



Zemědělská
fakulta
Faculty
of Agriculture

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

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH **ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA**

Katedra zemědělské, dopravní a manipulační techniky

Bakalářská práce

Nekonvenční metody obrábění materiálu

Autor práce: Jaroslav Larva

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Zoubek

České Budějovice
2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval(a) pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....
Podpis

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá souhrnem a charakteristikou nekonvenčních způsobů obrábění používaných při strojní výrobě pro zemědělský nebo automobilový průmysl, jako je chemické obrábění, elektrochemické obrábění, elektroerozivní obrábění, obrábění ultrazvukem, obrábění laserem nebo obrábění paprskem elektrod.

První část zahrnuje systematické rozdělení a charakteristiku jednotlivých metod. U každé metody je popsána historie, princip obrábění, zařízení pro obrábění, výhody a typická oblast použití jednotlivých nekonvenčních technologií v technické praxi.

V závěrečné kapitole se nachází porovnání jednotlivých metod v závislosti na dosažené kvalitě povrchu a rozměrové tolerance.

Klíčová slova: Nekonvenční metody obrábění, obrábění laserem, obrábění elektronovým paprskem, chemické obrábění, elektrochemické obrábění, elektrojiskrové obrábění, ultrazvukové obrábění

Abstract

The bachelor thesis deals with the summary and characteristics of unconventional machining methods used in mechanical engineering for the agricultural or automotive industry, such as chemical, electrochemical machining, electroerosive machining, ultrasonic machining, laser machining or electron beam machining.

The first part includes a systematic division and characteristics of individual methods. For each method, the history, machining principle, machining equipment, advantages and typical area of application of individual unconventional technologies in technical practice are described.

The final chapter contains a comparison of individual methods depending on the achieved surface quality and dimensional tolerance.

Keywords: Unconventional machining methods, laser machining, electron beam machining, chemical machining, electrochemical machining, electrospark machining, ultrasonic machining

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Mgr. Tomáši Zoubkovi za odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost při konzultacích, které mi pomohly s vypracováním bakalářské práce.

Obsah

Úvod.....	8
1 Cíl práce	9
2 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění	10
3 Laserová metoda obrábění	11
3.1 Historie	11
3.2 Princip.....	12
3.3 Zařízení pro obrábění laserem	13
3.3.1 Rezonátor	14
3.3.2 Buzení	15
3.3.3 Aktivní prostředí	15
3.3.4 Zaostřovací čočka.....	16
3.4 Materiály vhodné pro obrábění laserem	16
3.5 Druhy laserů	17
3.5.1 Pevnolátkové lasery	17
3.5.2 Plynový laser.....	18
3.5.3 Kapalinový laser.....	19
3.6 Využití v praxi.....	19
4 Obrábění paprskem elektronů	21
4.1 Historie	21
4.2 Princip.....	22
4.3 Zařízení pro obrábění paprskem elektronů.....	22
4.4 Výroba pomocí obrábění elektronovým paprskem	24
5 Obrábění elektroerozivní.....	27
5.1 Historie	27
5.2 Princip.....	27

5.3	Zařízení pro obrábění elektroerozivní metodou	28
5.3.1	Generátory.....	29
5.3.2	Nástrojová elektroda	31
5.3.3	Dielektrikum	32
5.3.4	Filtrace.....	35
5.4	Výroba pomocí elektroerozivní metody.....	35
6	Elektrochemické obrábění.....	37
6.1	Historie	37
6.2	Princip.....	37
6.3	Zařízení pro elektrochemické obrábění	38
6.3.1	Nástroj pro elektrochemické obrábění	39
6.3.2	Elektrolyt.....	40
6.4	Výroba pomocí elektrochemického obrábění.....	41
7	Chemické obrábění.....	43
7.1	Historie	43
7.2	Princip.....	44
7.3	Postup chemického obrábění.....	44
7.3.1	Příprava materiálu	44
7.3.2	Nanášení ochranného filmu.....	44
7.3.3	Leptání.....	46
7.3.4	Finální úprava.....	47
7.4	Výroba pomocí chemického obrábění.....	48
8	Obrábění ultrazvukem.....	49
8.1	Historie	49
8.2	Princip.....	49
8.3	Zařízení pro obrábění ultrazvukem	50
8.3.1	Generátor ultrazvukových kmitů.....	51

8.3.2	Měnič.....	51
8.3.3	Koncentrátor.....	51
8.3.4	Nástroj.....	51
8.3.5	Abraziva a abrazivní kapaliny.....	52
8.4	Výroba pomocí ultrazvukového obrábění	53
9	Volba vhodné technologie obrábění na základě kvality a přesnosti obrobene plochy.....	55
	Závěr	58
	Seznam použité literatury.....	59
	Seznam obrázků	62
	Seznam tabulek	64
	Seznam použitých zkratk.....	65

Úvod

Obrábění je souhrnný termín pro skupinu výrobních procesů, které dávají obrobkům požadovaný geometrický tvar, v daných rozměrech a v daném stupni přesnosti postupným kontrolovaným oddělováním přebytečného materiálu od obrobku.

Nekonvenční metody obrábění jsou souhrnný název pro technologie obrábění které, nevyužívají klasické technologie, ale využívají procesů eroze materiálu. Nástroj se při těchto metodách nikdy nedostává do přímého kontaktu s materiálem. Nástroj většinou produkuje formu energie, která podporuje erozi materiálu a tím dochází k samotnému oddělování materiálu.

1 Cíl práce

Cílem této práce je poskytnout přehled nekonvenčních metod obrábění materiálu využívaných k výrobě kovových dílů používaných pro potřeby konstrukce zemědělské, dopravní či manipulační techniky, poskytnout náhled na vývoj technologie obrábění materiálu a na vybraných příkladech demonstrovat používání nekonvenčních metod obrábění materiálu.

2 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční technologie obrábění lze rozdělit do tří základních skupin, a to podle toho jakou formu energie využívají pro obráběcí proces.

Oddělováním materiálu za působení tepla

- Obrábění paprskem laseru
- Obrábění paprskem elektronů
- Elektroerozivní obrábění

Oddělováním materiálu chemickým a elektrochemickým účinkem

- Chemické obrábění
- Elektrochemické obrábění

Oddělování materiálu mechanickým účinkem

- Ultrazvukové obrábění

Výrazné rozšíření oblasti využití nekonvenčních metod obrábění lze dosáhnout s využitím CNC stolu, který splňuje speciální nároky kladené danou metodou například pro obrábění laserovým paprskem musí tyto stoly odolávat a odvádět vznikající plyny. Zařízení určená pro elektroerozivní metody musí být přizpůsobené na skutečnost, že tento proces probíhá ve vodní lázni.

3 Laserová metoda obrábění

Obrábění laserovým paprskem je jedním z nejpoužívanějších postupů nekonvenčního obrábění založeného na tepelné energii, které lze použít pro velkou škálu materiálů. Laserový paprsek taví a odpařuje nežádoucí materiál z obrobku. Je vhodný pro geometricky složité obrábění, řezání nebo vytváření miniaturních otvorů v plechu. Z různých typů laserů používaných v průmyslových odvětvích se nejvíce osvědčily lasery CO₂. Ve strojírenství se s touto metodou setkáváme nejen u obrábění ale i u gravírování, vypalování a tepelného zpracování.

3.1 Historie

Teoretický základ laseru vytvořil Albert Einstein již v roce 1917 pomocí Planckových zákonů záření, koeficientů pravděpodobnosti absorpce a spontánní a stimulované emise elektromagnetického záření. V roce 1953 Charles Town spolu s postgraduálními studenty vyrobil první MASER což je v podstatě mikrovlnný zesilovač fungující na podobném principu jako laser, ale místo viditelného nebo infračerveného světla používal mikrovlny (VRBOVÁ a kol.,1998; DAHOTRE a spol.,2008).

V roce 1960 Theodor Maiman postavil první prototyp laseru ve výzkumné laboratoři v Malibu, který je zobrazen na obrázku 1. Tento laser využíval syntetický rubín jako aktivní médium vyzařující červený paprsek o vlnové délce 694,3 nm. Jeho první využití bylo v armádě, kde fungoval jako měřič vzdálenosti. V současné době se je tento druh laseru využíván k vrtání do diamantu, k čemuž ho předurčuje jeho vysoký výkon (VRBOVÁ a kol.,1998; DAHOTRE a spol.,2008).

První CO₂ laser zobrazený na obrázku 2, který je jedním z nepoužívanějších laserů ve strojírenství, byl vytvořen Kumanem Patelem v ATaT Bellově laboratoři v roce 1964 a měl výkon pouhý 1 miliwatt, ale již o 3 roky později výkon CO₂ laserů překonal hranici 1 000 wattů. První komerční využití laseru ve strojírenství bylo v roce 1967 kdy Petre Houldcroft ze svařovacího institutu v Cambridge použil CO₂ laser na řezání železného plátu o tloušťce 1 mm. Pokračování ve zdokonalování CO₂ laserů a vzrůstající zájem firem, které objevili jejich potenciál vedlo k vytvoření laserových obráběcích, svařovacích a řezacích strojů. První takový stroj byl vytvořen již v roce 1975. Následné vývoje malých a levných laserů rozšířil použití z kovových materiálů i na plastové, gumové a organické. (PÍŠKA, 2009; DAHOTRE a spol.,2008; DAHOTRE a spol.,2008)



Obrázek 1 První funkční laser sestavený Theodorem Maimanem, zdroj: Engineering and Technology History Wiki. (2019)



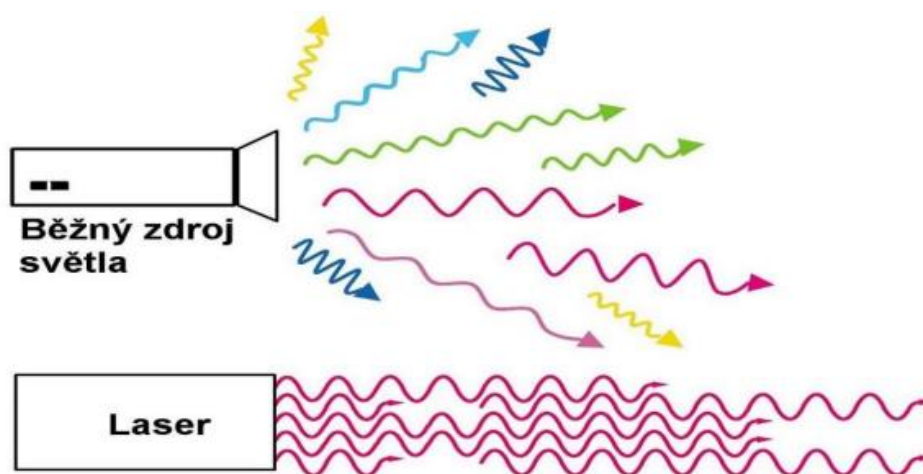
Obrázek 2 Kuman Patel s jedním z prvních CO2 laserů, zdroj: The history of laser Cutting (2016)

3.2 Princip

Laserový paprsek je světelné záření, které lze definovat jako záření, které se v homogenním prostředí šíří rovnoměrně všemi směry stejnou rychlostí a intenzitou. Laserový paprsek vzniká na principu vynucené emise záření, které je vytvořeno působením elektromagnetického záření na atom prvku. V ten moment elektron obíhající okolo jádra atomu přeskočí do vyšší oběžné dráhy. Tento

nerovnovážený stav způsobí, že elektron přeskočí zpět do nižší oběžné dráhy, přičemž se vyzáří energie jednoho fotonu. Vzniklé záření zobrazené na obrázku 3 je monochromatické což znamená, že má jednotnou vlnovou délku a je také koherentní z čehož plyne, že svazky fotonů se pohybují jedním směrem a mají vysokou míru uspořádanosti (PÍŠKA, 2009; DAHOTRE a spol.,2008; MORÁVEK,1994).

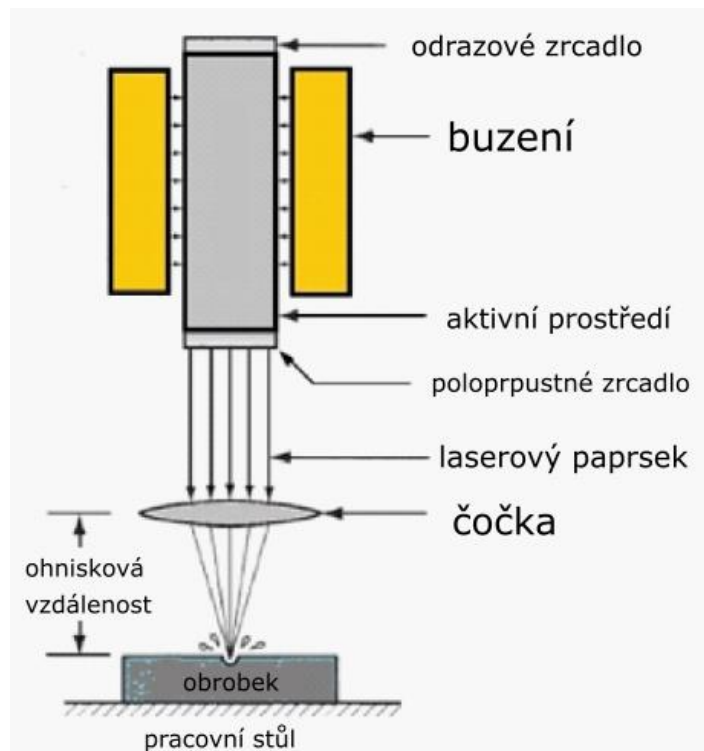
Vzniklý koherentní paprsek se nasměruje na obráběný materiál, kde na malé ploše dochází k přeměně světelné energie na tepelnou a tím dochází k roztavení materiálu při teplotě až 10 000 °C. Vlivem tak vysokých teplot se tavenina buď odpaří nebo vyfoukne z obráběného materiálu (PÍŠKA, 2009; DAHOTRE a spol.,2008; MORÁVEK,1994).



Obrázek 3 Záření běžného světelného zdroje a laseru, zdroj: Slideshare (2014)

3.3 Zařízení pro obrábění laserem

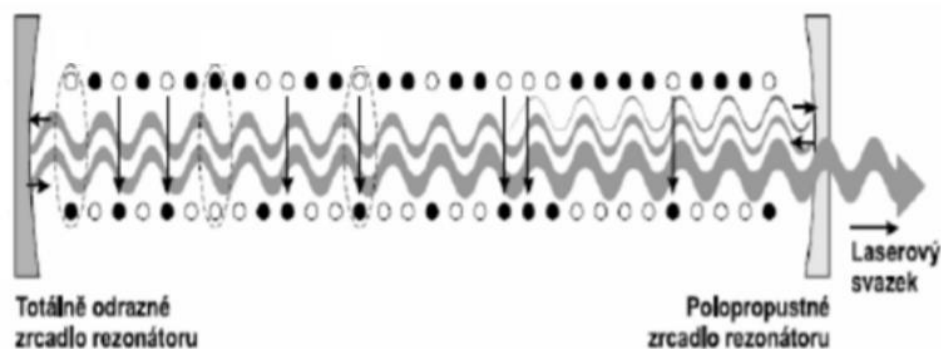
Obrábění laserovým paprskem využívá úzký paprsek intenzivního monochromatického světla, který taví a odpařuje materiál obrobku. Každé laserové zařízení se skládá z několika hlavních částí. Jedná se o laserové médium neboli aktivní látku, buzení, zaostřovací čočky a rezonátor. Schéma laserového zařízení je zobrazeno na obrázku 4 a jednotlivé části jsou popsány v následujících odstavcích.



Obrázek 4 Schéma zařízení pro obrábění laserovým paprskem, zdroj: *The mechanical engineering* (2014)

3.3.1 Rezonátor

Rezonátor je soustava polopropustného a nepropustného zrcadla, která odráží emise záření zpět do aktivní látky. Mezi tyto dvě zrcadla se vkládá laserové medium. Princip této metody spočívá v použití nejčastěji dvou proti sobě umístěných rovinných či sférických zrcadel, kde je jedno vždy polopropustné a druhé pouze odrazové. Emitovaná vlna je tak z laserového media odražena zpátky a při zpětném pohybu vytváří další nové emise fotonů. Jakmile však dojde k překročení prahové výkonné hustoty polopropustného zrcadla, dojde k výstupu fotonů z rezonátoru ven. Na obrázku 5 je znázorněn princip rezonátoru (MORÁVEK,1994; DAHOTRE a spol.,2008; VRBOVÁ a spol.,1998).



Obrázek 5 Schématické zobrazení principu funkce rezonátoru, zdroj: Slidesahre(2014)

3.3.2 Buzení

Buzení je způsob, kterým dodáváme energii do aktivního prostředí. Zdroj energie závisí na volbě aktivního prostředí. Buzení tak může být realizováno mnoha způsoby. Například může jít o elektrický výboj, teplo, elektronový paprsek, ultrafialové světlo, chemickou reakci či jiné zdroje buzení. V tabulce 1 jsou uvedeny nejběžnější způsoby buzení v závislosti na druhu laseru (MORÁVEK,1994; DAHOTRE a spol.,2008; VRBOVÁ a spol.,1998).

Tabulka 1 Způsoby buzení pro vybraná aktivní prostředí zdroj: (Barcal,1989)

Způsob buzení	Druh laseru
Optické buzení	Pevnolátkový a kapalný laser
Elektrické buzení	Plynový laser
Chemické buzení	Plynový laser
Tepelné buzení	Kapalinový a plynový laser

3.3.3 Aktivní prostředí

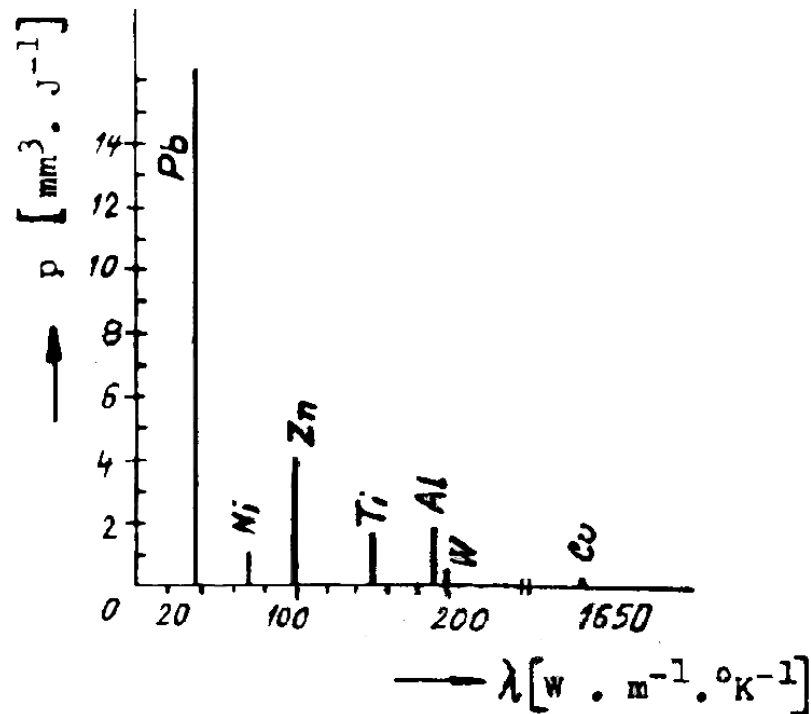
Aktivní prostředí je látka, která umožňuje vybudit molekuly a elektrony pomocí vhodného buzení na požadovanou energetickou hladinu, ze které se může dále emitovat záření fotonu. Je to jedna z nejdůležitějších částí laseru, ve které dochází ke stimulované emisi. Aktivní prostředí tvoří pevná látka, kapalina, plyn, polovodič nebo plazma. V případě pracovní látky plynného skupenství se jedná například o využívání helia či oxidu uhličitého (DAHOTRE a spol.,2008; VRBOVÁ a spol.,1998).

3.3.4 Zaostřovací čočka

Zaostřovací čočky pro laserová zařízení zajišťují soustředění laserového záření na velmi malou plochu a jejich kvalita výrazně ovlivňuje přesnost obrábění. Takové čočky nejsou vyrobeny ze skla, jako například v případě lupy nebo dalekohledu. Skleněné čočky by nemuseli dostatečně dlouho vydržet silné tepelné namáhání, proto jsou vyrobeny ze selenidu zinečnatého, který je tepelně odolný až do teploty 1 500 °C a dodává laserovým čočkám jejich typickou oranžovou barvu (DAHOTRE a spol.,2008; VRBOVÁ a spol.,1998).

3.4 Materiály vhodné pro obrábění laserem

Odebírání materiálu je výsledek dopadajících fotonů na obráběný materiál, které se následně přeměňují na tepelnou energii. K procesu přeměny energie fotonu na tepelnou energii dojde pouze pokud bude záření fotonů materiálem pohlcováno. Průhledné nebo odrazivé materiály pro určité vlnové délky se mohou ukázat jako velice odolné proti odebírání materiálu touto metodou. Množství odstraňovaného materiálu laserovým zářením o určité vlnové délce závisí na poddajnosti materiálu fotonové erozi. Tato vlastnost je výsledkem celé řady vlastností obráběného materiálu a jednou z nejdůležitějších vlastností je tepelná vodivost. Na obrázku 6 je zobrazena poddajnost vybraných materiálů na fotonovou erozi podle velikosti tepelné vodivosti materiálu. S růstem tepelné vodivosti klesá poddajnost na fotonovou erozi (DAHOTRE a spol.,2008; VRBOVÁ a spol.,1998).

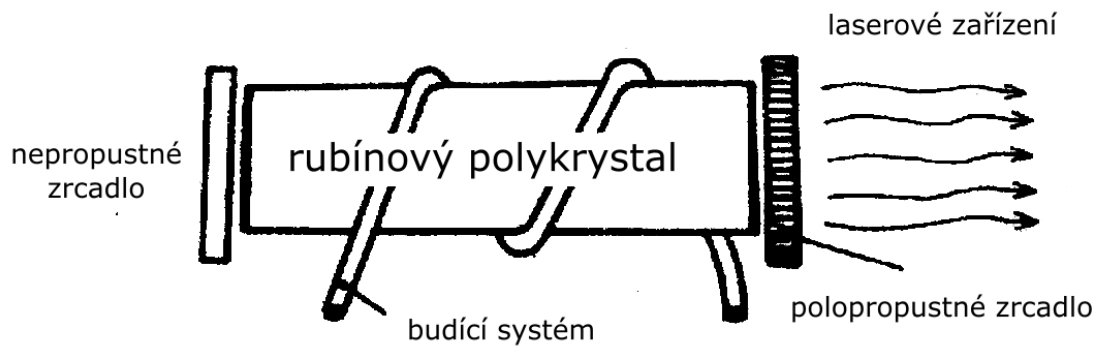


Obrázek 6 Seřazení vybraných materiálů podle poddajnosti na fotonovou erozi a velikosti tepelné vodivosti (Barcal,1989)

3.5 Druhy laserů

3.5.1 Pevnolátkové lasery

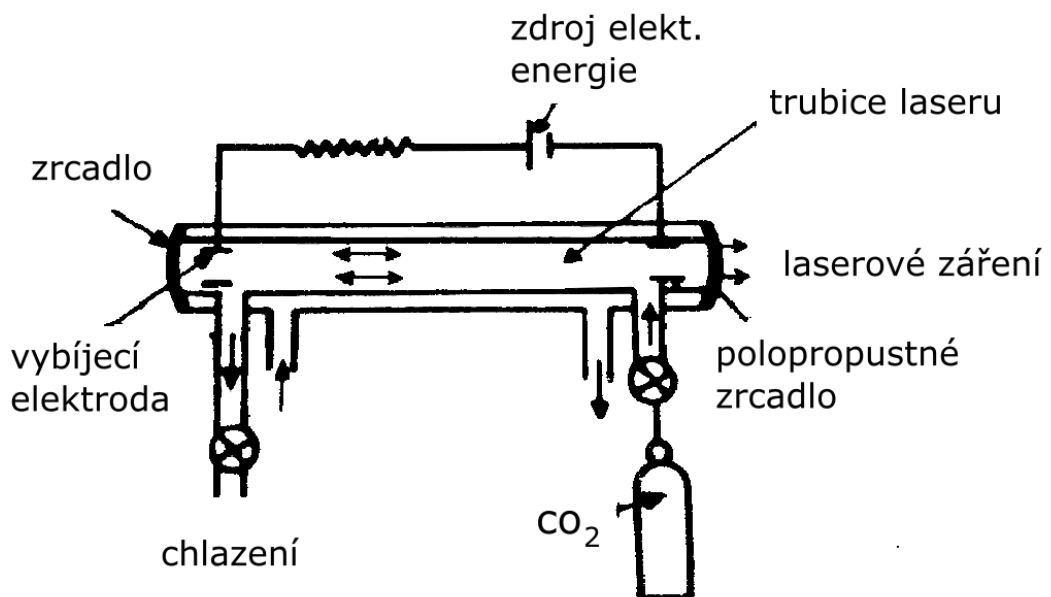
Pevnolátkový laser zobrazený na obrázku 7 je laser, který používá pevnou látku jako laserové médium. Proces přidávání příměsí k základní látce se nazývá doping. Jako příměsí se nejčastěji používají vzácné prvky, jako je například cer nebo terbium. Jako základní materiály pro laserové médium se používá například safír, neodymem dopované sklo a yterbiem dopované sklo. První pevnolátkový laser byl rubínový laser. V některých aplikacích se stále používá. V tomto laseru se jako laserové médium používá rubínový krystal. U laserů v pevné fázi se jako budící zdroj používá světelná energie. Jako nejčastější budící světelné zdroje se používají výbojky, zábleskové lampy nebo obloukové výbojky (KOECHNER,1999; DAHOTRE a spol.,2008).



Obrázek 7 Schématické znázornění pevnolátkového laseru (Barcal,1989)

3.5.2 Plynový laser

Plynový laser zobrazený na obrázku 8 je laser, ve kterém elektrický proud proudí plynem uvnitř laserového média za vzniku laserového světla. U plynových laserů je laserové médium v plynném stavu. Plynové lasery se používají v aplikacích, které vyžadují laser s velmi vysokou kvalitou paprsku a dlouhými koherenčními délkami. V plynovém laseru je laserové médium tvořeno směsí plynů. Tato směs je umístěna ve skleněné trubici, která působí jako aktivní médium. Nejběžnější plynové lasery jsou na bázi oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého nebo dusíku. Typ plynu použitého ke konstrukci laserového média určuje vlnovou délku a účinnost laseru (VRBOVÁ a spol.,1998; MORÁVEK,1994).



Obrázek 8 Schématické znázornění plynového laseru (Barcal,1989)

3.5.3 Kapalinový laser

Kapalinový laser je laser, který používá kapalinu jako laserové médium. V kapalinových laserech dodává světlo laserovému médiu energii. Barvivový laser je nejpoužívanějším typem kapalinového laseru. Barvivový laser je laser, který jako aktivní prostředí používá organické barvivo a jak je z názvu patrné je tvořen organickým barvivem smíchaným s rozpouštědlem. Tyto lasery generují laserové světlo z vybuzených energetických stavů organických barviv rozpuštěných v kapalných rozpouštědlech. Zvolené barvivo ovlivňuje spektrum vyzářeného světla. Například Polymethinová barviva generují záření červené až infračervené oblasti, anthenová barviva pracují ve viditelném spektru a scintilátorová barviva v ultrafialové části spektra (DAHOTRE a spol.,2008; VRBOVÁ a spol.,1998).

3.6 Využití v praxi

Obecně platí, že využití laserů nalezneme v mnoha odvětvích jako třeba chemické, biochemické, optické či lékařské. Laserové obrábění je velice oblíbená metoda, která má spousty pozitiv ale i negativ, nejvýznamnější z nich jsou zobrazené v tabulce 2. Ve výrobě se lasery úspěšně používají pro procesy obrábění, vrtání i řezání materiálu. Proces laserového obrábění se v současné době považuje za vhodný pro obrábění velmi malých otvorů a řezání složitých profilů z tenkých, tvrdých materiálů. V automobilovém průmyslu se tato metoda používá například pro označování kovových dílů, vytváření popisů na plastové díly nebo obrábění emblémů, které je zobrazené na obrázku 9.



Obrázek 9 Vlevo plastový díl s popisky vytvářenými pomocí laseru, vpravo frézování emblému, zdroj: Plastic decoration(2016)

Tabulka 2 Pozitiva a negativa obrábění laserovým paprskem zdroj: (Morávek,1994)

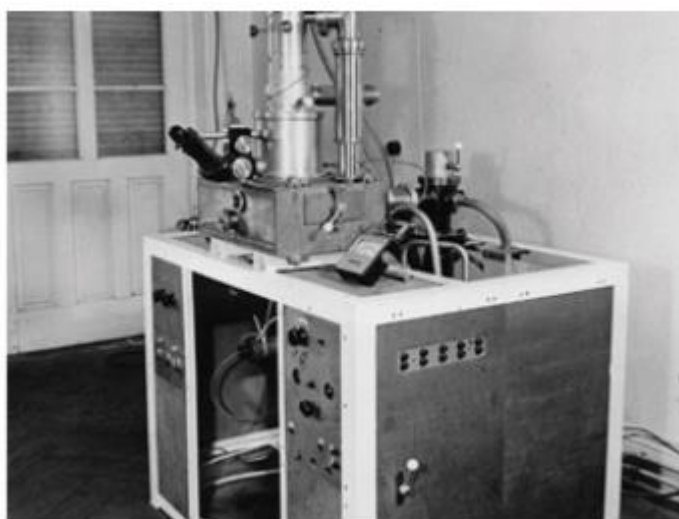
Pozitiva	negativa
Neexistuje žádná obráběcí síla a nedochází k opotřebení nástroje	Malé množství úběru kovu
V tomto procesu se nevyrábí otřepy	Pořizovací náklady na zakoupení stroje jsou vysoké
Úhlové vrtání nebo řezání lze měnit jednoduše pomocí naklánění obrobku	Vyžaduje se vysoce kvalifikovaný operátor
Vhodné na obrábění křehkých obrobků	Náklady na pravidelnou údržbu stroje jsou vysoké
Lze obrobit jakékoliv kovy nebo nekovy	Spotřeba elektrické energie je vysoká
Lze obrábět i v úzkých místech, kam by se běžný nástroj nedostal	Průhledné a vysoce reflexní materiály nelze pomocí této metody obrobit

4 Obrábění paprskem elektronů

Obrábění elektronovým paprskem je proces obrábění, při kterém se materiál z obrobku odebírá zaostřováním paprsku vysokorychlostních elektronů směrem k materiálu. Zdrojem energie při obrábění elektronovými paprsky jsou elektrony o vysoké rychlosti. Pro generování elektronů s vysokou energií se v tomto procesu používá vysokonapěťový stejnosměrný napájecí zdroj. Jedná se o netradiční proces obrábění pro úběr materiálu. Obecně se obrábění elektronovým paprskem provádí ve vakuové komoře pro odstranění zbytečného rozptylu elektronů a pro zefektivnění procesu (PÍŠKA,2009; MORÁVEK,1994).

4.1 Historie

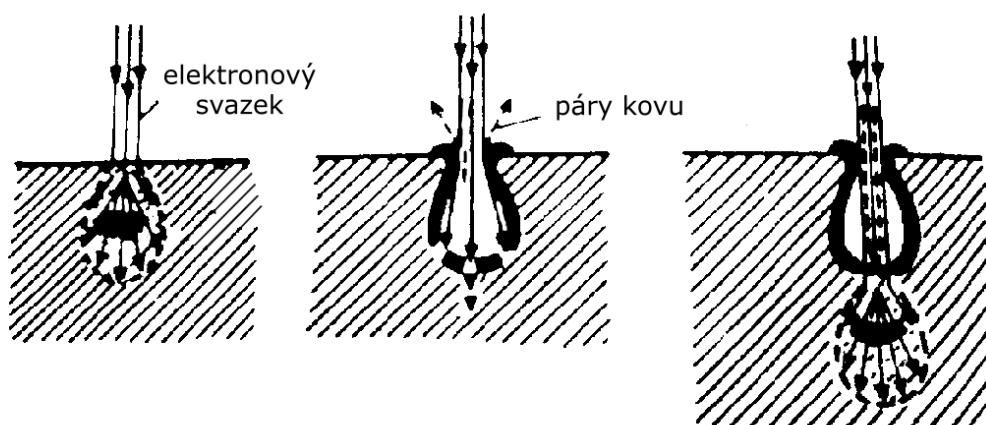
Obrábění elektronovým paprskem vyvinul německý fyzik Karl-Heinz Steigerwald ze Stuttgartu v západním Německu roku 1952. Steigerwald prováděl experimenty na svém elektronovém mikroskopu, aby zvýšil sílu a rozsah, přičemž ke svému překvapení zjistil, že zkoumaný vzorek se odpařil. Později Steigerwald zjistil, že regulací nastavení výkonu elektronového paprsku se vzorek roztaví a znovu ztuhne nebo se odpaří. Roku 1958 poprvé svařil dvě desky o tloušťce 5 mm. O 5 let později založil společnost Steigerwald Strahltechnik, která se dodnes zabývá výrobou strojů pro opracování materiálu elektronovým paprskem. Na obrázku 10 je jeden z prvních zařízení na elektronové obrábění (PÍŠKA,2009).



Obrázek 10 Jedno z prvních zařízení pro obrábění elektronovým paprskem, zdroj:Steigerwald Strahltechnik(2016)

4.2 Princip

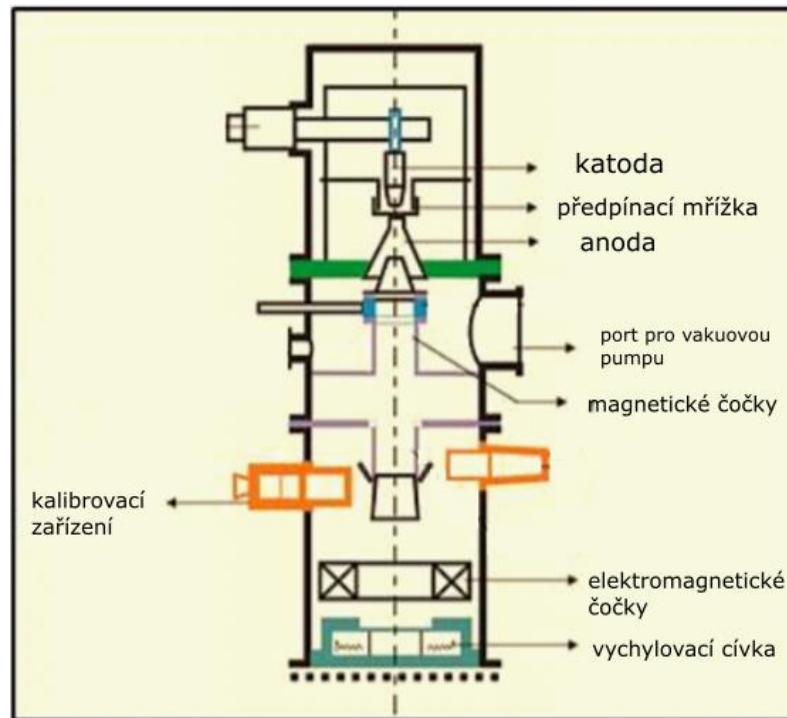
Zdrojem energie při obrábění elektronovými paprsky jsou vysokorychlostní elektrony, které narážejí na povrch obrobku a generují teplo. Vysokorychlostní elektrony jsou vytvořeny zrychlením volných elektronů ve vakuu pomocí elektrického a magnetického pole, které z nich vytvoří tenký a intenzivní proud elektronů, který zasáhne obrobek a kinetická energie elektronů se převede na tepelnou energii. Tato tepelná energie je více než dostatečná k roztavení a odpařování téměř jakéhokoli materiálu. Schématické zobrazení dopadajících elektronů je zobrazeno na obrázku 11. Elektrony mohou pronikat pouze několika atomovými vrstvami kovů a mohou roztavit kov až do hloubky 25 mm. K zaostření elektronových paprsků se používají elektrostatické nebo elektromagnetické čočky. Obecně se obrábění elektronovým paprskem provádí ve vakuové komoře, aby se zabránilo zbytečnému rozptylu elektronů (PÍŠKA,2009; MORÁVEK,1994).



Obrázek 11 Schématické zobrazení dopadajících elektronů na povrch obrobku (Barcal,1989)

4.3 Zařízení pro obrábění paprskem elektronů

Na obrázku 12 je schématické znázornění děla elektronového paprsku, které je srdcem každého zařízení využívající elektronový paprsek. Základní funkcí každého elektronového děla je generování volných elektronů na katodě, jejich zrychlení na dostatečně vysokou rychlost a jejich zaostření na malou plochu. Katoda je obvykle vyrobena z wolframu nebo tantalu. Taková katodová vlákna se zahřívají většinou indukčně, na teplotu kolem 25 000 ° C. Toto zahřívání vede k termoiontové emisi elektronů, což se dále podporuje udržováním velmi nízkého vakua v komoře elektronového paprsku. Katodové vlákno je vysoce negativní, takže elektrony jsou silně odpuzovány od katody (PÍŠKA,2009; MORÁVEK,1994).

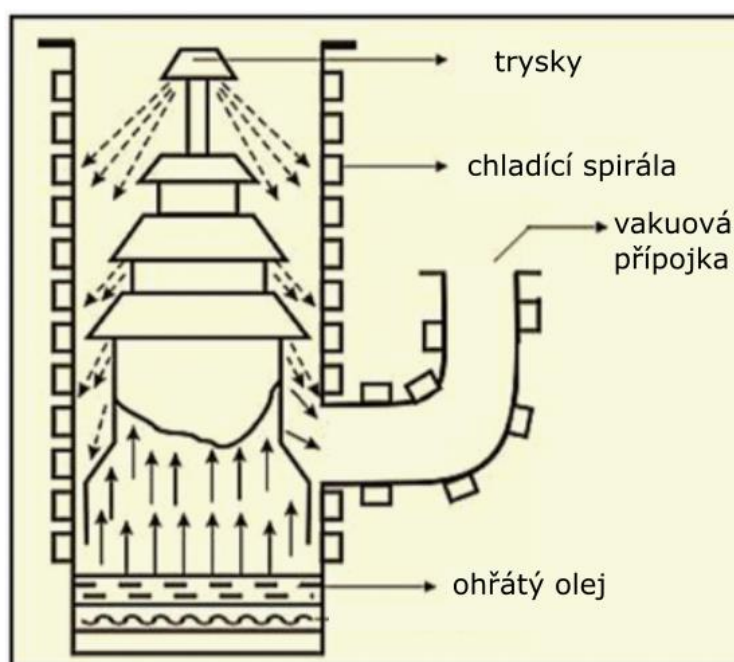


Obrázek 12 Schematické znázornění elektronového děla, zdroj: NPTEL (2015)

Těsně za katodou je prstencová předpínací mřížka. Na tuto mřížku je aplikováno vysoké negativní napětí, takže elektrony generované katodou se nerozcházejí a blíží se k dalšímu prvku ve formě paprsku. Prstencová anoda nyní přitahuje elektronový paprsek a postupně ho zrychluje. Při opuštění anodové sekce mohou elektrony dosáhnout rychlosti až poloviční rychlosti světla. Velikost napětí těsně za katodou řídí tok elektronů a předpínací mřížka se používá jako přepínač pro ovládání elektronového paprsku v pulzním režimu. Po anodě prochází elektronový paprsek řadou magnetických čoček a otvorů. Magnetické čočky tvarují paprsek a snaží se snížit divergenci neboli rozbíhavost. Otvory na druhé straně umožňují průchod pouze konvergentním neboli rovnoběžným elektronům a zachytávají divergentní nízkoenergetické elektrony. Tímto způsobem se zlepšuje kvalita elektronového paprsku. Poté elektronový paprsek prochází závěrečnou částí elektromagnetické čočky a vychylovací cívkou. Elektromagnetická čočka zaostří elektronový paprsek na požadované místo. Vychylovací cívka může manévrovat s elektronovým paprskem, ačkoliv v malém rozsahu, pro zlepšení tvaru obroběných otvorů (KARAFIÁTOVÁ a LANGER, 1998; MORÁVEK, 1994; PÍŠKA, 2009).

Elektronová děla jsou také vybavena zařízením pro vyrovnání paprsku s obrobkem. Obrobek je namontován na CNC stole tak, aby bylo možné obrábění otvorů

jakéhokoli tvaru pomocí CNC řízení a vychýlení elektronového paprsku. Jedním z hlavních požadavků provozu elektronového paprsku je udržování potřebného vakua. Úroveň vakua uvnitř děla je až $1,33 \cdot 10^{-3}$ pascalů. Udržování vhodného vakua je nezbytné, aby elektrony neztrácely energii a aby bylo dosaženo vysoké životnosti katodového vlákna. Takového vakua je dosaženo a po celou dobu udrženo pomocí kombinace rotačního čerpadla a difúzního čerpadla, které je znázorněno na obrázku 13. Difúzní čerpadlo je připojeno k portu difuzního čerpadla elektronového děla. Difúzní čerpadlo slouží především jako ohříváč oleje (KARAFIÁTOVÁ a LANGER, 1998).



Obrázek 13 Schématické zobrazení zařízení pro vytváření vakua, zdroj: NPTEL (2015)

Jak se olej zahřívá, stoupá z něj postupně nahoru olejová pára. Trysky mění směr pohybu olejové páry a olejová pára se začíná pohybovat směrem dolů vysokou rychlostí. Vysoká rychlost klesající olejové páry s sebou strhává všechny molekuly vzduchu přítomné v děle. Tento olej je odváděn rotačním čerpadlem přes přívodní potrubí. Olejová pára kondenzuje v důsledku přítomnosti pláště chladicí vody kolem difuzního čerpadla (KARAFIÁTOVÁ a LANGER, 1998).

4.4 Výroba pomocí obrábění elektronovým paprskem

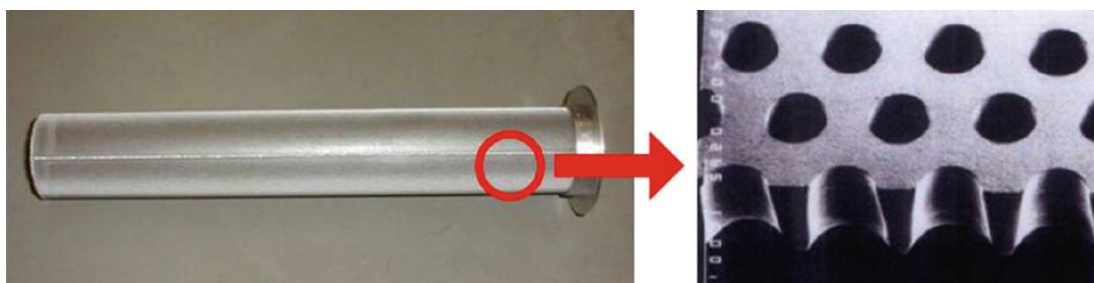
Výhody obrábění elektronovým paprskem, jako je hluboká penetrace a vysokorychlostní ovladatelnost, umožňují vrtání velkého počtu mikrootvorů

v rozsahu od 100 μm do 2 mm při extrémně vysoké rychlosti (MORÁVEK,1994). Další výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tabulce 3. V tabulce 4 je příklad materiálů pro elektronové obrábění a jejich parametrů.

Tabulka 3 Výběr materiálů pro elektronové obrábění s potřebnými parametry zdroj: (Barcal,1989)

Materiál	Tloušťka materiálu [mm]	Průměr díry [μm]	Čas vrtání [s]	Napětí [KV]	Proud [μA]
Wolfram	0,25	25	<1	140	50
Nerezová ocel	2,5	125	10	140	100
Hliník	2,5	125	10	140	100
Oxid hlinitý	0,75	300	30	125	60

Obrábění elektronovým paprskem aplikujeme na vrtání tisíců jednoduchých otvorů do mnoha obtížně vyvrtatelných materiálů jako jsou chladicí otvory na vstupních kanálech motorů nebo také do keramiky, neboť tepelná vodivost je tak nízká, že lze snadno dosáhnout vysoké teploty potřebné pro úběr materiálu. Dále se tato metoda využívá k vytváření nerezových sít pro potravinářské účely, které je zobrazeno na obrázku 14.



Obrázek 14 Nerezové síto s průměrem otvorů 0,25mm vytvořené pomocí elektronového obrábění, zdroj: SpringerLink. (2019)

Tabulka 4 Pozitiva a negativa obrábění elektronovým paprskem zdroj: (Morávek,1994)

Pozitiva	negativa
Poskytuje velmi vysoké rychlosti vrtání při vytváření malých otvorů	Velká spotřeba elektrické energie
Vhodné pro širokou škálu materiálů, protože nepoužívá žádnou mechanickou řeznou sílu	Vysoké pořizovací náklady a následná drahá pravidelná údržba stroje
Lze zpracovávat křehké materiály	Malé množství úběru kovu
Tepelně ovlivněná zóna je velice malá kvůli krátkým pulzům	Vyžaduje se vysoce kvalifikovaný operátor
Lze vytvořit různorodé tvary děr a kapes	

5 Obrábění elektroerozivní

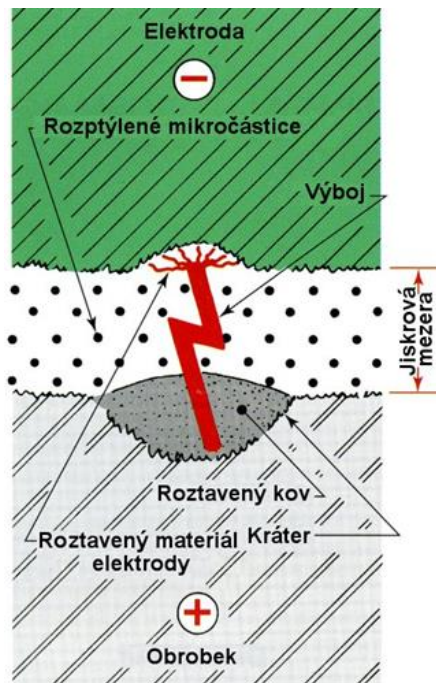
Elektroerozivní proces také známý jako elektrojiskrový proces je jedním z nejuniverzálnějších metod obrábění spadajících do kategorie nekonvenčních výrobních procesů. Důkazem je množství a různorodost aplikací tohoto jevu pro účely obrábění, které se na trhu objevily po druhé světové válce. Pomocí elektrické eroze můžeme vrtat, řezat, brousit i obrábět složité tvarové plochy. Tato diverzita se neprojevuje jen množstvím obráběcích procesů, které elektrická eroze umožňuje, ale i škálou materiálů na kterou ji lze použít.

5.1 Historie

V roce 1943 dostali dva ruští vědci B. R. Lazarenko a N. I. Lazarenko za úkol prozkoumat způsoby, jak zabránit erozi elektrických kontaktů wolframu v důsledku jiskření. V tomto úkolu selhali, ale zjistili, že eroze byla přesněji řízena, pokud byly elektrody ponořeny do dielektrické tekutiny. To je vedlo k tomu, že vynalezli elektrojiskrovou metodu používanou pro zpracování obtížně obrobitelných materiálů, jako je wolfram. V 70. letech 20. století byla tato technologie vylepšena o číselné řídicí a zpětnovazební smyčky s ultrarychlými servomotory. Postupem času stále více výrobců začalo vidět výhody této technologie. V dnešní době tato technologie hraje zásadní roli ve výrobních procesech pro širokou škálu průmyslových odvětví, včetně elektronické výroby, lékařské výroby a letecké výroby (MOHAN 2012).

5.2 Princip

Principem elektroerozivního obrábění jsou erozivní účinky elektrických výbojů mezi nástrojem a obrobkem. Úběru materiálu se docílí přivedením napětí mezi nástrojovou elektrodou a obrobek které jsou ponořené v kapalném dielektriku a vzdálené od sebe takzvanou mezielektrodovou vzdáleností. Výsledkem přivedeného napětí mezi elektrody je elektrické pole. Tam, kde je elektrický odpor dielektrika nejnižší, což může být například v místě, kde je největší koncentrace vodivých částic, nebo v místě, kde jsou nejkratší vzdálenosti mezi elektrodami, dojde k lokální emisi elektronů z katody. Tyto elektrony jsou urychlovány elektrickým polem a narážejí do elektricky neutrálních částic dielektrika u kterých dochází k ionizaci. Poté nastane lavinový průraz dielektrika zobrazený na obrázku 15, kdy ionty dosáhnou odpovídajících elektrod, utvoří vodivý tunel s poloměrem přibližně $10\mu\text{m}$ a začne protékat proud (MORÁVEK,1994; PÍŠKA,2009).

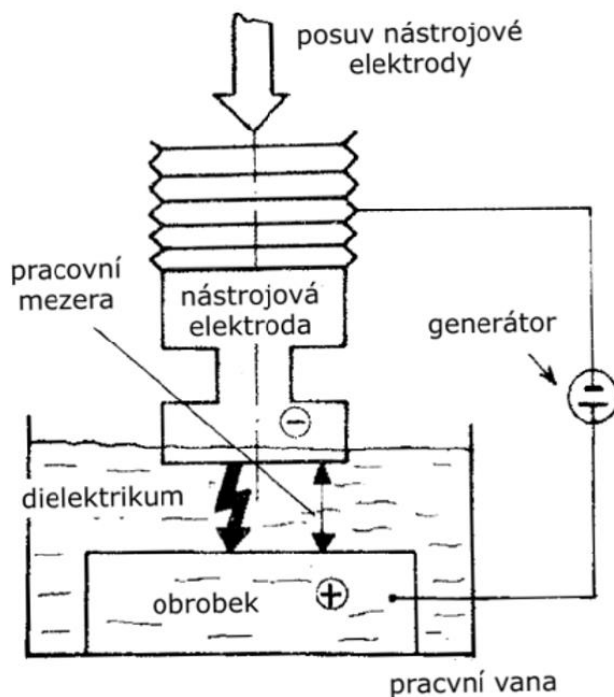


Obrázek 15 Schématické zobrazení výboje mezi nástrojem a obrobkem, zdroj: ELUC (2017)

Když nabité částice dosáhnou elektrody předají svou kinetickou energii ve formě tepla. I když výboj trvá pouze 10^{-2} až 10^{-6} vteřiny dochází lokálně k dosažení teploty 3 600 °C až 12 000 °C. Přestože teplota přesahuje bodu varu materiálu obrobku, tak nedojde k jeho odpaření z důvodu obrovského tlaku až 20 000 kilopascal, způsobeného odpařením dielektrika. Poté dochází k implozi bubliny odpařeného dielektrika, která způsobí odmrštění roztaveného materiálu. Nové dielektrikum se vlije do kráteru po výboji a ochladí materiál, který byl roztaven, ale nedošlo k jeho vyvržení. Celý cyklus se poté znovu opakuje spolu s výboji, které se náhodně objevují po celé obráběné ploše. Po vyplavení roztaveného materiálu zůstává, v místě výboje a na povrchu obrobku i elektrody drobný kráter. Množství úběru materiálu z nástroje je ale minimální, neboť eroze materiálu z obrobku je až 99 % celkového odebraného materiálu (MOHAN 2012; MORÁVEK, 1994).

5.3 Zařízení pro obrábění elektroerozivní metodou

Elektroerozivní obráběcí systém zobrazený na obrázku 16 se skládá z několika základních prvků které jsou generátor, nástrojová elektroda, dielektrikum a filtrační systém. V následující části budou jednotlivé prvky podrobně popsány.



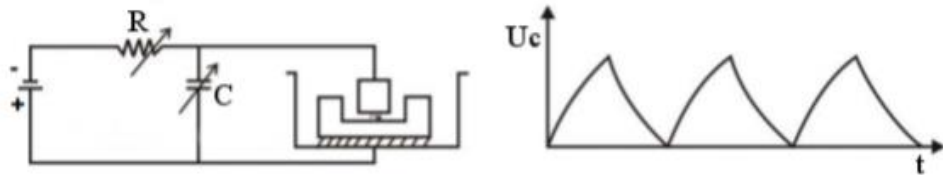
Obrázek 16 Schématické zobrazení zařízení pro obrábění elektroerozivní metodou (Barcal,1989)

5.3.1 Generátory

Nejdůležitější částí pro funkci elektroerozivního zařízení je generátor pulzů. Od počátků této metody obrábění prodělal pravděpodobně největší vývoj ze všech částí těchto strojů. Jeho funkce je přivádět mezi nástrojovou elektrodou a obrobek impulsy o určitém napětí, proudu a frekvenci. Generátory lze rozdělit do dvou kategorií podle toho, zda je jejich výstup závislý na velikosti mezielektrodové mezery či nikoliv (MOHAN 2012; MORÁVEK,1994).

a) Generátory závislé

Do této skupiny patří nejstarší generátory používané pro elektroerozi a to RC generátory. Tyto generátory fungují na principu opakovaného nabíjení kondenzátoru přes odpor až na hodnotu napětí, které je rovno průraznému napětí dielektrika v pracovní mezeře, kdy dojde k výboji a vybití kondenzátoru. Kondenzátor se opět znovu začne nabíjet a celý cyklus se opakuje (MOHAN 2012; MORÁVEK,1994). Schéma a průběh napětí tohoto generátoru je zobrazen na obrázku 17.

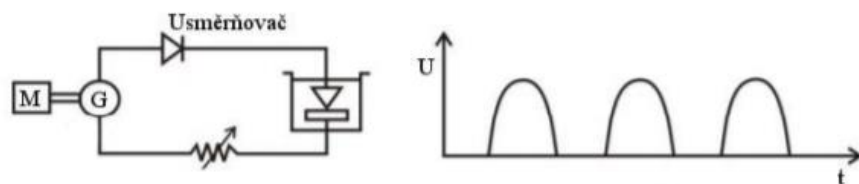


Obrázek 17 Schéma a průběh RC generátoru, zdroj: NPTEL (2009)

Jelikož hodnota průrazného napětí dielektrika se mění v závislosti na velikosti elektrodové mezery a koncentraci vodivých částic tyto generátory jsou tak závislé na důkladném nastavení vzdálenosti mezi nástrojem a obrobkem. Výhodou těchto generátorů je jejich jednoduchá konstrukce a s tím související spolehlivost. Nevýhodou je vysoké relativní opotřebení nástrojové elektrody a horší dosahované vlastnosti povrchu v porovnání s moderními tranzistorovými generátory (MOHAN 2012; MORÁVEK,1994).

b) Generátory nezávislé

U těchto generátorů je možné nastavovat elektrické pracovní veličiny nezávisle na stavu mezielektrodové mezery. Nejběžnějším zástupce této kategorie je rotační generátor, u kterého je tvorby opakujících se pulzů docíleno rotací dynama spojeného s motorem. Tím je generováno střídavé napětí, jehož záporné nebo kladné půlvlny jsou odfiltrovány diodou (MOHAN 2012; BARCAL,1989). Schéma a průběh napětí tohoto generátoru je zobrazen na obrázku 18.

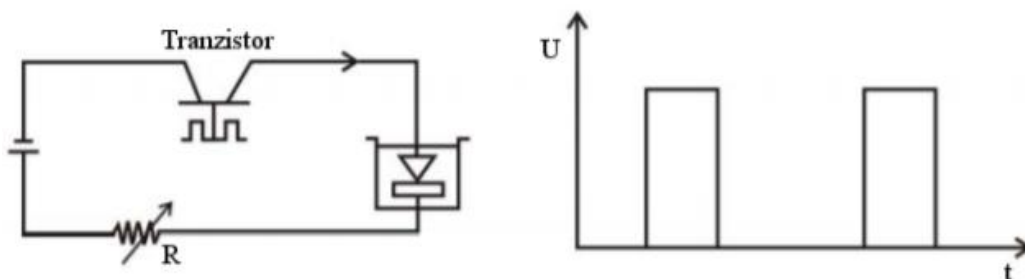


Obrázek 18 Schéma a průběh rotačního generátoru, zdroj: NPTEL (2009)

Tento typ generátorů dosahuje velkého úběrů materiálu, ale na úkor kvality povrchu. Proto se většinou kombinuje s jiným typem generátoru, který je použit k dokončování. Rotační pulzní generátor také neposkytuje žádnou možnost úpravy tvaru pulzu (MOHAN 2012).

c) Tranzistorové pulzní generátory

Tyto polovodičové generátory umožňují snadné řízení frekvence, napětí, proudu i časového využití periody výboje. V nejjednodušším provedení se jedná o výkonový tranzistor, který spíná a vypíná napětí čímž tvoří hranaté pulzy. V reálu je použito více paralelně zapojených tranzistorů, které spínáním ovlivňují velikost proudu dodávaného do pracovní mezery. Schéma a průběh napětí tohoto generátoru je zobrazen na obrázku 19.



Obrázek 19 Schéma a průběh tranzistorového generátoru, zdroj: NPTEL (2009)

Dnešní generátory pulzů již negenerují pouze hranaté pulzy, ale využívají plně potenciálu tranzistorů k modulaci tvaru pulzu pro dosažení co nejlepších výsledků. Mezi tato zlepšení patří zlepšení kvality povrchu při vysokých úběrech materiálu a dosahované přesnosti. V současné době jsou generátory pulzů řízeny samotným CNC systémem, který vyhodnocuje jednotlivé výboje a na základě těchto dat upravuje výstup generátoru pro co nejlepší výsledky (MOHAN 2012; BARCAL,1989).

5.3.2 Nástrojová elektroda

Jak již bylo zmíněno, při elektroerozivním obrábění nedochází ke kontaktu nástroje s obrobkem, a proto jsou velice důležité fyzikální a nikoli mechanické vlastnosti materiálů. Aby byl materiál vhodný pro výrobu elektrod měl by mít především vysokou teplotu tání, vysokou tepelnou vodivost, nízký elektrický odpor, nízkou hmotnost a cenu. Nástrojová elektroda musí být dostatečně pevná, aby vydržela obráběcí proces a manipulaci ale zároveň lehká, aby nebylo nutné vytvářet robustnější konstrukce stroje. Náklady na elektrodu jsou podstatnou částí ceny elektroerozivního obrábění, a proto je nutné zvolit materiál, který bude nejen levný, ale i snadno obrobitelný do požadovaného tvaru. Základními materiály používanými pro výrobu nástrojových elektrod je měď, grafit, mosaz a wolfram. Dále je možné kombinace těchto materiálů jako například grafitu a mědi nebo mědi s příměsí wolframu. Grafit se pro potřeby elektroerozivního obrábění vyrábí lisováním ve velkém množství typů,

kteře se pote liři hustotou, zrnitostí, pevností, tepelnou i elektrickou vodivostí. Grafit se nejčastěji používá jako materiál hrubovacích elektrod pro hloubení a elektroerozivní frézování. Měď je vhodná pro obrábění na čisto, ale vykazuje vyšší opotřebení nástrojové elektrody než grafit. Wolfram je kvůli své ceně používán pouze k výrobě velmi malých elektrod pro nejnáročnější aplikace. V následující tabulce 5 jsou tyto materiály porovnané na základě vlastností, které očekáváme od nástrojové elektrody (MOHAN 2012; KIBRIA 2019; MORÁVEK,1994).

Tabulka 5 Porovnání vhodných materiálů na nástrojovou elektrodu zdroj: (Barcal,1989)

	Teplota tání [°C]	Hustota [kg·m ⁻³]	Tepelná vodivost [w·m ⁻¹ ·k ⁻¹]	Měrný elektrický odpor [μ·Ω·m ⁻¹]	Cena [Kč·dm ⁻³]
Měď	1085	8900	400	0,015	1113
Grafit	3652	1770	80	14	650
Wolfram	3400	19300	190	0,05	12777
Mosaz	965	8600	110	0,07	2228

5.3.3 Dielektrikum

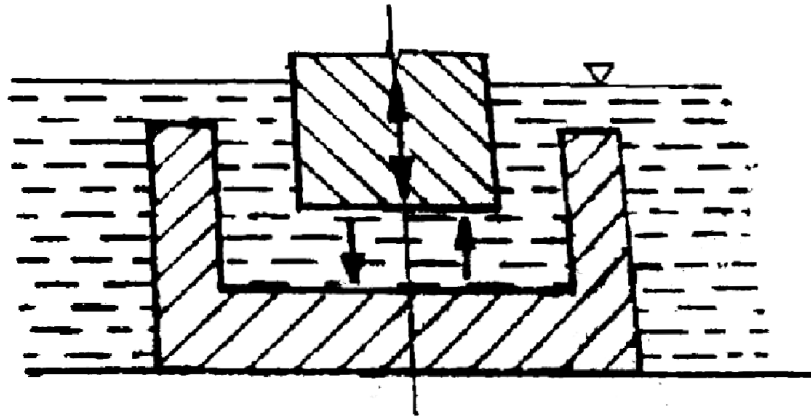
Dielektrické médium hraje při elektroerozivním obrábění důležitou roli. Nejčastěji používaným dielektrikem jsou syntetické petroleje nebo deionizovaná voda, která má velké výhody jako svou cenu, zdravotní nezávadnost a nenáročnou likvidaci, ale nedá se použít tam, kde je požadována vysoká přesnost. (MOHAN 2012; MORÁVEK,1994)

Aby elektroerozivní obrábění probíhalo bez komplikací musí být do prostoru mezi elektrodami stále přiváděno čisté a nezahřáté dielektrikum. Toho lze docílit několika základními způsoby (KIBRIA 2019; MORÁVEK,1994; BARCAL,1989).

a) Ponořením

Tento způsob se používá pro obrábění mělčích tvarů a spočívá v ponoření obou elektrod pod hladinu dielektrika. Pro efektivnější proudění kapaliny se přidává pohyb mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, kdy se například nástrojová elektroda cyklicky vzdaluje od obrobku a umožňuje tak vlití čerstvého dielektrika

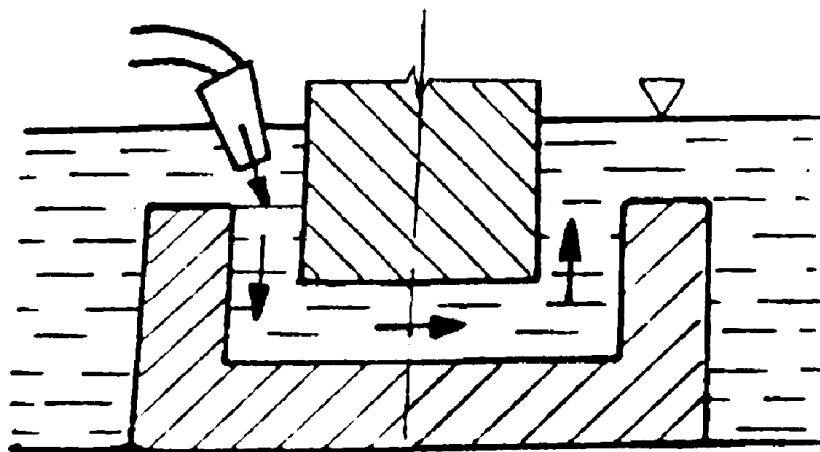
do pracovní mezery. Schématické zobrazení této metody je zobrazeno na obrázku 20.



Obrázek 20 Schématické zobrazení přívodu elektrolytu ponořením (Barcal,1989)

b) Výplach nuceným prouděním

V tomto případě se dielektrikum aktivně přivádí tryskou mezi elektrody. Nevýhodou je nerovnoměrné znečištění dielektrika v pracovní mezeře což způsobuje, že na straně, kde dielektrikum vystupuje z pracovní mezery je větší koncentrace částic obráběného materiálu, což vede k zvýšení pravděpodobnosti výskytu výboje a dochází tak k nerovnoměrnému obrábění. Schématické zobrazení této metody je zobrazeno na obrázku 21.

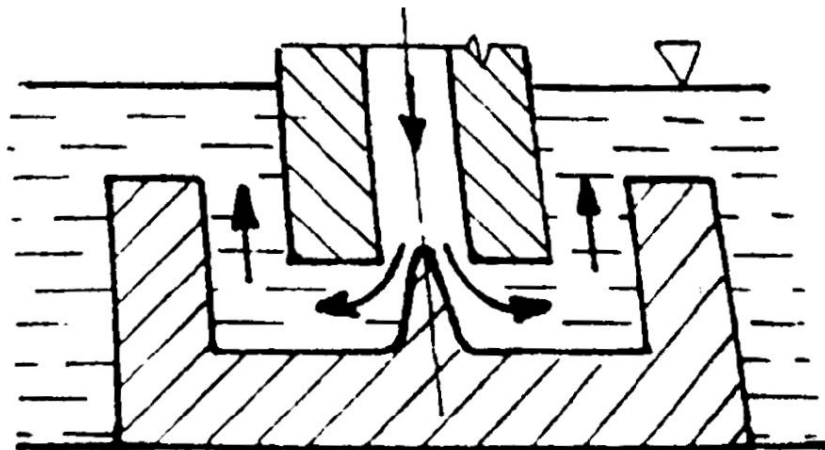


Obrázek 21 Schématické zobrazení přívodu elektrolytu nuceným prouděním (Barcal,1989)

c) Přívod nebo odvod elektrodou

Dielektrikum může být přiváděno, jedním či více kanály, přímo nástrojovou elektrodou. Jsou dva základní postupy. První je přivádění dielektrika skrz nástrojovou

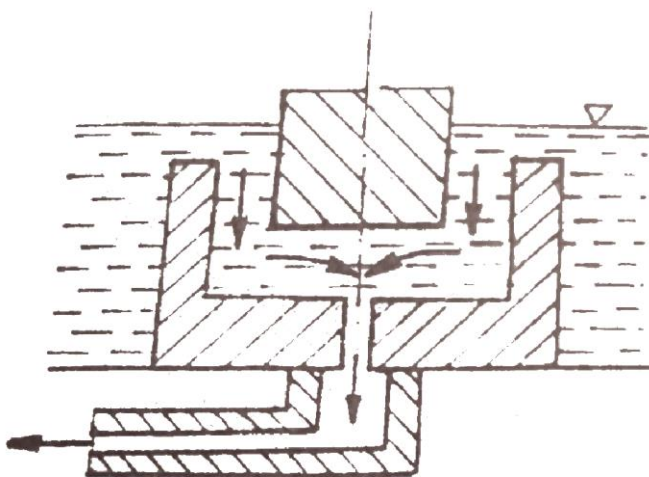
elektrodu zobrazené na obrázku 22, což vede k větší koncentraci vodivých částic na okrajích hloubené dutiny a k tvorbě nerovnoměrného úběru materiálu. Tento problém eliminuje druhá možnost, kterou je nasávání dielektrika kanálem v nástrojové elektrodě z okolí (BARCAL,1989; MORÁVEK,1994).



Obrázek 22 Schématické zobrazení přívodu elektrolytu elektrodou (Barcal,1989)

d) Přívod nebo odvod obrobkem

Pokud obrobek obsahuje vhodné díry je možné aplikovat stejné principy pro přívod či odvod dielektrika jako v případě přívodu nástrojovou elektrodou. Schéma této metody je zobrazeno na obrázku 23.



Obrázek 23 Schématické zobrazení odvodu elektrolytu obrobkem (Barcal,1989)

e) Kombinací

Kombinací jednotlivých metod můžeme docílit optimálních výsledků pro specifické případy.

5.3.4 Filtrace

Při elektroerozivním procesu se do dielektrika uvolňuje odebíraný materiál ve formě drobných částí. Tyto částice mají negativní dopad na izolační a chladicí vlastnosti dielektrika a způsobují zhoršení drsnosti výsledného povrchu a rovnoměrnosti obráběcího procesu. Především z těchto důvodů je pro tento proces nezbytná filtrace dielektrika, která zásadně prodlužuje životnost dielektrika a zajišťuje stabilní výsledky obrábění. Filtrační systémy jsou také často využity pro chlazení dielektrika, aby zajišťovali konstantní teplotu lázně, která je nutná pro maximální přesnost obrábění. Nejčastěji používaným filtračním systémem jsou lamelové vložky zobrazené na obrázku 24. Jedná se o filtrační papír složený do tvaru hvězdy, který je umístěn kolem centrální trubky. Dielektrikum je pumpováno dovnitř tohoto filtračního elementu, prochází skrz filtrační papír, kde jsou zachytávány odebrané částice a poté se vrací zpět do pracovního prostoru. Filtrační vložky nelze používat opakovaně a po dosažení filtrační kapacity, kdy již nemůže pojmout více částic dochází k jejich výměně (KIBRIA 2019; MORÁVEK,1994).



Obrázek 24 Příklad filtrů používaných pro elektroerozivní obrábění, zdroj: Filtermart (2020)

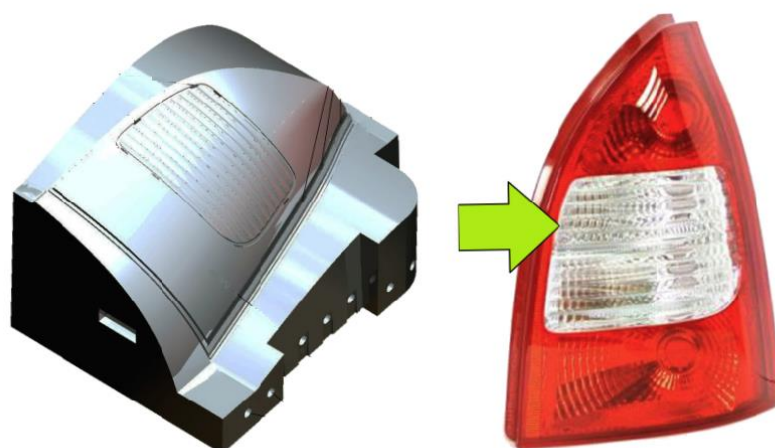
5.4 Výroba pomocí elektroerozivní metody

Na rozdíl od konvenčního třískového obrábění, kde obrobiteľnosť závisí především na mechanických vlastnostech materiálu je u elektroerozivního obrábění závislá na vlastnostech fyzikálních. Elektroerozivně lze obrábět pouze materiály elektricky vodivé. U této metody nedochází k fyzickému kontaktu mezi nástrojem a obrobkem díky čemuž nemá tvrdost materiálu vliv na obrobiteľnosť. Další výhody a nevýhody této metody jsou uvedeny v tabulce 6. Díky vlastnostem této metody lze bez větších

obtíží obrábět i velmi tvrdé materiály jako karbidy, wolfram, nebo zakalenou ocel, které jsou jen těžko, nebo nejsou vůbec obrobitelné konvenčním třískovým obráběním. Setkat se s touto metodou můžeme například při výrobě forem pro vstřikovací lisy zobrazených na obrázku 25 pro výrobu různorodých plastových dílů pro automobilový průmysl.

Tabulka 6 Pozitiva a negativa elektroerozivního obrábění zdroj: (Morávek,1994)

Pozitiva	negativa
Je možné vytvářet složité tvary, které by jinak bylo obtížné vyrobít běžnými řeznými nástroji	Pomalá rychlost úběru materiálu.
Lze obrábět velice tvrdé materiály na malé tolerance	Dodatečný čas a náklady použité na vytvoření elektrod
Hodí se pro obrobky, kde běžné řezné nástroje mohou poškodit součást nadměrným tlakem řezného nástroje	Reprodukce ostrých rohů na obrobku je obtížná kvůli opotřebení elektrody
Nevytváří otřepy	Lze obrábět pouze vodivé materiály
Vytváří velice dobrý povrch	



Obrázek 25 Forma na světla automobilu vyrobená pomocí elektroerozivního obrábění, zdroj: Europe PMC (2019)

6 Elektrochemické obrábění

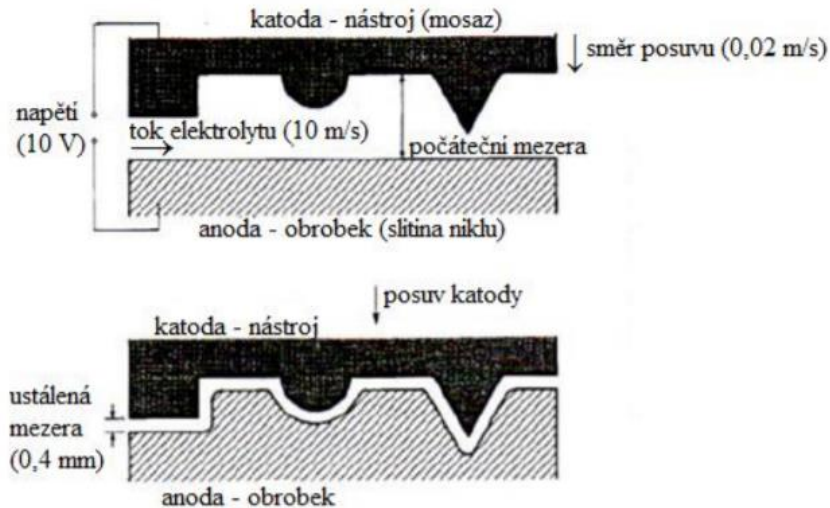
Jedná se o metodu beztržiskového obrábění elektricky vodivých materiálů. Využívá poznatků o působení elektrického proudu na elektrolyt. Podstatou této metody je fyzikální jev zvaný elektrolýza. Nástrojová elektroda se u této metody neopotřebovává, a proto může být z kovu s nižší tvrdostí na rozdíl od konvenčních metod obrábění.

6.1 Historie

Elektrochemické obrábění jako technologická metoda vychází z principu elektrolýzy, kterou popsal v roce 1833 Faraday. Díky W. Gussefovi který experimentoval s touto metodou, se roku 1959 zavedlo komerční použití této metody pro obrábění materiálu. Velký pokrok v této metodě se stal v 60. a 70. letech, a to zejména kvůli rostoucímu zájmu o obtížně opracovatelné slitiny, jako například slitiny titanu. V dnešních době se elektrochemické metody obrábění kombinují s počítačově řízenými stroji, což má kladný dopad na produktivitu a tvarovou přesnost (RUMYANTSEV,1989; MORÁVEK,1994).

6.2 Princip

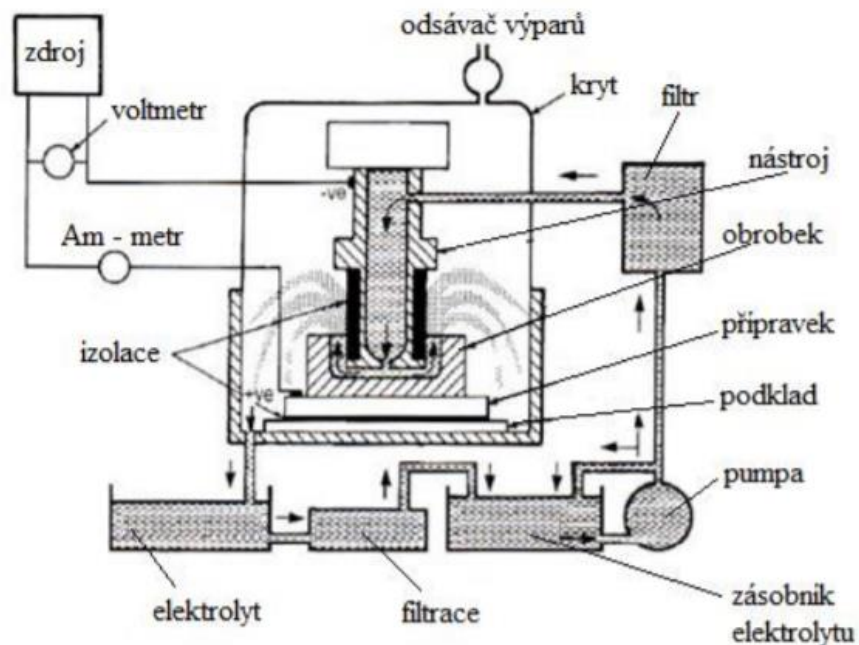
Jedná se o metodu netřiskového obrábění vodivých kovových materiálů založenou na elektrolýze. V podstatě se jedná o elektrochemické přeměny mezi elektrodami, které jsou ponořené do elektrolytu a uzavřeny do obvodu, kterým protéká stejnosměrný proud. Jedna z elektrod je nástroj a je připojena ke zdroji stejnosměrného proudu. Úběr materiálu je způsoben chemickými přeměnami, které probíhají na povrchu obrobku. Tento děj se nazývá anodické rozpouštění a je nutné, aby obrobek byl anodou s kladným nábojem a aby rozdíl potenciálů mezi elektrodami byl dostatečně velký. Základním principem při elektrochemickém obrábění je elektrolýza, která byla popsána M. Faradayem. Jedná se o chemický proces, který využívá působením elektrického proudu, který přechází z jedné elektrody na druhou a tím probíhá na katodě chemická redukce a na anodě oxidační reakce. Na obrázku 26 lze vidět, jak probíhá elektrochemické obrábění. Obrobek, který je anodou, je ponořen v elektrolytu a přiblíží se k němu katoda. Ta má výstupky, které odpovídají tvarům, jež chceme vytvořit v obrobku. Typické pro elektrochemické obrábění je, že katoda, která je nástrojem, netrpí téměř žádným úbytkem materiálu během procesu a tato metoda je tedy vhodná pro velkosériovou výrobu (RUMYANTSEV,1989; MORÁVEK,1994).



Obrázek 26 Schematické zobrazení průběhu elektrochemického obrábění, zdroj: (Maňková 2000)

6.3 Zařízení pro elektrochemické obrábění

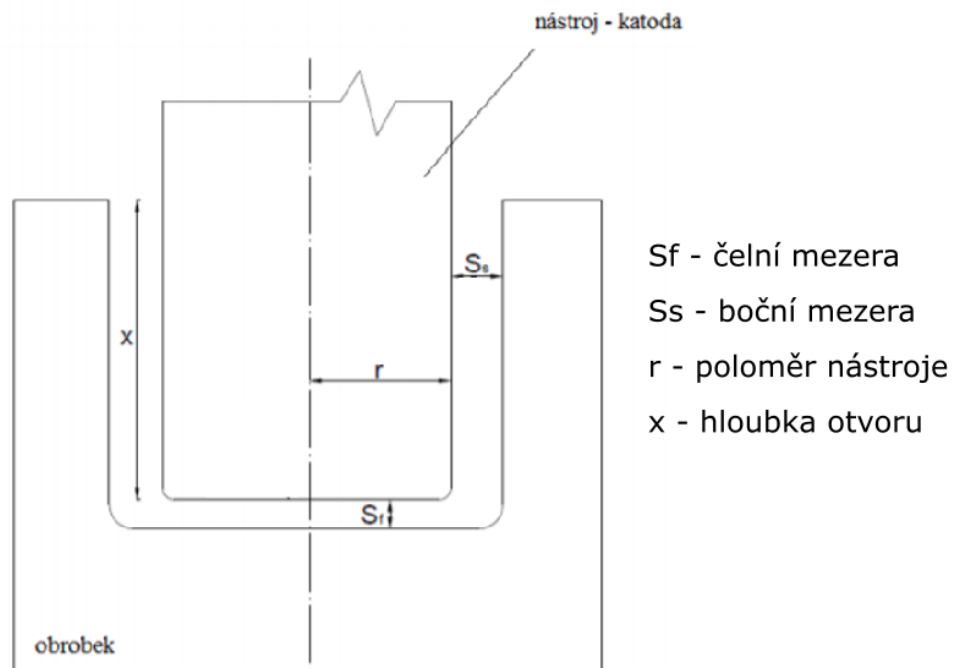
Stejně jako u většiny strojů ve strojírenském průmyslu je i zde vyžadována tuhost a stabilita stroje. Tuhost a stabilita jsou důležité kvůli udržování konstantní mezery mezi pracovní elektrodou a obrobkem pro plynulé proudění elektrolytu a plynulý úběr materiálu. Navíc je nutné odolat silám, které jsou důsledkem hydraulického tlaku od proudícího elektrolytu mezi nástrojem a obrobkem. Elektrický proud se pohybuje v rozmezí od 50 do 20 000 A při proudové hustotě 0,2 až 3 A·mm⁻² a při napětí 5 až 30 V. Stroj musí být schopen zajišťovat proudění elektrolytu v pracovní mezeře rychlostí 30 až 60 mm/s. Teplota elektrolytu by neměla přesáhnout 65 °C, a proto musí být stroj vybaven chlazením. Rozpuštěné zbytky kovů jsou odstraněny usazením, filtrací, odstředováním nebo kombinací těchto možností. Pohyb elektrody je zajištěn ve dvou, u složitějších strojů i v pěti osách. Součástí každého stroje je filtrační systém na čištění elektrolytu a komponenty, které udržují elektrolyt v požadované teplotě (RUMYANTSEV,1989; MORÁVEK,1994). Schéma stroje pro elektrochemické obrábění je zobrazeno na obrázku 27.



Obrázek 27 Schématické zobrazení stroje pro elektrochemické obrábění, zdroj: The electrochemical society (2005)

6.3.1 Nástroj pro elektrochemické obrábění

Kvalita nástroje, jeho přesnost rozměrů a drsnost ovlivňují kvalitu výsledného povrchu, proto má nástroj leštěný povrch. Základních prvek ovlivňující pracovní proces elektrochemického obrábění je pracovní napětí. Jeho hodnota musí být dostatečná, aby elektrolytem procházel trvale proud. Většinou se jeho velikost pohybuje v rozpětí 5 až 30 V. Velice důležitým parametrem je šířka mezery mezi nástrojem a obrobkem. Velikost mezery závisí na rychlosti posunu nástroje do materiálu a na rychlosti odebrání materiálu z obrobku. Velikost mezery je přímo úměrná napětí a nepřímo úměrná posuvu elektrody a odporu elektrolytu. Kdyby byla vzdálenost během procesu obrábění konstantní, byla by rovnoměrná mezera mezi nástrojem a obrobkem výsledkem přesné kopie obrobeného tvaru s tvarem nástroje, což by bylo ideální. V praxi je ale tyto podmínky náročné dodržet. Vodivost elektrolytu je nestabilní, protože se během procesu obrábění mění jeho teplota a spolu s nečistotami mění jeho vlastnosti. Velikost čelní mezery bývá v rozmezí 0,1 až 0,8 mm a boční mezery 0,5 až 1,3 mm (RUMYANTSEV,1989; MORÁVEK,1994; BARCAL,1989). V bocích dochází k většímu úběru materiálu, což je nutno vzít v potaz při korekci nástroje. Parametry mezer při elektrochemickém obrábění jsou zobrazeny na obrázku 28.



Obrázek 28 Parametry mezery mezi nástrojem a obrobkem u elektrochemické metody, zdroj: Karafiátová a Langer, (1998)

6.3.2 Elektrolyt

Elektrolyt má v elektrochemickém obrábění tři hlavní role a ty jsou přenášení elektrického proud mezi nástrojem a obrobkem, odstraňování produktů z elektrochemické reakce a odebrání tepla vzniklého při průchodu proudy. Nejběžnějším elektrolytem používaným pro tuto metodu je koncentrovaný solný elektrolyt, jako například chlorid sodný nebo dusičnan sodný. Svoji oblibu získali hlavně díky tomu, že jsou relativně levné a nezpůsobují poškození strojního zařízení. Kyselý elektrolyt by mohl stroji či obrobku časem způsobit korozi. Chlorid sodný se používá k obrábění nerezové oceli, pokud je požadována lesklá povrchová úprava, neboť nevytváří na povrchu nerezové oceli pasivní vrstvu oxidů. Pro zlepšení přesnosti obrábění se používají elektrolyty s nižší koncentrací, což má za následek zvýšení odporu elektrolytu a přesnější úběr materiálu. V tabulce 7 jsou uvedeny příklady materiálů a k nim vhodných elektrolytů (RUMYANTSEV,1989; MORÁVEK,1994).

Tabulka 7 Seznam materiálů elektrodu a materiálů vhodných na obrábění, zdroj: (Barcal, 1989)

Typ elektrolytu	Hmotnostní koncentrace	Obráběné materiály	Poznámky
NaCl	5–20	Slitiny na bázi Fe, Ni, Cu, Al, Mg, Ti	Silně korozivní, malý vliv na pasivaci, není jedovatý, levný
NaNO ₃	10–20	Slitiny na bázi Fe, Al, Cu, Zn	Univerzální použití, výrazně pasivační účinky
NaClO ₃	20–45	Oceli	Vysoký úběr a přesnost, nebezpečná manipulace
HCl H ₂ SO ₄	<10	Slitiny Ni, Cr, Co	Náročné na bezpečnost, agresivní prostředí, elektrolyt se spotřebovává
NaOH	<10	W, Mo, SK	Leptací účinek, obtížná manipulace

6.4 Výroba pomocí elektrochemického obrábění

Teoreticky lze elektrochemické obrábění použít k obrábění všech elektricky vodivých kovů a slitin. Ale obvyklé aplikace elektrochemického obrábění jsou pro obrábění tvrdých materiálů a žáruvzdorných materiálů. Parametry procesu a životnost nástroje nezávisí na tvrdosti obrobku. Elektrochemické obrábění má velké množství výhod ale také nevýhod, hlavní z nich jsou uvedeny v tabulce 8.

S touto metodou se setkáme například při výrobě složitých profilů, jako jsou kola turbín, lopatky turbín nebo turbodmychadel. Další aplikace je na obrábění dutin v lisovnicích, vrtání hlubších otvorů a otvorů nepravidelného tvaru, které nelze získat

běžnými způsoby obrábění. Jako příklad lze uvést vytváření olejových kanálků v klikové hřídeli zobrazené na obrázku 29.

Tabulka 8 Pozitiva a negativa elektrochemického obrábění, zdroj: Barcal,1989

Pozitiva	negativa
Rychlost obrábění nezávisí na tvrdosti materiálu obrobku	Vyšší výrobní náklady
Nástroj se neopotřebovává a pro výrobu nástrojů lze použít měkké materiály	Elektrolyt může způsobit korozi obrobku
Při obrábění se netvoří otřepy	Obrobit lze pouze elektricky vodivé materiály
Lze dosáhnout vysoké kvality povrchu	Tato metoda není příznivá pro životní prostředí
Vysoká přesnost obrábění	Vysoká spotřeba elektrické energie



Obrázek 29 Kliková hřídel u které byli vytvořeny olejové kanálky pomocí elektroerozivní metody, zdroj: Orient express racing (2020)

7 Chemické obrábění

Chemické obrábění je dobře známé jako netradiční proces obrábění, které funguje na principu chemického rozpouštění materiálu kontaktem se silným chemickým činidlem. Touto metodou lze obrobit téměř veškerý materiál od kovu po keramiku. Chemické obrábění je řízené rozpouštění obráběného materiálu kontaktem se silně kyselým nebo alkalickým činidlem. Od zvoleného leptadla se odvíjí i rychlost úběru materiálu. Aby nedošlo k leptání míst, která nemají být obrobena, používají se speciální laky nebo pryskyřice na jejich překrytí.

7.1 Historie

Chemické obrábění pomocí silných minerálních kyselin bylo vyvinuto již v patnáctém století. Leptalo se pomocí sloučeniny soli, uhlí a octa. Jako ochranný film pro zakrytí míst, kde nebyl požadován úběr materiálu se použila barva z lněného oleje. Leptání tímto způsobem bylo použito na zdobení brnění a nahrazovalo tím ruční rytí u kterého byl problém s nutností zachovat pancíř měkčí než nástroj. Na obrázku 30 je znázorněna část brnění které bylo vyrobeno touto metodou (BELLOWS,1982; MORÁVEK,1994).



Obrázek 30 Část brnění s vytvořenými ornamenty pomocí chemického leptání, zdroj: V&A (2020)

V sedmnáctém století se leptání začalo používat k vytváření stupnic na měřicích přístrojích. Tenkost linií, které se leptáním mohl vyrobit, umožňovala výrobu přesnějších nástrojů. V roce 1782 objevil John Senebier, že některé roztoky při vystavení světlu ztratily svoji rozpustnost vůči terpentýnu a vytvrdili se. To umožnilo zjednodušení nanášení ochranného filmu na materiál. Kapalný maskovací nátěr stačilo nanést na celý povrch materiálu a obrys maskované oblasti se vytvrdil vystavením UV záření, zbytek nevytvrzeného ochranného filmu stačilo opláchnout. Tato metoda

nanášení ochranné masky se nazývá fotochemická. Účinnější fotorezistní filmy a silnější kyseliny vyvinuté ve 20. století umožnily chemické leptání silnějších kovů. V 60. letech 20. století bylo fotochemické obrábění klíčovým nástrojem ve vývoji desek plošných spojů, které vedly k moderním počítačům (BELLOWS,1982; JAGADEESHA,2016).

7.2 Princip

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, nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem. Místa, která nemají být leptána, jsou chráněna speciálním povlakem neboli ochranným filmem. Masky se nanášejí na povrch buď nátěrem, nebo nástřikem. Ochranné filmy tvoří chemicky odolnou vrstvu, která musí být lehce odstranitelná před a po leptání (MORÁVEK,1994; BARCAL,1989).

7.3 Postup chemického obrábění

Proces chemického obrábění má několik základních kroků, a to přípravu materiálu, nanášení ochranného filmu, leptání a finální úpravu. Všechny tyto kroky jsou přehledně popsány v následujících odstavcích.

7.3.1 Příprava materiálu

Materiál je nařezán na specifikovanou velikost plechu a je chemicky vyčištěn, aby se z povrchu odstranily všechny nečistoty, prach, mastnota, olej a aby bylo zaručeno pevné spojení ochranného filmu s povrchem kovu. V 80. letech 20. století bylo běžnou metodou odmašťování rozpouštědly jako je trichlorethylen, avšak tyto látky jsou velice nebezpečné pro životní prostředí, a proto se od nich postupně odstupovalo. Dnes je většina kovů čištěna jemnými mýdly. Plechy se přivádějí přes velký čtyřkomorový dopravníkový postřikovací stroj, přičemž každá komora obsahuje jinou koncentraci čisticích prostředků a tři stupně oplachování. Závěrečné opláchnutí je v deionizované vodě, aby bylo zajištěno, že jsou plechy skutečně čisté a připravené na další krok v procesu (BELLOWS,1982; JAGADEESHA,2016).

7.3.2 Nanášení ochranného filmu

Ochranný povlak se používá k ochraně oblastí obrobku, které nemají být vystaveny leptání, a tím i určuje jeho výsledný tvar. V tabulce 9 je uvedeno stručné rozdělení materiálů obrobků a k nim vhodných materiálů ochranného filmu.

Tabulka 9 Rozdělení materiálů a ochranných filmů, zdroj: (Bellows,1982)

Materiál obrobku	Materiál ochranného filmu
Slitiny hliníku	Polymery, neopren
Slitiny železa	Polymery, polyvinylchlorid
Slitiny niklu	Neopren
Slitiny Hořčíku	Polymery
Slitiny mědi	Polymery
Titan	Polymery
Křemík	polymery

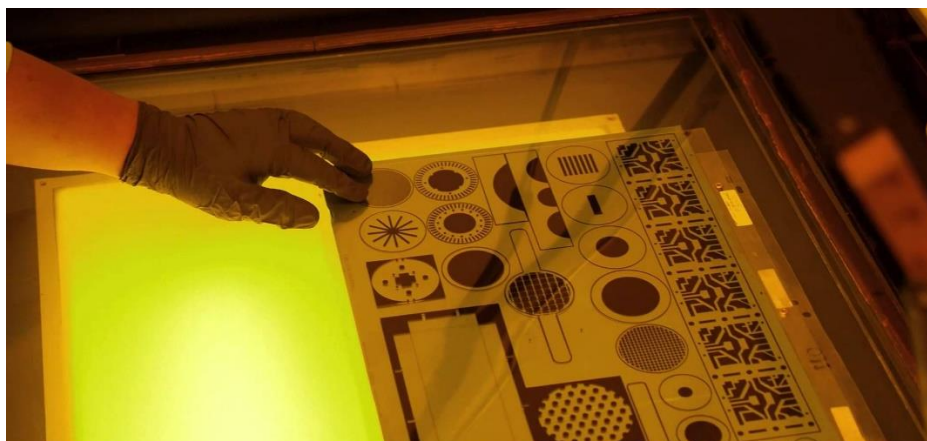
Jsou tři druhy ochranných filmů, které se dnes obecně používají a jsou to vytvrzovací ochranný film, fotografický ochranný film a ochranný film nanášený sítotiskem (BELLOWS,1982; JAGADEESHA,2016).

1. Vytvrzovací ochranný film

Vytvrzovací ochranný film se nanáší máčením nebo stříkáním povlaku o tloušťce 0,20-0,38 mm. V oblastech, které mají být leptány se ochranný film odstraňuje řezáním a ručním odlupováním obvykle pomocí šablony, která zvyšuje přesnost. Tento způsob odstraňování ochranného filmu je ale časově náročný, a navíc při neopatrném řezání hrozí poškození povrchu obrobku. Dnes se proto stále častěji využívá ořezávání ochranného filmu laserem. Využitím tohoto typu ochranného filmu lze dosáhnout hloubky leptání až 12,7 mm (BELLOWS,1982; JAGADEESHA,2016).

2. Fotografický ochranný film

Nanášení fotografického ochranného filmu, podobně jako u technologie vytvrzovacího ochranného filmu, se nanáší máčením nebo stříkáním. Následně se na plech položí clona zobrazená na obrázku 31 a obsluha vytvoří vakuum, aby se eliminovali jakékoliv vzduchové bubliny mezi clonou a kovem s vrstvou ochranného filmu. Poté je materiál vystaven UV záření. V oblasti clony, která bránila UV záření ochranný film nevytvrzнул a je následně odstraněn vysokotlakým čističem s alkalickým roztokem, aby se odkryl holý kov. Tato metoda je relativně náročná na realizaci, neboť fotografický ochranný film je velmi tenký a náchylný na poškození. Metoda se proto využívá především tam, kde jsou požadovány přesnější rozměry (BELLOWS,1982; JAGADEESHA,2016).



Obrázek 31 Clona používaná k blokování UV záření, zdroj: Photo etching specialists(2020)

3. Ochranný film nanášený sítotiskem

Ochranné filmy nanášené sítotiskem se aplikují přes síť z polyesteru nebo nerezové oceli, která má na sobě šablonu obrazu. Ačkoli jsou šablony obvykle vytvářeny fotograficky, přesnost tisku se nepřibližuje přesnosti fotografické metodě ochranného filmu. Sítotisk je rychlá metoda výroby velkého počtu dílů pro střední přesnost. Tato metoda je, co se výhod i nevýhod týče, kompromisem mezi výše zmíněnými technologiemi nanášení ochranného filmu. V tabulce 10 jsou srovnány metody ochranných filmů a jejich přesností a dosahovaných tloušťek filmu (BELLOWS,1982; JAGADEESHA,2016).

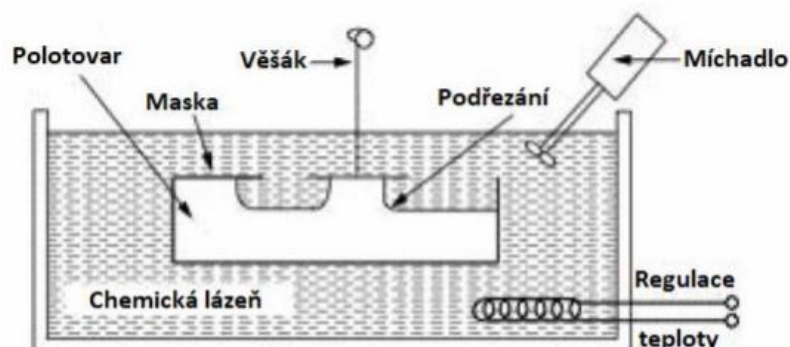
Tabulka 10 Porovnání ochranných filmů, zdroj: (Morávek,1994)

Typ masky	Dosahovaná tloušťka [mm]	Min. rozsah tolerancí [mm]
Vytvrzovací	až 2	$\pm 0,125$
Nanášený pomocí sítotisku	až 0,125	$\pm 0,076$
fotografický	až 0,125	$\pm 0,013$

7.3.3 Leptání

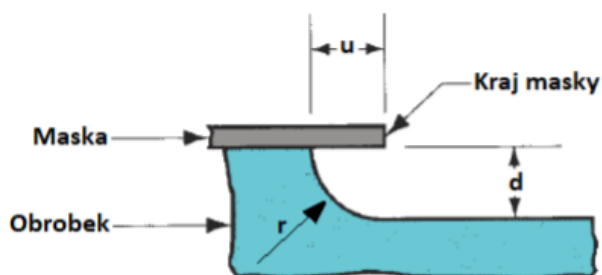
V tomto kroku dochází k úběru materiálu. Obrobek je ponořen do leptadla, kde je materiál obrobku bez ochranného filmu odstraněn chemickým působením, kdy se kovové ionty materiálu polotovaru váží na leptadlo. Leptadlo je v lázni promícháváno a vyhříváno, aby bylo dosaženo správných chemických reakcí. Leptadlo je vybráno

v závislosti na materiálu obrobku, rychlosti úběru materiálu a požadované povrchové úpravě (BELLOWS,1982; PÍŠKA,2009). Schéma tohoto procesu je znázorněno na obrázku 32.



Obrázek 32 Schematické zobrazení leptání u chemického obrábění, zdroj: The engineering post (2019)

Při procesu leptání dochází k podleptávání. Leptadlo se dostává pod ochranný film a dochází tak k úběru materiálu i v nežádoucích místech, jak je patrné z obrázku 33. Dochází tak k tvorbě rádiusu, a proto je nemožné dosáhnout ostrých hran touto metodou. Tento jev je nejčastěji způsoben dlouhodobým vystavením obrobku procesu leptání a lze snížit použitím leptadel s rozdílnou rychlostí leptání (BELLOWS,1982; PÍŠKA,2009).



Obrázek 33 Schematické zobrazení podleptávání, zdroj: The engineering post (2019)

7.3.4 Finální úprava

Po skončení procesu leptání je třeba odstranit ochranný film, zbytky leptadel a ostatních nečistot. Ochranný film je z větší části odstraněn mechanickou cestou a zbytkové části jsou dočištěny chemickou cestou. Poté se obrobek očistí ve vodě od nečistot a zbytkových chemikálií. Poté se už jen vysouší, aby se zabránilo korozi (BELLOWS,1982; PÍŠKA,2009).

7.4 Výroba pomocí chemického obrábění

Chemické obrábění je i v dnešní době velice důležitá a v některých oblastech nenahraditelná technologie výroby. I když má tato metoda spousty pozitiv má také své negativa. Jejich výčet je uveden v tabulce 11. Uplatnění nachází zejména tam, kde použití konvenčních technologií obrábění by bylo velice nákladné, případně zcela nepoužitelné. V leteckém průmyslu se používá primárně ke snižování hmotnosti leteckých komponent, panelů, výlisků a výkovek. V automobilovém průmyslu nachází využití ve vytváření velkého množství děr nebo při gravírování. Na obrázku 34 je uveden příklad využití této metody v automobilové průmyslu.

Tabulka 11 Pozitiva a negativa obrábění chemickým způsobem, zdroj: (Morávek,1994)

Pozitiva	negativa
Nepůsobí žádnou silou na obráběný materiál	Podřezávání je problém, který snižuje přesnost obrábění
Nevyžaduje kvalifikovanou obsluhu	Chemické obrábění výrazně ovlivňuje životní prostředí
Malé díly se vyrábějí najednou na jedné desce, což urychluje výrobu	Proces úběru materiálu je pomalý
Nevytváří otřepy	Může vytvářet toxické vedlejší produkty



Obrázek 34 Mřížka reproduktorů z nerezové oceli vyrobené pomocí chemického obrábění, zdroj: Masteretch (2019)

8 Obrábění ultrazvukem

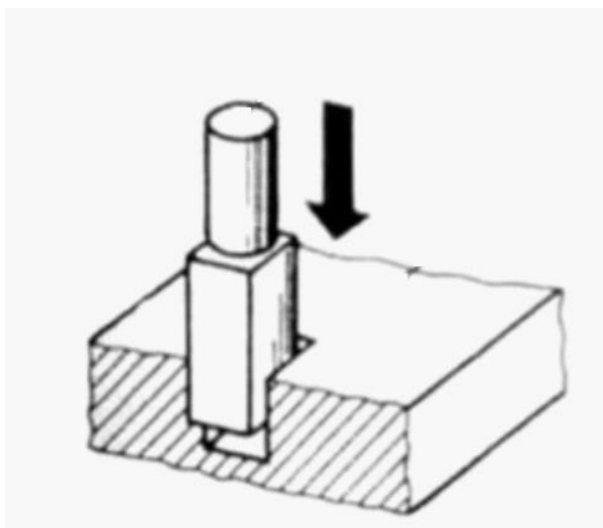
Tato metoda také známá jako ultrazvukové nárazové broušení je operace, která zahrnuje vibrační nástroj kolísající ultrazvukové frekvence a abrazivní kapalinu, která je mezi nástrojem a obrobkem. Díky tomu se nástroj a obrobek nikdy vzájemně nedotýkají. Tato metoda je velice vhodnou pro práci s tvrdými materiály, jako je sklo, keramika, křemen, diamanty, technická keramika, oxid hlinitý a podobné.

8.1 Historie

Ultrazvukové obrábění je relativně stará technologie, jejíž základy byly položeny již v roce 1927 a patentovány L. Balamuthem v roce 1945. Technologie pracuje na řezání pomocí abrazivní kaše proudící mezi vibrační špičkou měniče a obrobkem. Jedná se o technologii, která dosáhla uznávaného postavení ve výrobní technologii a našla rostoucí uplatnění v průmyslových odvětvích, včetně letectví, optiky a automobilového průmyslu. První ultrazvukové obráběče byli většinou namontované na tělech vrtacích a frézovacích strojů a byly vyráběny v 50. letech 20.století. Do roku 1960 byly nezávislé ultrazvukové stroje různých typů komercializovány a začaly se běžně vyrábět pro všestranné použití. Dnes se tato technologie používá pro obrábění tvrdých a křehkých materiálů.

8.2 Princip

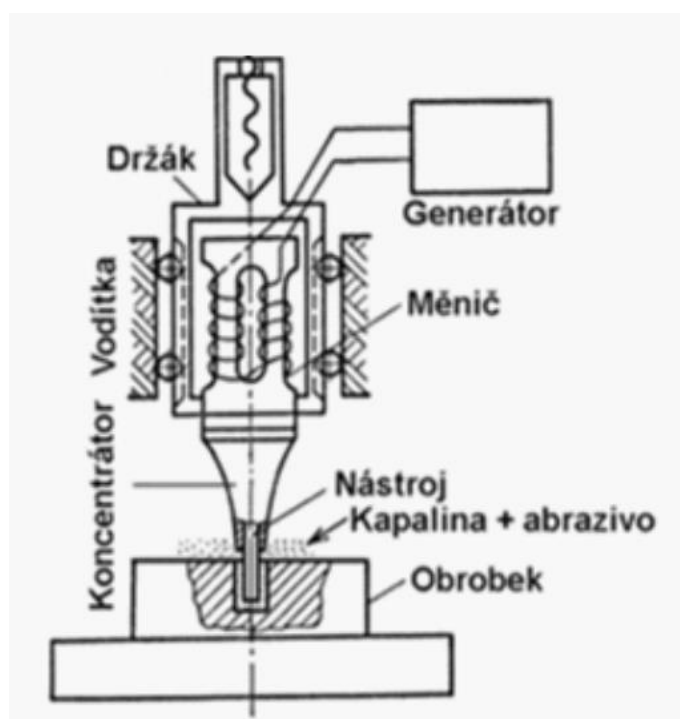
Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu kmity o frekvenci 18 až 25 kHz. Tento proces využívá mechanického kmitání šířícího se v plynech, kapalinách a tuhých tělesech. Zrna, která kmitají díky nástroji na stejné frekvenci pronikají a rozrušují materiál. (PÍŠKA,2009; ASTASHEV, 2010; BARCAL,1989) Nástroj je do obrobku přitlačován pro každý materiál jinou určenou silou a rychlostí které způsobují překopírování tvaru nástroje do obráběného materiálu což je vyobrazeno na obrázku 35.



Obrázek 35 Schématické zobrazení principu pohybu nástrojové elektrody ku obrobku, zdroj: Řasa a spol (2007)

8.3 Zařízení pro obrábění ultrazvukem

Hlavními prvky ultrazvukového obrábění je generátor ultrazvukových kmitů, měnič, koncentrátor a samotný nástroj. Schéma tohoto zařízení je zobrazeno na obrázku 36. Jednotlivé části stroje si popíšeme v následujících odstavcích.



Obrázek 36 Schématické zobrazení zařízení pro obrábění pomocí ultrazvuku, zdroj: Řasa a spol. (2007)

8.3.1 Generátor ultrazvukových kmitů

Tato jednotka převádí nízkofrekvenční 50 Hz elektrický proud na proud o frekvenci 20 kHz.

8.3.2 Měnič

Vysokofrekvenční elektrický proud je přenášen do měniče, který jej převádí na vysokofrekvenční vibrace s nízkou amplitudou. Funkce měniče je převést elektrickou energii na mechanické vibrace. Existují dva základní typy, a to piezoelektrický a magnetostrikční měnič (MORÁVEK,1994; ASTASHEV 2010).

a) Piezoelektrický měnič:

Tyto měniče generují malý elektrický proud, když jsou stlačeny. Pokud skrz ně prochází elektrický proud krystal zvětšuje svůj objem. Když je proud odstraněn, krystal získá svou původní velikost a tvar. Tyto měniče dosahují výkonu až 900 wattů. Piezoelektrické krystaly mají vysokou účinnost a to až 95 % (MORÁVEK,1994; ASTASHEV 2010).

b) Magnetostrikční měnič:

Tento měnič využívá magnetostrikční efekt, který objevil James Joule v roce 1874. Podle tohoto efektu se za přítomnosti magnetického pole mění délka feromagnetických kovů a slitin. Tyto měniče jsou vyrobeny z niklu nebo plechů ze slitiny niklu. Jejich účinnost je přibližně 20–30 %. Tento typ měniče dosahuje výkonu až 2 000 wattů. Maximální změnu délky, které lze dosáhnout, je přibližně 25 mikronů (MORÁVEK,1994; ASTASHEV 2010).

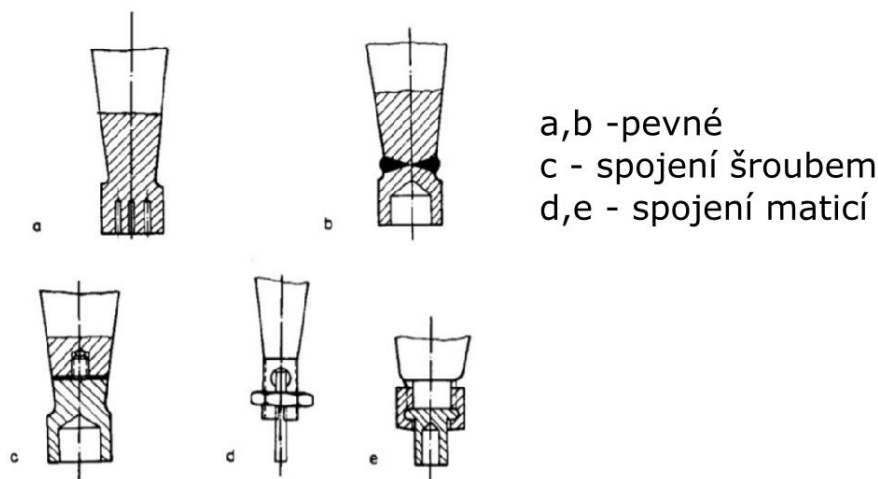
8.3.3 Koncentrátor

Amplituda oscilace získaná z magnetostrikčního měniče je obvykle příliš malá pro odstranění materiálu z obrobku. Funkcí koncentrátoru je zesílení amplitudy vibrací magnetostrikčního měniče od 5 do 50 mikronů. Koncentrátor také soustřeďuje energii na menší obráběcí plochu (MORÁVEK,1994; ASTASHEV 2010).

8.3.4 Nástroj

Nástroje pro ultrazvukové obrábění musí vyhovovat rezonančním podmínkám, které zaručují efektivní činnost ultrazvukové kmitající soustavy určené pro obrábění. Během obráběcího procesu přichází nástroj do přímého styku s brusivem. Ultrazvukový nástroj spolu s koncentrátorem musí být zkonstruovány tak, aby nenarušovali

rezonanční režim ultrazvukové soustavy (MORÁVEK,1994; ASTASHEV 2010). Spojení nástroje s koncentrátorem může být pevné nebo rozebíratelné což je zobrazeno na obrázku 37.



Obrázek 37 Zobrazení typů spojení nástroje a koncentrátoru, zdroj: Řasa a spol. (2007)

Pevné spojení umožňuje spolehlivé a přesné obrábění, je však ekonomicky velice nákladné a mnohdy i velice komplikované na výrobu. Po opotřebení se musí vyměnit nástroj i s koncentrátorem což je značně nevýhodné. Rozebíratelné spojení s nástrojem je možno zhotovit uchycením v kleštině, našroubováním nebo uchycením převlečnou maticí. Tyto spoje však můžou ovlivňovat přenos ultrazvukových kmitů. Proto se nástroje s rozebíratelným spojem používají zejména při menších amplitudách kmitů. Nástroje jsou vyrobeny z houževnatých materiálů jako jsou například konstrukční nebo nerezové oceli, které jsou dostatečně odolné proti broušení, a to z důvodu co nejmenšího opotřebenosti nástroje (MORÁVEK,1994; JAGADEESHA,2016).

8.3.5 Abraziva a abrazivní kapaliny

V této metodě se používá velké množství abraziv a kapalin s abrazivy. Nejběžnější z abraziv je karbid boru, karbid křemíku, oxid hlinitý a diamantový prach. Borové abrazivní částice se používají k obrábění wolframu, oceli a drahých kamenů. Na tyto materiály se také používá karbid křemíku, který je o 8–12% abrazivnější než karbid boru. Oxid hlinitý se používá k obrábění keramiky, skla a germania. Diamanty a rubíny jsou broušeny diamantovým práškem. Životnost brusiva závisí na tvrdosti brusného materiálu a pracovních kombinacích (MORÁVEK,1994; JAGADEESHA,2016). V tabulce 12 je uveden seznam materiálů spolu s jejich relativní obrobiteľností.

Tabulka 12 Srovnání materiálů na základě jejich relativní obrobiteľnosti pomocí ultrazvukové metody, zdroj: (Morávek,1994)

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

Delší životnosti brusiva lze dosáhnout, když je tvrdost brusiva větší než tvrdost pracovního materiálu. Rychlost úběru kovu a povrchová úprava závisí na velikosti abrazivních částic. Hrubá zrna poskytují vyšší úběr materiálu, ale nižší kvalitu povrchu. Abraziva cirkulují spolu s kapalinou v pracovním režimu pomocí čerpadla. Aby se odstranilo teplo vytvořené obráběním, kapalina se chladí v chladícím zařízení na teplotu 5–6 ° C. Jako kapalným nosičem abraziva se používá voda, protože splňuje většinu důležitých požadavků jako je dobrá tepelná vodivost, nízká viskozita a působí dobře na přenos akustické vazba mezi nástrojem a obrobkem. Do vody se obvykle také přidává inhibitor koroze (MORÁVEK,1994; JAGADEESHA,2016).

8.4 Výroba pomocí ultrazvukového obrábění

Ultrazvukové obrábění je velice oblíbená metoda, která má spousty výhod a také nevýhod, nejdůležitější z nich jsou uvedené v tabulce 13. Materiály, které se běžně opracovávají pomocí ultrazvukových metod je keramika, karbidy, sklo, drahé kameny a kalené oceli. Tyto materiály se používají v optických, elektrických a strojních aplikacích, kde jsou vyžadovány přesnější metody obrábění, aby byla zajištěna přesnost rozměrů a kvalita opracování tvrdých a křehkých materiálů. Jako příklad si můžeme uvést obrábění matic pro tažení drátu nebo obrábění keramických součástí, které je zobrazeno na obrázku 38.

Tabulka 13 Pozitiva a negativa ultrazvukového obrábění, zdroj: (Morávek,1994)

Pozitiva	negativa
Vysoce křehké materiály lze snadno obrobit	Pomalé odebrání materiálu ve srovnání s konvenčními metodami.
Pomocí této metody lze vyrobit kruhové i nekruhové otvory velmi malý rozměru.	Tvárný kov nelze touto metodou zpracovat
Možnost obrábění vodivých i nevodivých materiálů	Nelze jej použít k vrtání hlubokých děr
Obráběný materiál není nijak tepelně ovlivněn	Špička nástroje se rychle opotřebovává kvůli neustálému nárazu abrazivních částic



Obrázek 38 Obrábění keramické příruby pomocí ultrazvukového obrábění zdroj: Complete machinig with enhanced (2016)

9 Volba vhodné technologie obrábění na základě kvality a přesnosti obrobené plochy

Každá nekonvenční metoda obrábění má své klady a zápory, takže je někdy obtížné zvolit tu správnou. V následujících kapitole jsou porovnány jednotlivé metody v závislosti na kvalitě povrchu a přesnosti rozměrů, což jsou jedny z nejdůležitějších parametrů při obrábění.

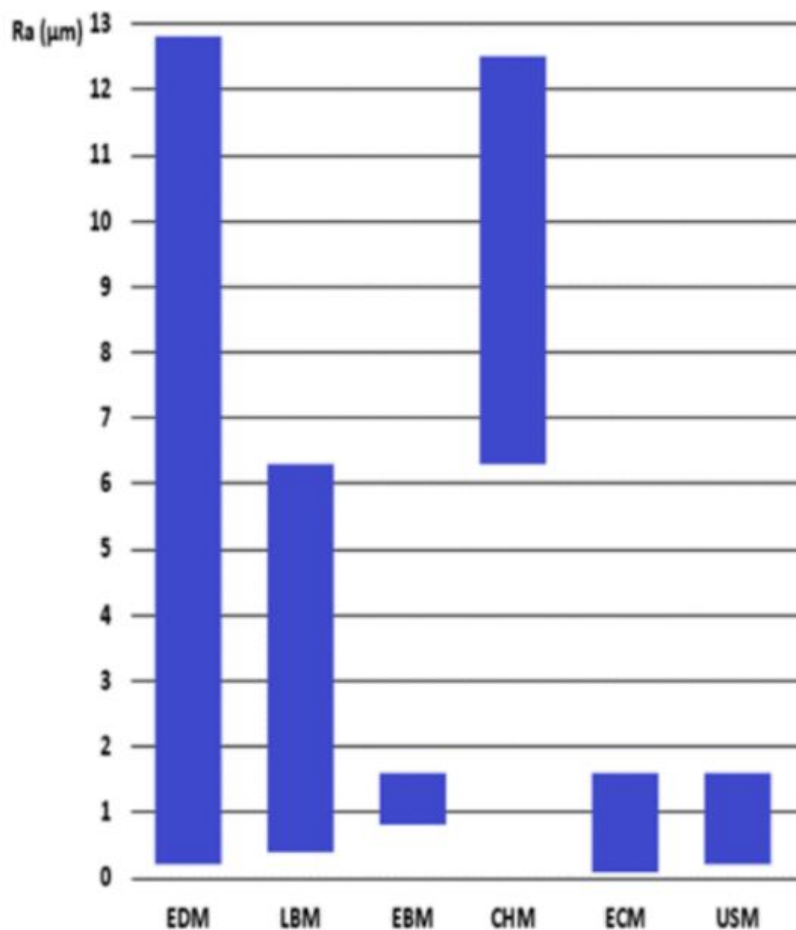
Základním kritériem pro porovnání výsledného povrchu obrobených součástí je drsnost povrchu, která je číselně vyjádřena jako průměrná aritmetická úchylka profilu označována jako Ra.

Dosahované hodnoty Ra jednotlivých technologií jsou uvedeny v tabulce 14 a graficky znázorněny v grafu 1 kde USM značí ultrazvukové obrábění, CHM chemické obrábění, ECH elektrochemické obrábění, EDM elektroerozivní obrábění, LBM laserové obrábění a EBM obrábění elektronovým paprskem. Znalost těchto hodnot je velice důležitá pro správný výběr výrobní technologie.

Z grafu je vidět že všechny metody až na chemické obrábění dosahují drsnosti povrchu nižší než Ra 1 mikrometr. Nejlepší povrch získáme pomocí elektrochemické metody a to až Ra < 0,2 mikrometru. Z pohledu rozsahu drsností je patrné, že vede elektroerozivní, laserové a chemické obrábění.

Tabulka 14 Srovnání nekonvenčních metod na základě kvality obrobené plochy, zdroj: (Barcal,1989)

Ra [μm]	USM	CHM	ECM	EDM	LBM	EBM
< 0,2			X			
0,2 -0,4	X		X	X		
0,4 – 0,8	X		X	X	X	
0,8 – 1,6	X		X	X	X	X
1,6 – 3,2				X	X	
3,2 – 6,3				X	X	
6,3 – 12,5		X		X		
12,5<				X		



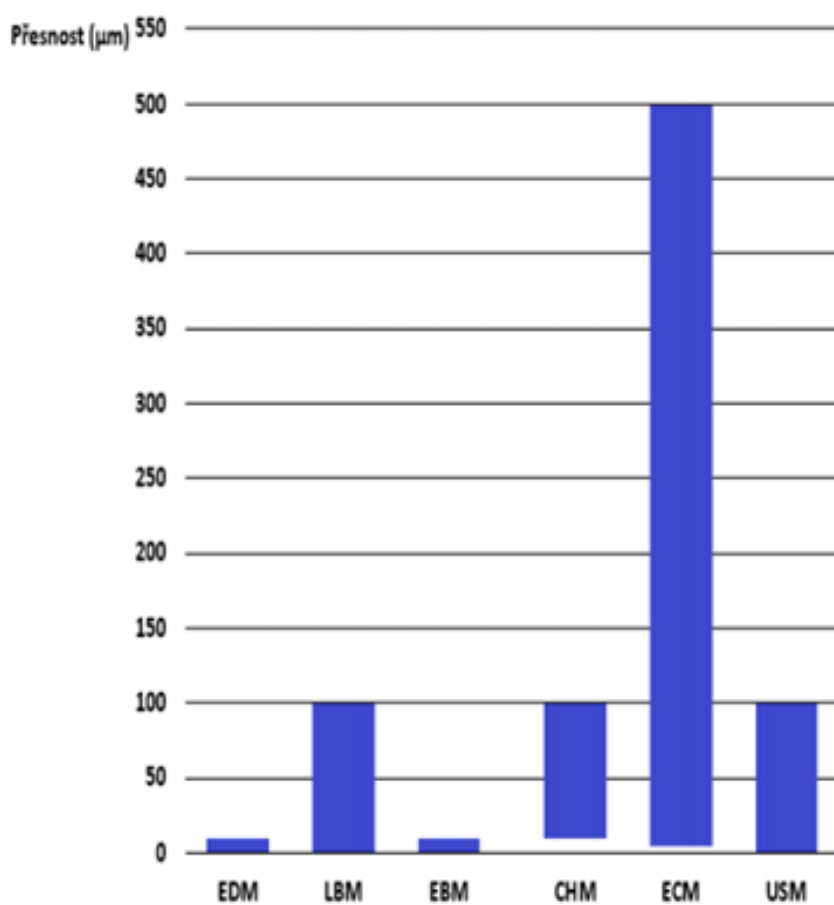
Graf 1: Srovnání nekonvenčních metod a kvality obrobené plochy, zdroj: (Barcal,1989)

Dalším velice důležitým kritériem ovlivňujícím jakost a kvalitu výrobku, je jeho geometrická a rozměrová přesnost. Hodnoty přesnosti výroby zvolených nekonvenčních metod obrábění jsou uvedeny v tabulce 15 a graficky znázorněny v grafu 2. Z grafu a tabulky je patrné že nejvyšší přesnost dosáhneme pomocí obrábění elektronovým paprskem u kterého se odchylka pohybuje pouze pod 1 micrometr. V těsném závěsu je elektroerozivní, laserové a ultrazvukové obrábění které dosahuje odchylky pouze 1 až 5 micrometrů.

Z pohledu rozsahu dosahovaných tolerancí vyniká elektrochemického obrábění, které v závislosti na použitých postupech na rozdíl od ostatních značně mění svoji přesnost.

Tabulka 15 Srovnání nekonvenčních metod obrábění na základě přesnosti obrobků, zdroj: (Barcal,1989)

Přesnost [μm]	USM	CHM	ECM	EDM	LBM	EBM
$< \pm 1$						X
$\pm 1 - \pm 5$	X			X	X	X
$\pm 5 - \pm 10$	X		X	X	X	X
$\pm 10 - \pm 50$	X	X	X		X	
$\pm 50 - \pm 100$	X	X	X		X	
$\pm 100 - \pm 500$			X			
$\pm 500 <$						



Graf 2: Srovnání nekonvenčních metod obrábění a přesnosti obrobků, zdroj: (Barcal,1989)

Závěr

Neustálý tlak ze strany konkurence a náročné požadavky zákazníků jsou v dnešní době hlavními důvody, které nutí technology a také konstruktéry využívat nové materiály a pracovat na nových řešeních a postupech při jejich zpracování. Mezi nejčastější požadavky dnešní doby patří snaha o co nejvyšší kvalitu výroby, zefektivnění výrobního postupu a v neposlední řadě ekonomičnost výroby.

Jedním z řešení výše zmíněných požadavků často se vyskytujícím v technické praxi, je použití nekonvenčních způsobů obrábění. Se zvyšujícími požadavky na množství obroběných součástí z vysoce pevných, nebo tvrdých materiálů se nekonvenční metody obrábění dostávají stále více do popředí. Hlavním důvodem rozšiřování těchto metod je že konvenční metody obrábění nejsou vždy ekonomicky výhodné a technicky vhodné pro obrábění zmíněných materiálů. Nekonvenční metody obrábění jsou tudíž využívány především v případech, kdy se ukázali konvenční způsoby obrábění jako nevhodné nebo neefektivní.

Nekonvenční technologie obrábění mají také své slabé stránky, mezi které patří vysoká pořizovací cena obráběcího zařízení, menší produktivita nebo u některých metod vysoká energetická náročnost a nutnost ekologické likvidace pracovních kapalin, používaných při obrábění. Pro výběr optimální nekonvenční technologie je zapotřebí brát v úvahu celou řadu hledisek. Obecně však nelze jednoznačně určit, jaká z technologií je nejlepší či nejhorší, neboť každá má své pozitiva a negativa. Volba optimální nekonvenční technologie závisí na technologovi, který musí při jejím výběru zohlednit profil a funkci obráběné součástky jakož i drsnost povrchu přesnost rozměrů a pevnost materiálu.

Seznam použité literatury

- Barcal J. (1989) Nekonvenční metody obrábění, Ediční středisko ČVUT, Praha,
- Dahotre a spol. (2008). *Laser Fabrication and Machining of Materials*. New York: Springer Science Business Media, 558 s. ISBN 978-0-387-72343-3.
- ELUC. (2017). *elektroerozivní obrábění*. [online][cit. 15.3.2021]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/>
- Europe PMC. (2019). *Electric discharge machinig*. [online][cit. 20.2.2021]. Dostupné z: <https://europepmc.org/article/med/31687496>.
- Engineering and Technology History Wiki. (2019). *Laser*. [online][cit. 23.3.2021]. Dostupné z: <https://ethw.org/Laser>.
- FilterMart. (2020). *EDM filters*. [online][cit. 8.3.2021]. Dostupné z: <http://www.filtermart.com/industrial-filters/edm-filters>.
- Bellows G. (1982) *Chemical Machining: Production with Chemistry*. Machinability Data Center, ISBN 0936974087.
- Kibria G. a spol. (2019) *Micro-electrical discharge machinig*, Springer-Verlag, ISBN 9811330735.
- High performance ceramic machining. *Machiningnews* [online][cit. 12.12.2020]. Dostupné z: <http://www.machiningnews.com/2016/03/complete-machining-with-enhancedultrasonic-20-linear-from-dmg-mori/>
- Koehler W. (1999), *Solid-state laser engineering*. New York:Springer, , 746 p. ISBN 35-406-5064-4.
- Jagadeesha T. (2016) *Unconventional Machining Processes*. I K International Publishing House, ISBN 9789385909115.
- Karafiátová S. a LANGER I. (1998) *Nekonvenční technologie*. Havlíčkův Brod: Fragment, Učebnice pro odborné školy, ISBN 80-7200-296-1.
- Maňková I. (2000) *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
- Mohan K. (2012) *Electro Discharge Machining Studies*. 2012. LAP Lambert Academic Publishing. ISBN 9783848423828.
- Morávek R. (1994) *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň: ZČV Plzeň, 102 s. ISBN: 80-7082-161-2
- Masteretch. (2019). *Chemical etching for automotive industry*. [online][cit. 2.2.2021]. Dostupné z: <https://www.masteretching.com/chemical-milled-speaker-grills-uk>.
-

NPTEL. (2015). *Non conventional machinig*. [online][cit. 7.2.2021]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/>.

NPTEL. (2009). *Electro discharge Machinig*. [online][cit. 18.3.2021]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/112/105/112105127/>.

Orient express. (2020). *Orient express racing*. [online][cit. 20.2.2021]. Dostupné z: <https://www.orientexpress.com/images/Product/large/3673.jpg>.

Píška M. (2009) Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, ISBN 9788021440258.

Plastic decoration. (2016). *Laser marking*. [online][cit. 20.12.2020]. Dostupné z: <https://plasticsdecorating.com/>

Photo etching specialists. (2020). *Photo etching*. [online][cit. 15.3.2021]. Dostupné z: <https://www.uweinc.com/>.

Rumyantsev E. (1989) Electrochemical Machinig of metals. Moscow: MIR Publishers, ISBN 5-03-000082-8.

Řaasa J. a Kerečaninová Z. (2007) Nekonvenční metody obrábění – 3. díl. MM Průmyslové spektrum. (12), 54. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-3-dil.html>

STASHEV V. (2010) Ultrasonic Processes and Machines. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, ISBN 9783642091247.

Sculpteo. (2016). *The History of Laser Cutting*. [online][cit. 3.2.2021]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/10/05/the-history-of-laser-cutting-from-masers-to-co2-laser-cutting/>.

Slideshare. (2014). *Laser*. [online][cit. 23.3.2021]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/sumsen16/laser-beam> („staženo dne: 20.12.2020).

Steigerwad strahltechnik. (2016). *History of ebm*. [online][cit. 3.1.2021]. Dostupné z: <https://www.sst-ebeam.com/en/electron-beam-technology/history-of-eb-technology.html>

SpringerLink. (2019). *electron beam machinig*. [online][cit. 10.3.2021]. Dostupné z: https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-3-662-53120-4_6480

The mechanical engineering. (2014). *Laser beam machinig*. [online][cit. 5.2.2021]. Dostupné z: <https://themechanicalengineering.com/laser-beam-machining/>

The engineering post. (2019). *chemicla machinig*. [online][cit. 15.3.2021]. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/>.

The electrochemical Society. (2005). *Electrochemical machining*. [online][cit. 8.3.2021]. Dostupné z: <https://knowledge.electrochem.org/encycl/art-m03-machining.htm>

The engineering post. (2019). *chemical machining*. [online][cit. 20.3.2021]. Dostupné z: <https://www.theengineerspost.com/>.

V&A. (2020). *Museum of art, design and performance*. [online][cit. 20.2.2021]. Dostupné z: http://www.vam.ac.uk/__data/assets/image/0009/187236/beautifully_bitten.jpg

VRBOVÁ a spol. (1998). Úvod do laserové techniky. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-0101-108-9.

Seznam obrázků

Obrázek 1 První funkční laser sestrojený Theodorem Maimanem, zdroj: Engineering and Technology History Wiki. (2019)	12
Obrázek 2 Kuman Patel s jedním z prvních CO2 laserů, zdroj: The history of laser Cutting (2016)	12
Obrázek 3 Záření běžného světelného zdroje a laseru, zdroj: Slideshare (2014)	13
Obrázek 4 Schéma zařízení pro obrábění laserovým paprskem, zdroj: The mechanical engineering (2014)	14
Obrázek 5 Schématické zobrazení principu funkce rezonátoru, zdroj: Slidesahre(2014)	15
Obrázek 6 Seřazení vybraných materiálů podle poddajnosti na fotonovou erozi a velikosti tepelné vodivosti (Barcal,1989)	17
Obrázek 7 Schématické znázornění pevnolátkového laseru (Barcal,1989)	18
Obrázek 8 Schématické znázornění plynového laseru (Barcal,1989)	18
Obrázek 9 Vlevo plastový díl s popisky vytvářenými pomocí laseru, vpravo frézování emblému, zdroj: Plastic deoocration(2016)	20
Obrázek 10 Jedno z prvních zařízení pro obrábění elektronovým paprskem, zdroj:Steigerwad atahltechnik(2016)	21
Obrázek 11 Schématické zobrazení dopadajících elektronů na povrch obrobku (Barcal,1989)	22
Obrázek 12 Schematické znázornění elektronového děla, zdroj: NPTEL (2015)	23
Obrázek 13 Schématické zobrazení zařízení pro vytváření vakua, zdroj: NPTEL (2015)	24
Obrázek 14 Nerezové síto s průměrem otvorů 0,25mm vytvořené pomocí elektronového obrábění, zdroj: SpringerLink. (2019)	25
Obrázek 15 Schématické zobrazení výboje mezi nástrojem a obrobkem, zdroj: ELUC (2017)	28
Obrázek 16 Schématické zobrazení zařízení pro obrábění elektroerozivní metodou (Barcal,1989)	29
Obrázek 17 Schéma a průběh RC generátoru, zdroj: NPTEL (2009)	30
Obrázek 18 Schéma a průběh rotačního generátoru, zdroj: NPTEL (2009)	30
Obrázek 19 Schéma a průběh tranzistorového generátoru, zdroj: NPTEL (2009)	31
Obrázek 20 Schématické zobrazení přívodu elektrolytu ponořením (Barcal,1989) .	33

Obrázek 21 Schématické zobrazení přívodu elektrolytu nuceným prouděním (Barcal,1989).....	33
Obrázek 22 Schématické zobrazení přívodu elektrolytu elektrodou (Barcal,1989) ..	34
Obrázek 23 Schématické zobrazení odvodu elektrolytu obrobkem (Barcal,1989)....	34
Obrázek 24 Příklad filtrů používaných pro elektroerozivní obrábění, zdroj: Filtermart (2020).....	35
Obrázek 25 Forma na světla automobilu vyrobená pomocí elektroerozivního obrábění, zdroj: Europe PMC (2019).....	36
Obrázek 26 Schematické zobrazení průběhu elektrochemického obrábění, zdroj: (Maňková 2000).....	38
Obrázek 27 Schématické zobrazení stroje pro elektrochemické obrábění, zdroje: The electrochemical society (2005)	39
Obrázek 28 Parametry mezery mezi nástrojem a obrobkem u elektrochemické metody, zdroj: Karafiátová a Langer, (1998).....	40
Obrázek 29 Kliková hřídel u které byly vytvořeny olejové kanálky pomocí elektroerozivní metody, zdroj: Orient express racing (2020)	42
Obrázek 30 Část brnění s vytvořenými ornamenty pomocí chemického leptání, zdroj: V&A (2020)	43
Obrázek 31 Clona používaná k blokování UV záření, zdroj: Photo etching specialists(2020).....	46
Obrázek 32 Schematické zobrazení leptání u chemického obrábění, zdroj: The engineering post (2019)	47
Obrázek 33 Schematické zobrazení podleptávání, zdroj: The engineering post (2019)	47
Obrázek 34 Mřížka reproduktorů z nerezové oceli vyrobené pomocí chemického obrábění, zdroj: Masteretch (2019).....	48
Obrázek 35 Schématické zobrazení principu pohybu nástrojové elektrody ku obrobku, zdroj: Řasa a spol (2007).....	50
Obrázek 36 Schématické zobrazení zařízení pro obrábění pomocí ultrazvuku, zdroj: Řasa a spol. (2007).....	50
Obrázek 37 Zobrazení typů spojení nástroje a koncentrátoru, zdroj: Řasa a spol. (2007)	52
Obrázek 38 Obrábění keramické příruby pomocí ultrazvukového obrábění zdroj: Complete machinig with enhanced (2016)	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Způsoby buzení pro vybraná aktivní prostředí zdroj: (Barcal,1989)	15
Tabulka 2 Pozitiva a negativa obrábění laserovým paprskem zdroj: (Morávek,1994)	20
Tabulka 4 Výběr materiálů pro elektronové obrábění s potřebnými parametry zdroj: (Barcal,1989).....	25
Tabulka 3 Pozitiva a negativa obrábění elektronovým paprskem zdroj: (Morávek,1994).....	26
Tabulka 5 Porovnání vhodných materiálů na nástrojovou elektrodu zdroj: (Barcal,1989).....	32
Tabulka 6 Pozitiva a negativa elektroerozivního obrábění zdroj: (Morávek,1994)...	36
Tabulka 7 Seznam materiálů elektrodu a materiálů vhodných na obrábění, zdroj: (Barcal, 1989).....	41
Tabulka 8 Pozitiva a negativa elektrochemického obrábění, zdroj: Barcal,1989	42
Tabulka 9 Rozdělení materiálů a ochranných filmů, zdroj: (Bellows,1982)	45
Tabulka 10 Porovnání ochranných filmů, zdroj: (Morávek,1994)	46
Tabulka 11 Pozitiva a negativa obrábění chemickým způsobem, zdroj: (Morávek,1994).....	48
Tabulka 12 Srovnání materiálů na základě jejich relativní obrobitelnosti pomocí ultrazvukové metody, zdroj: (Morávek,1994)	53
Tabulka 13 Pozitiva a negativa ultrazvukového obrábění, zdroj: (Morávek,1994)...	54
Tabulka 14 Srovnání nekonvenčních metod na základě kvality obrobene plochy, zdroj: (Barcal,1989).....	55
Tabulka 15 Srovnání nekonvenčních metod obrábění na základě přesnosti obrobenech ploch, zdroj: (Barcal,1989)	57

Seznam použitých zkratek

A – Ampér

Al – Hliník

CO₂ – oxid uhlíkový

Cu – Měď

Cr – Chrom

Co – Kobalt

EBM – Electron beam machining (Obrábění elektronovým paprskem)

ECM – Electro chemical machining (Elektrochemické obrábění)

EDM – Electro discharge machining (Elektroerozivní obrábění)

Fe – Železo

HCl – Kyselina chlorovodíková

H₂SO₄ – Kyselina sírová

Hz – Hertz

CHM – Chemical machining (Chemické obrábění)

LBM – Laser beam machining (Obrábění laserovým paprskem)

Mo – Molybed

NaOH – Hydroxid sodný

Ni – Nikl

NaClO₃ – Chlorečnan sodný

NaNO₃ – Dusičnan sodná

NaCl – Chlorid sodný

Pb – olovo

Sk – Slinutý karbid

Ti – Titan

USM – Ultrasonic machining (Ultrazvukové obrábění)

V – Volt

W – Wolfram

Zn – Zinek

λ – Tepelná vodivost
