazmového paprsku a plynovou clonou, [2]



Obrázek 25: PBM - obrobek po řezání, pohled z horní (vlevo) a spodní strany (vpravo), [15]

3.5.4 Obrábění paprskem elektronů

Electron Beam Machining – EBM

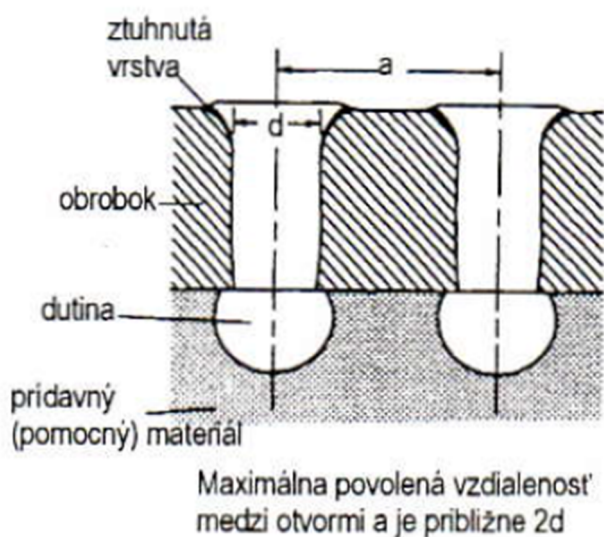
Při této technologii obrábění jsou pracovním médiem elektrony, které jsou vyzářeny z titanové katody, která je zahřátá na 2500 – 3000 °C. Množství vyzářených elektronů závisí na materiálu elektrody a na napětí mezi katodou a anodou. Toto napětí může být až 150 kV. [2]

Toto napětí urychluje proud elektronů ve směru k obrobku. Zaostření paprsku probíhá pomocí magnetických či elektronických čoček. Rychlost proudu elektronů může být až $\frac{3}{4}$ rychlosti světla protože celý proces probíhá ve vysokém vakuu. [3]

Průměr plochy dopadu elektronového svazku na povrch obrobku je kolem 0,25 mm.

Vysoká kinetická energie elektronů je po nárazu do materiálu obrobku velmi rychle převedena na tepelnou energii a dojde k odpaření materiálu. Elektronové dělo pracuje v pulzech.

Tato metoda umožňuje dosahovat vysokých poměrů délky k průměru děr, až 100:1.



Obrázek 26: Typický průřez vyvrtaného otvoru metodou EBM, [4]

Mezi výhody obrábění paprskem elektronů patří vysoká účinnost, použitelnost na všechny druhy materiálů, dobrá možnost automatizace, dobrá opakovatelnost a přesnost, není ovlivněno reflektivitou obrobku.

Nevýhody jsou například vysoká pořizovací cena, dlouhé časy před začátkem procesu z důvodu nutnosti dosažení vakua a vznik radioaktivního záření.

Obrábění paprskem elektronů je vhodné například pro:

Vrtání paprskem elektronů

- Otvory o průměru 50 μm pro tryskové motory, otvory v kalibrech pro tažení tenkých drátů, děrování filtrů v chemickém průmyslu (titan, molybden, korozivzdorná ocel)

Dělení materiálu paprskem elektronů

- Stejně použití jako u laseru a plazmového paprsku, omezení velikostí vakuové komory

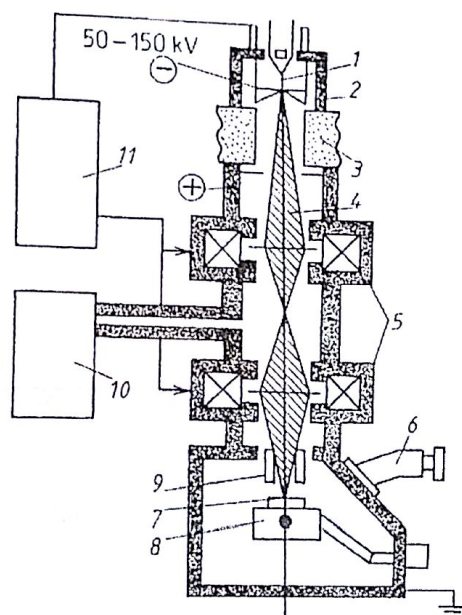
Děrování paprskem elektronů

- Až 5 000 děr za sekundu, v textilním a obuvním průmyslu [4]

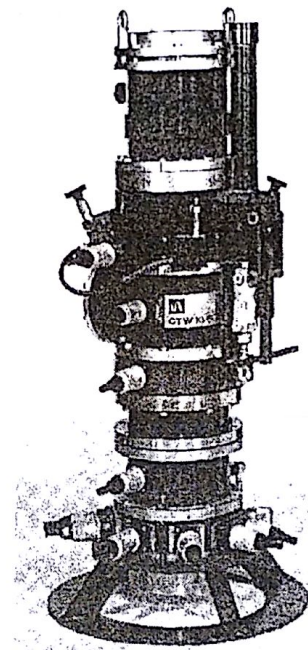
Gravírování paprskem elektronů

- Vyšší přesnost a rychlost než laser

Leštění paprskem elektronů



a)

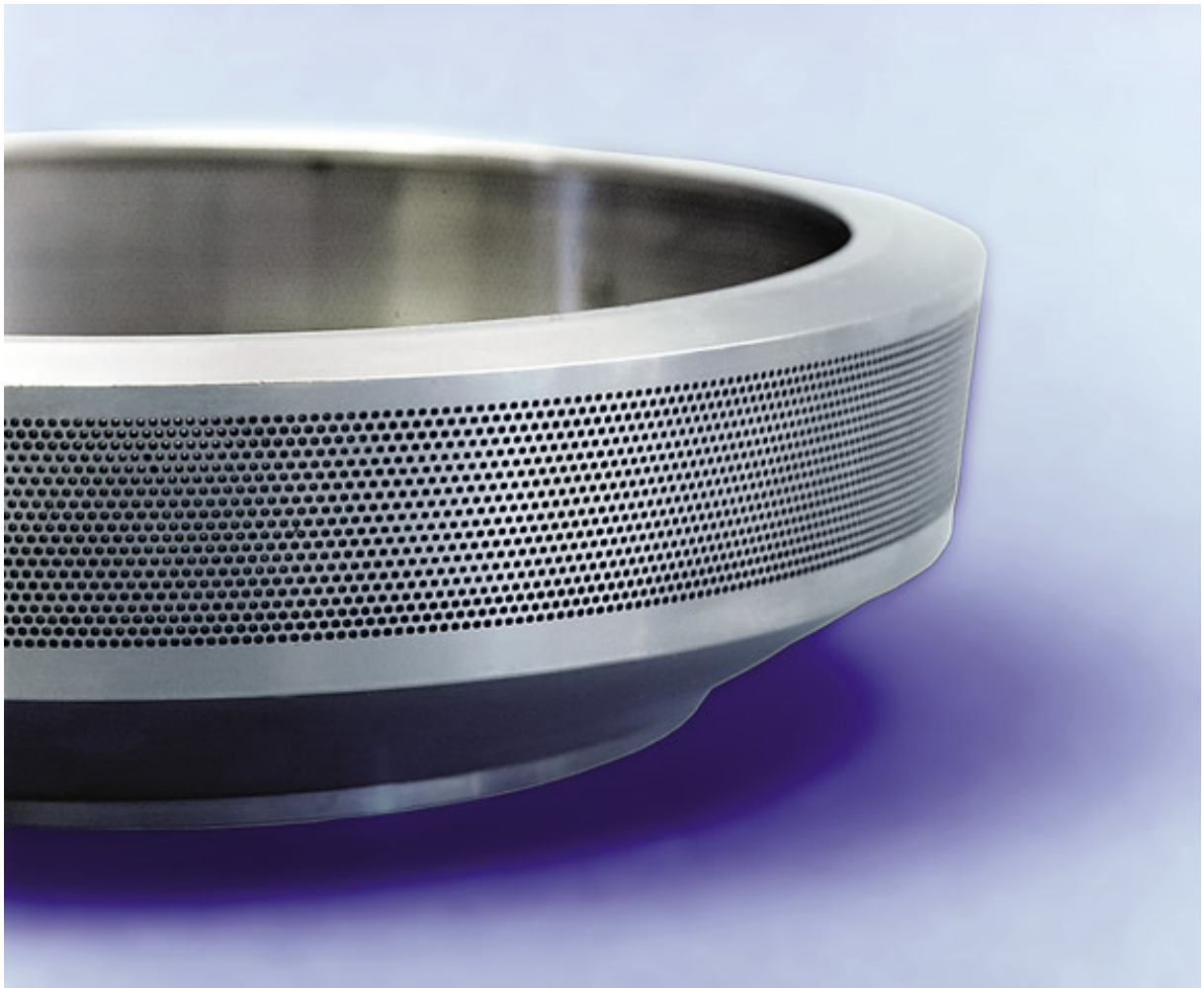


b)

Obr. 8.2 Zařízení pro obrábění elektronovým paprskem [29]

(a – schéma, b – zdroj elektronů – elektronové dělo, 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)

Obrázek 27: Schéma zařízení pro obrábění elektronovým paprskem, [3]



Obrázek 28: EBM - hlavice zařízení pro výrobu optických vláken, 25 600 děr o průměru 0,55 mm bylo vyrobeno pomocí EBM, [16]

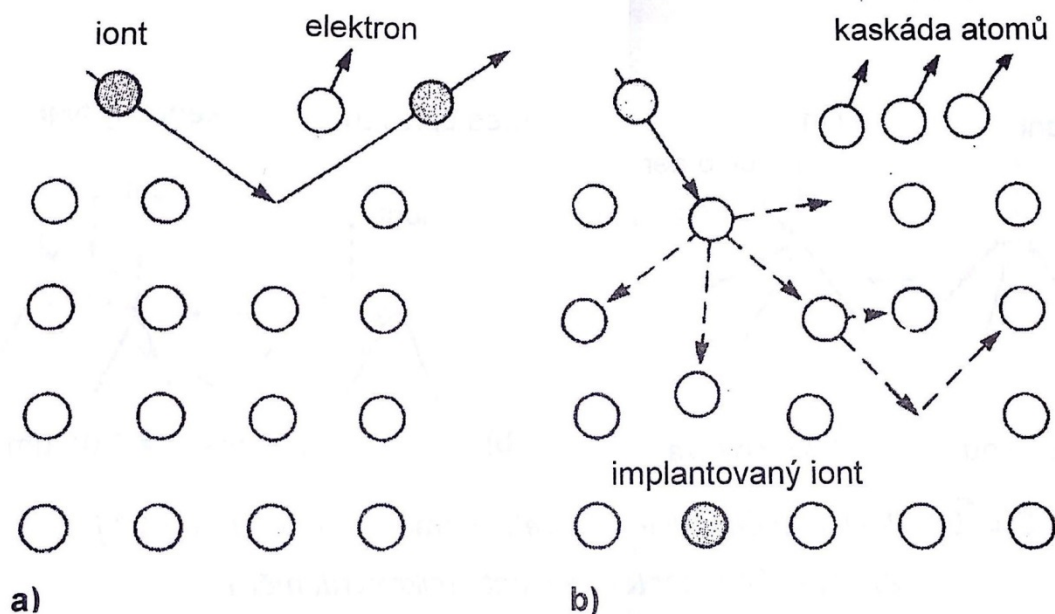
3.5.5 Obrábění paprskem iontů (IBM)

Ion Beam Machining - IBM

Tento proces probíhá ve vakuu, kde je titanová elektroda použita jako zdroj elektronů. Ty jsou urychleny směrem k obrobku a cestou prochází přes látku, kterou ionizuje. Její ionty jsou poté opět pomocí napětí směřovány směrem k obrobku. Proces je podobný EBM ale mechanismus úběru materiálu je zcela odlišný.

IBM procesy se mohou dělit na dynamické a reaktivní procesy. Při reaktivních procesech jsou využity chemicky reaktivní ionty dle materiálu obrobku, proces je rychlejší než chemické metody zpracování protože urychlenými energiemi dopadajících iontů. [4] Dále se budu věnovat pouze procesům dynamickým, které v praxi převažují.

Principem úběru materiálu je u dynamických metod takzvané rozprašování. Při pružné srážce iontů s atomy materiálu obrobku jsou tyto vyraženy z původní pozice, přičemž energie dopadajícího iontu musí být vyšší, než vazebná energie, která drží atomy materiálu při sobě. Při použití iontů s vysokou energií může dojít ke kaskádovému efektu, kdy odloučený atom vyrazí z materiálu další atomy. Může se také stát, že se dopadající iont neodrazí ven z materiálu, ale dojde k jeho implantaci a poškození materiálu obrobku a vrstva s implantovanými ionty se stane amorfni. [17]



Obrázek 29: Princip rozprašování atomů pomocí IBM, a) iont s nízkou energií, b) iont s vysokou energií, [3]

Vzhledem k principu obrábění je použití IBM limitováno materiálem obrobku, který ovlivňuje přesnost výsledného tvaru.

Při obrábění polykrystalických kovů, slitin či slinutých karbidů dochází k nerovnoměrnému zpracování kvůli rozdílným zrnům materiálu, proto je metoda vhodná zejména pro monokrystalické či homogenní materiály. [3]

Obrábění paprskem iontů je vhodné například pro:

Vyhlazování povrchů

- Skla a zrcadla pro lasery

Strukturování povrchu

- Úprava a čištění biologických implantátů za účelem zvýšení životnosti a biokompatibility

Iontové čištění

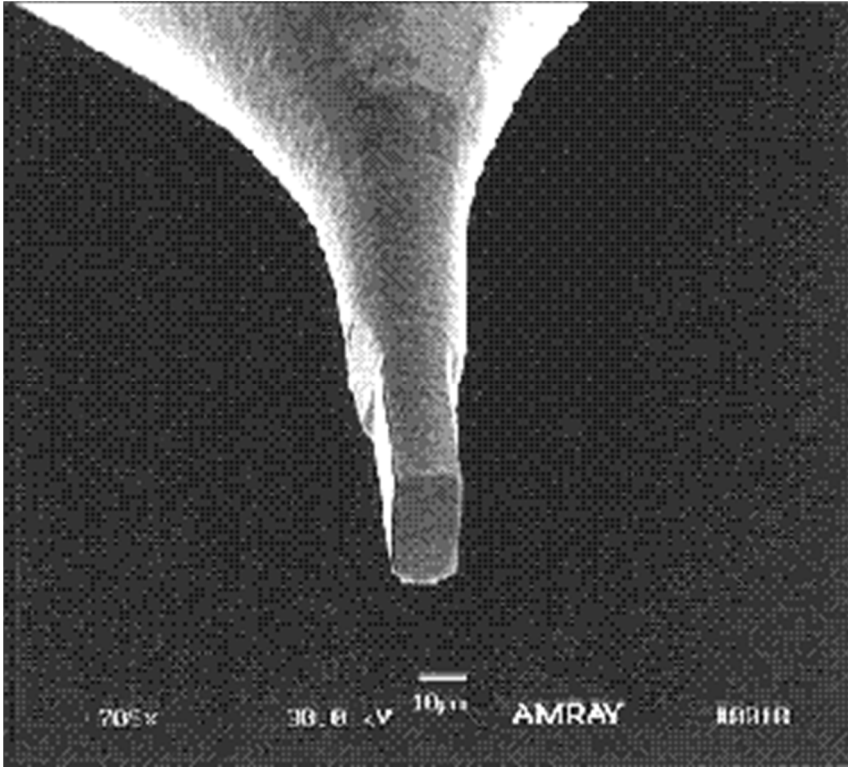
- Odstraňování oxidických filmů a nečistot před nanášením tenkých vrstev

Tvarování a ostření

- Pro ostření a přestřování diamantových nožů pro mikrosoustružení, hrotů dotykových snímačů, rydel, hrotů tvrdoměrů
- Výroba integrovaných obvodů

Iontové frézování

- Tvoření pravidelných drážek pomocí masek



Obrázek 30: EBM - nástroj pro mikroobrábění o průměru 22 µm vyrobený z rychlořezné oceli, měřítko 10µm

4 Srovnání konvenčních a nekonvenčních metod obrábění

Ke srovnání metod obrábění je možné využít nepřehledného množství parametrů. Uváděné hodnoty těchto parametrů u jednotlivých metod jsou však velmi obecné a vzhledem k velké progresivitě fyzikálních metod obrábění již nemusí být zcela aktuální. Přesto mohou sloužit pro představu o přibližných dosahovaných technologických parametrech, energetické náročnosti či vhodnosti použití pro daný úkol.

Tabulka 6: Kritéria pro výběr vhodné metody, dle [4]

Obrobek	tvary, rozměry, druh materiálu, síly řezání, teplota, koroze, citlivost na tlak
Kvalita povrchu	přesnost tvaru a rozměrové tolerance, integrita povrchu, reprodukovatelnost
Hospodárnost	dobu přípravy, výrobní čas, kapitálové náklady, provozní náklady
Provozní náklady	lidské zdroje (požadované vzdělání, zručnost, bezpečnost, pracovní podmínky), organizační (flexibilita, možnost automatizace a integrace do výrobního systému)

Tabulka 7: Aplikační oblasti NMO a KMO dle materiálu, [7]

Obráběný materiál	Nekonvenční metody obrábění								Konvenční obrábění	
	Mech. účinek		Tepelný účinek				Chemický ú.		F	S
	USM	AWJM	EDM	EBM	LBM	PBM	CM	ECM		
Slitiny Al	C	C	B	B	B	A	A	B	A	A
Oceli	B	D	A	B	B	A	A	A	A	A
Superslitiny	C	D	A	B	B	A	B	A	B	B
Keramika	A	D	D	A	A	D	C	D	D	C
Sklo	A	D	D	B	B	D	B	D	D	C
Křemík			D	B	B	D	B	D	D	B
Plasty	B	B	D	B	B	D	C	D	B	C
Lepenky	D	A	D			D	D	D	D	D
Textil	D	A	D			D	D	D	D	D

USM - ultrazvuk, AWJM - vodní paprsek s abrazivem, EDM - elektroerozivní metody, EBM - elektronový paprsek, LBM - laser, PBM - paprsek plazmy, CM - chemické obrábění, ECM - elektrochemické obrábění, F - frézování, S - soustružení.
A - velmi vhodné, B - vhodné, C - obtížné, D - nelze aplikovat.

Tabulka 8: Srovnání vybraných parametrů při výrobě malých otvorů, [3]

Metoda		Elektro- jiskrové děrování	Elektro- chemické vrtání	Vrtání pomocí ultrazvuku	Vrtání laserem	Vrtání elektro- novým paprskem	Vrtání abrazivním vodním paprskem
Hodnotící faktor	Jednotky	EDM	ECM	USM	LBM	EBM	AWJ
nejmenší průměr otvoru	[mm]	0,02 - 5	0,5-1 STEM 0,2-2 ECF 0,125-1 ESD	od 0,003	0,2 CO ₂ 0,025 Nd:YAG	0,01 - 1 běžně 0,05 - 1,1 (o 10% větší než ø paprsku)	0,8 - 2
rychlost obrábění	[mm·min ⁻¹]	0,1 - 1	1 - 3,5	20 - 50 8x vyšší než konv. diamant. nástroje	100 - 8 000	5000 děr/sek úběr 40 mm ² ·s ⁻¹	10 - 1 000
přesnost rozměrů	[mm]	0,01 - 0,2 kuželovitost 0,005 až 0,51	± 0,03 - 0,05	0,02 - 0,05 (průchozí do hl. 3mm) 0,05 - 0,1 (neprůchozí)	změna průměru ± 5 až ± 20% 0,01 - 0,2 0,02d - 0,06d	0,05d až 0,1 d toler. 5 - 20 % d opakovatelnost ø otvoru ± 5%	0,1 - 0,2
hloubka otvoru	[mm]	100	10	8 - 10	50	0,05 - 6,4	100
max. poměr l/d	-	20	200 STEM 100 ECF 50 ESD	3	15	100	-
parametr drsnosti povrchu Ra	[μm]	0,08 - 0,5	0,1 - 1	0,3 - 1,6 <0,4 diamant. nástroje	0,8 - 6,3	1	1 - 10
tepelného ovlivnění materiálu sklon osy od povrchu	[mm] [°]	0,5 - 1,8	0,5 - 1,8	-	0,05 - 0,5	do 0,025	-
neprůchozí otvory	-	LZE	LZE	LZE	NELZE	LZE	NELZE
poznámka	-	-	-	-	-	vyšší účinnost až 95%	-

Tabulka 9: Srovnání vybraných parametrů při tvarovém řezání materiálů, [3]

Metoda		Elektrojiskrové řezání	Řezání laserem	Plazmové řezání	Řezání elektro- novým paprskem	Řezání abrazivním a vodním paprskem
Hodnotící faktor	Jednotky	EDM	LBM	PBM	EBM	WJM, AWJM
max. tloušťka materiálu	[mm]	0,02 až 400	až 50 hospodárné okolo 7	i přes 100 korozi až 130 slitiny Al a Cu až 150	0,5 až 1 (kovy 2 až 3)	0,1 až 200 (dělicí řez)
šířka řezu	[mm]	ø drátu + 0,02 až 0,05	0,02 až 1	až 7 mm nahoře 4,5 mm dole	0,01	0,8 až 1,5 0,3 tenké mat.
šířka řezného nástroje (paprsku)	[mm]	0,03 až 0,35				0,1 až 1,5 WJM 1,2 až 2,5 AWJM
sklon řezu	[°]	± 45°	neomezeně			
rychlost posuvu	[mm·min ⁻¹]	úběr materiálu 8 až 300 mm ² ·min ⁻¹	až 8 000	50 až 6000	až 1200	15 až 1500
přesnost rozměrů	[mm]	0,013 (poloha drátu ± 1°C ± 1 μm ± 3°C ± 3 μm)		nepatří k přesným metodám		± 0,1 až ± 1
parametr drsnosti povrchu Ra	[μm]	0,08 až 0,3 běžně 0,7 až 1,3	3,6 až 12			2,5 až 12
tepelného ovlivnění materiálu	[mm]	0,4 až 1	0,05 až 0,2	0,25 až 1,25 (při chlazení trhliny až do 1,6)		není
kolmost řezu	[°]	-		3° na levé 15° na pravé		0,3° až 6,4°
poznámka	-	-	účinnost až 10%	nepatří k přesným metodám	omezené použití	účinnost až 80%

Tabulka 10: Srovnání vybraných parametrů u výroby tvarových ploch, [3]

Metoda		Elektro-jiskrové hloubení	Elektro-chemické hloubení	Chemické rozměrové leptání	Obrábění ultrazvukem
Hodnotící faktor	Jednotky	EDM	ECM	CM	USM
obráběná plocha	[cm ²]	několik 1000	několik 100 (pro zdroje 10 000A)	max. hl. odleptávané vrstvy 13 mm	do 10 max ø nástroje 120 mm
rychlost (výkon) obrábění	[mm ³ .min ⁻¹]	0,01 až 0,1	0,5 až 10	0,025 mm.min ⁻¹ (max. doba leptání 10 hod.)	i nad 50 (230 grafit, d=10mm), posuv 20 až 50 mm.min ⁻¹ 4 až 140 mm.min ⁻¹ pro grafit
přesnost rozměrů	[mm]	± 0,01 (± 0,005)	± 0,01 – ± 0,2 (typické ± 0,13) ± 0,01 jednoduché tvary ± 0,05 až ± 0,2 složité tvary	± 0,25	± 0,005 až ± 0,03 (0,02 až 0,05 plochy 50 mm ²)
parametr drsnosti povrchu Ra	[μm]	6,3 hrubování 2 až 6,3 střední opr. 0,5 až 2 dokončování	0,1 až 6,3	0,1 až 6,3	0,2 až 1,6
opotřebení nástroje	[%]	1 až 30%	bez opotřebení	bez opotřebení	(od 0,1 %,)
tepelného ovlivnění obrobeného povrchu	[mm]	0,5 až 1,8 (změna mikrostruktury [9] <0,127 hrubování <0,075 dokončování)	0,2 až 5	není	-
vzdálenost mezi nástrojem a obrobkem	[mm]	0,01 až 0,8 0,013 až 0,13	0,05 až 2	není	0,025 až 0,075
objemový úběr materiálu	[mm ³ .min ⁻¹]	běžně 0,1 až 400 max. 5000 (100 až 25 000 u elektroimpulzního hrubování)	20 000 (pro zdroje 10 000A)	dáno kapacitou nádřeže 3,7x15 m	-
poznámka	-	-	přísuvová rychlost 0,5 až 15 mm.min ⁻¹	-	hloubka dutiny 4 až 6 mm

Tabulka 11: Hlavní oblasti využití NMO pro operace obrábění, [4]

Proces	Operácia
USM	výroba rozmerovo malých dielcov, tvarovanie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru
AJM	tvorenie plytkých tvarových drážok, značkovanie, leštenie
WJM	tvarové rezanie, brúsenie, leštenie, výroba drážok a zápichov, vrtanie, frézovanie sústruženie,
ECM	hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru a veľkosti, opracovanie mikro dielcov, leštenie, brúsenie, odstraňovanie ostrapov
EDM	hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru, rezanie a vyrezávanie ľubovoľných tvarov, dierovanie, výroba drážok a zápichov, odstraňovanie ostrapov
CM	hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru, leštenie, odstraňovanie ostrapov, značkovanie
LBM	tvarové rezanie, dierovanie, výroba drážok, obrábanie tvarových plôch, mikroobrábanie,
EBM	opracovanie drobných dielcov, vrtanie, výroba drážok a zápichov, tvarové rezanie
PAM	tvarové rezanie a vrtanie, hĺbenie otvorov a dutín ľubovoľného tvaru ,

Tabulka 12: Srovnání výkonových parametrů vybraných metod obrábění, [6]

Způsob obrábění	Úběr materiálu	Měrná práce	Příkon obráběcího stroje
	Q_v	E_p	P_{os}
	[cm min ⁻¹]	[J·mm ⁻³]	[kW]
Soustružení Frézování	až 1 000	1 – 10	5 – 50
Broušení	5 – 100	5 – 200	5 – 150
Elektroerozivní Obrábění	5	100 – 1 000	10
Plazmové Obrábění	100	500 – 1 000	50 – 150
Obrábění elektronovým paprskem	~ 0,01	1 500	100
Obrábění laserem	0,005	až 30 000	5 – 15
Elektrochemické Obrábění	15 – 25	10 – 100	200
Ultrazvukové obrábění	~ 10	1 000 – 3 000	1 – 5

5 Závěr

Rozšíření použití těžkoobrobitelných materiálů v průmyslu, požadavky na vysokou přesnost výroby, složitost obrobků a jejich výrobní náročnost, všechny tyto a mnohé jiné faktory ovlivnily stále se zvyšující podíl nekonvenčních metod obrábění na celkovém objemu výroby.

Nekonvenční metody obrábění nám umožňují, u specifických úkolů, dosahovat mnohem lepších parametrů obrobku a snižují jeho pracnost ve srovnání s klasickými metodami, nebo dokonce umožňují výrobu součástí, které nejsou realizovatelné konvenčními metodami.

Nekonvenční metody ale nejsou vhodné pro všechny typy výrob a pro všechny materiály, ač většinu z úkolů tradičních obráběcích metod dokážou splnit, často je to finančně velmi nevýhodné, zdlouhavé a energeticky náročné. Při volbě výrobního postupu je nutné toto vše brát v úvahu.

6 Seznam použité literatury a internetových zdrojů, seznam obrázků a tabulek

6.1 Seznam tabulek:

Tabulka 1: Základní rozdělení konvenčních metod obrábění, vlastní zdroj, zpracováno dle [5]	8
Tabulka 2: Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění, zpracováno dle [5]	9
Tabulka 3: Vybraná doporučená leptadla, zpracované podle [4].....	19
Tabulka 4: Materiály nástrojových elektrod, dle [3].....	27
Tabulka 5: Rozdělení laserů, [4].....	30
Tabulka 6: Kritéria pro výběr vhodné metody, dle [4]	43
Tabulka 7: Aplikační oblasti NMO a KMO dle materiálu, [7].....	43
Tabulka 8: Srovnání vybraných parametrů při výrobě malých otvorů, [3]	44
Tabulka 9: Srovnání vybraných parametrů při tvarovém řezání materiálů, [3].....	44
Tabulka 10: Srovnání vybraných parametrů u výroby tvarových ploch, [3].....	45
Tabulka 11: Hlavní oblasti využití NMO pro operace obrábění, [4]	45
Tabulka 12: Srovnání výkonových parametrů vybraných metod obrábění, [6]	46

6.2 Seznam obrázků

Obrázek 1: Mechanismy úběru materiálu při USM, [3].....	10
Obrázek 2: Princip obrábění ultrazvukem, [18].....	12
Obrázek 3: USM - příklad nástroje a obrobku, [20]	12
Obrázek 4: a) schéma systému AWJ, b) schéma systému ASJ, vlastní zdroj	14
Obrázek 5: WJM – příklad řezací hlavy a obrobku, [19].....	15
Obrázek 6: AFM - Lopatky turbíny po obrábění, [21].....	17
Obrázek 7: Schéma stroje pro obrábění proudem brusiva, vlastní zdroj.....	18
Obrázek 8: AFM - příklad obrobku před a po obrábění, [8]	18
Obrázek 9: Schéma leptací sestavy, vlastní zdroj	20
Obrázek 10: Chemické rozměrové leptání, [3].....	21
Obrázek 11: CM – hliníkové dveře motorového prostoru Boingu 747 po obrábění, [9]	21
Obrázek 12: Různé způsoby vedení elektrolytu [2].....	24
Obrázek 13: Možná sestava ECM přístroje [2]	25
Obrázek 14: ECM - využití pro výrobu forem, [10].....	25
Obrázek 15: Průběh výboje mezi nástrojem a obrobkem, [3]	28
Obrázek 16: EDM - otvor pro povolení zalomeného šroubu M72 v lodním motoru, [11]	29
Obrázek 17: EDM - nástroje pro výrobu formy na těla telefonů (na obrázku nahoře), [12].....	29
Obrázek 18: Účinek laserového paprsku na obráběný materiál, [4]	31
Obrázek 19: Řezné rychlosti CO ₂ laseru, [3].....	32
Obrázek 20: LASER - vzor pro přerušování třísky na CBN destičce, [13].....	33
Obrázek 21: LASER - stenty pro roztahování cév, složený a rozložený tvar, [14]	33
Obrázek 22: Řezání netransferovaným plazmovým obloukem, [4].....	34
Obrázek 23: Řezání transferovaným plazmovým obloukem, [4]	34
Obrázek 24: Obrobitelnost různých materiálů pomocí plazmového paprsku a plynovou clonou, [2]...36	
Obrázek 25: PBM - obrobek po řezání, pohled z horní (vlevo) a spodní strany (vpravo), [15]	36
Obrázek 26: Typický průřez vyvrtaného otvoru metodou EBM, [4].....	37
Obrázek 27: Schéma zařízení pro obrábění elektronovým paprskem, [3]	38
Obrázek 28: EBM - hlavice zařízení pro výrobu optických vláken, 25 600 děr o průměru 0,55 mm bylo vyrobeno pomocí EBM, [16].....	39
Obrázek 29: Princip rozprašování atomů pomocí IBM, a) iont s nízkou energií, b) iont s vysokou energií, [3]	40
Obrázek 30: EBM - nástroj pro mikroobrábění o průměru 22 μm vyrobený z rychlořezné oceli, měřítko 10μm	42

6.3 Seznam použité literatury a internetových zdrojů

- [1] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční technologie obrábění*. První. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1989.
- [2] EL-HOFY, Hassan. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill Professional, 2005, 350 p. ISBN 00-714-5334-2.
- [3] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [4] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- [5] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění: 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000, 79s. ISBN 80-010-2091-6
- [6] ŘASA, Jaroslav. *Strojnické tabulky 2*. Praha: Scientia, 2007. ISBN 8086960203.
- [7] HUMÁR, Antonín. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - 3. část. In: *Ust.fme.vutbr.cz* [online]. 2005 [cit. 2015-06-16]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [8] Precision Surface Solutions Overview. *KENNAMETAL* [online]. 2015, 13.6.2015 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/en/products/precision-surface-solutions/precision-surface-solutions-overview.html>
- [9] DAVIS, Joseph. *Aluminum and aluminum alloys*. Materials Park, OH: ASM International, 1993, iii, 784 p. ISBN 08-717-0496-X.
- [10] Medical tooling industry. *STANKOFINEXPO* [online]. 2015 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://stankofinexpo.com/application-field/medical-tooling-industry/>
- [11] Engine stud removal cases increase. *The MotorShip* [online]. 2011 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://www.motorship.com/news101/shiprepair-and-conversion/engine-stud-removal-cases-increase>
- [12] Electrical discharge machining. *SGL Group* [online]. 2014 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: https://www.sglgroup.com/cms/international/applications/tool-and-mold-manufacture/applications/electrical-discharge-machining-edm.html?_locale=en

- [13] Generating the perfect cutting edge on PCD and CBN inserts. *WINTERTHUR Technology Group* [online]. 2015 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://www.winterthurtechnology.com/en/group/solution-finder/wendt-machines/laser-machining.html>
- [14] Rotary stages for laser-machining tubes, stents. *Industrial Laser Solutions* [online]. 2012 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/2012/05/rotary-stages-for-laser-machining-tubes-stents.html>
- [15] PLASMA CUTTING. *INOX SERVICE* [online]. 2013 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://www.inoxservice.hu/index.php/en/plazmavagas>
- [16] EBDs make short work of microholes. *MICRO Manufacturing* [online]. 2013 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://www.micromanufacturing.com/content/ebds-make-short-work-microholes>
- [17] KUMAR, Nishant. Focused Ion-Beam Machining. *Mechanical Rocks* [online]. 2013 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://merooock.blogspot.cz/2013/01/focused-ion-beam-machining.html>
- [18] Nekonvenční způsoby obrábění. JANÍČKOVÁ, Petra. *Učíme v prostoru* [online]. 2014 [cit. 2015-06-14]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573
- [19] 5-Axis-Waterjet-Cutting-Head. *Wikimedia* [online]. 2015, 4.6.2015 [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:5-Axis-Waterjet-Cutting-Head.jpg>
- [20] OptiSonic: The Latest in Ultrasonic Machining Technology from OptiPro. *ConstantContact* [online]. 2015, 13.5. [cit. 2015-06-13]. Dostupné z: <http://events.r20.constantcontact.com/register/event?oeidk=a07ea8afysp5cc55b1a&llr=utl6p7cab>
- [21] Turbines, Pumps, and Impellers Fluid Flow Management. *Extrude Hone AFM* [online]. 2015 [cit. 2015-06-18]. Dostupné z: <http://extrudehoneafm.com/turbines-pumps/3188662>