

Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na elektrotepelné principy

Jan Kudělka

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KUDĚLKA**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Analýza Nekonvenčních technologií se zaměřením
elektrotepelné principy**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši se zaměřením na téma "Elektrotepelné a tepelné procesy obrábění"
2. Vypracujte studijní podklady pro výuku předmětu "Nekonvenční technologie" ve formě prezentací a názorných ukázek (video) těchto technologií
3. Vypracujte kontrolní testy pro řešenou problematiku

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

19. února 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

6. června 2008

Ve Zlíně dne 30. ledna 2008



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této práce je především seznámení s oblastí nekonvenčních metod obrábění se zaměřením na elektrotepelné a tepelné procesy. Tyto technologie jsou v současné době hojně používány v oblasti konstrukce vstřikovacích forem a tam kde se klade důraz na rychlost a přesnost opracování materiálu.

Praktická část je zpracována v elektronické podobě ve formě prezentací, které mohou posloužit jak pomůcka lektorům pro výuku tak i studentům při studiu.

Klíčová slova: nekonvenční technologie, elektrotepelné, tepelné, obrábění

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is to introduce to the reader the field of nonconventional methods of machining from point of view of electrothermal principles. These technologies are being used at the present-day in the field of injection moulds construction and there where we insist on speed and precision of material machining.

The practical part of the work is elaborated in form of presentations which can serve like teaching aid to the tutor as well as studying material for students.

Keywords: nonconventional technologies, electrothermal, thermal, machining

Poděkování

Touto cestou chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za poskytnuté rady, pozornost a čas strávený při odborném vedení této bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD..... | 8 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 9 |
| 1 NEKONVENČNÍ PROCESY OBRÁBĚNÍ | 10 |
| 1.1 ODLIŠNOSTI V POROVNÁNÍ S KLASICKÝMI TECHNOLOGIEMI | 10 |
| 1.2 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ..... | 11 |
| 1.3 SMĚRY VYUŽÍVÁNÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ..... | 12 |
| 2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE SE ZAMĚŘENÍM NA ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY | 13 |
| 2.1 ELEKTROEROZÍVNÍ OBRÁBĚNÍ EDM..... | 13 |
| 2.2 LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ LBM..... | 13 |
| 2.3 OBRÁBĚNÍ PLAZMOVÝM PAPRSKEM PAM | 13 |
| 2.4 OBRÁBĚNÍ ELEKTRONOVÝM PAPRSKEM EBM | 14 |
| 2.5 OBRÁBĚNÍ IONTOVÝM PAPRSKEM IBM..... | 14 |
| 2.6 POUŽITÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI ZPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ | 15 |
| 2.7 KRITÉRIA PRO VÝBĚR TECHNOLOGIE | 15 |
| 3 LASER..... | 16 |
| 3.1 PRINCIP | 16 |
| 3.2 ROZDĚLENÍ LASERŮ | 18 |
| 3.3 KLASIFIKACE LASEROVÝCH TECHNOLOGICKÝCH OPERACÍ | 19 |
| 3.4 ÚČINEK LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁL A ÚBĚR MATERIÁLU..... | 20 |
| 3.5 ZAŘÍZENÍ PRO LASEROVÉ OPRACOVÁNÍ | 21 |
| 3.5.1 CO ₂ laser | 22 |
| 3.5.2 Nd - YAG laser | 22 |
| 3.5.3 Excimerové lasery | 23 |
| 3.6 PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY LASERŮ | 24 |
| 3.7 KVALITA POVRCHU PO OPRACOVÁNÍ LASEREM..... | 25 |
| 3.8 POUŽITÍ LASEROVÉHO PAPRSKU | 26 |
| 3.9 VÝHODY OPRACOVÁNÍ LASEREM..... | 27 |
| 4 PLAZMA..... | 28 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.1 | VZNIK PLAZMY A PLAZMOVÉHO ZAŘÍZENÍ..... | 29 |
| 4.2 | PRINCIP TVORBY PLAZMY V HOŘÁKU..... | 29 |
| 4.3 | PLAZMOVÉ ZAŘÍZENÍ..... | 30 |
| 4.4 | MECHANIZMUS PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ MATERIÁLŮ..... | 33 |
| 4.5 | PROCES ÚBĚRU MATERIÁLU (ŘEZÁNÍ / DĚLENÍ) PLAZMOU JE OVLIVNĚNO NÁSLEDUJÍCÍMI PARAMETRY | 33 |
| 4.6 | POUŽITÍ PLAZMOVÉHO PAPERU PRO OPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ | 34 |
| 4.7 | DRUHY PLAZMOVÝCH ŘEZACÍCH STROJŮ | 34 |
| 5 | OPRACOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ..... | 35 |
| 5.1 | ZÁKLADNÍ POJMY | 35 |
| 5.2 | ÚČINEK DOPADU ELEKTRONŮ NA POVRCH MATERIÁLU..... | 36 |
| 5.3 | PRINCIP OPRACOVÁNÍ MATERIÁLU ELEKTRONOVÝMI PAPERKY..... | 37 |
| 5.4 | ZAŘÍZENÍ PRO OPRACOVÁNÍ ELEKTRONOVÝMI PAPERKY | 37 |
| 5.5 | OBLAST VYUŽITÍ TECHNOLOGIE ELEKTRONOVÉHO PAPERU | 40 |
| 5.6 | VRTÁNÍ ELEKTRONOVÝM PAPEREM..... | 40 |
| 5.6.1 | Posloupnost procesu..... | 40 |
| 5.6.2 | Výhody a nevýhody vrtání pomocí elektronového paprsku | 41 |
| 6 | STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE..... | 42 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 43 |
| 7 | PREZENTACE..... | 44 |
| 7.1 | SEZNÁMENÍ S NEKONVENČNÍMI TECHNOLOGIEMI | 45 |
| 7.2 | OBRÁBĚNÍ LASEREM..... | 47 |
| 7.3 | OBRÁBĚNÍ PLAZMOU | 51 |
| 7.4 | OPRACOVÁNÍ MATERIÁLU SVAZKEM ELEKTRONŮ..... | 54 |
| | ZÁVĚR | 57 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 58 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 59 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 61 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 62 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 63 |

ÚVOD

OBRÁBĚNÍ

Obrábění je široký pojem, který zahrnuje všechny metody tvarování produktů postupným odebráním určitého množství materiálu, který se nazývá přídavek. Je to technologický proces, kterým se vytváří požadovaný tvar obráběného předmětu (obrobku), v daných rozměrech a v daném stupni přesnosti. Obrábění je dynamická technologie, která zahrnuje několik vědních oborů a patří na přední místo ve výrobních technologiích.

Řezání - zahrnuje obrábění nástroji s definovanou geometrií řezné hrany, nástroj má jednu nebo více řezných hran, ve strojírenské výrobě se používá většinou při dělení dlouhých pásovin a kulatin na požadovaný rozměr (s ponecháním přídavku na další obrábění).

Abrazivní opracování - broušení, též definované německou literaturou jako opracování nástroji s neurčenou geometrií řezné hrany.

Progresivní, nebo netradiční (nekonvenční) procesy obrábění, které využívají na úběr fyzikální, elektrické, chemické a jiné zdroje energie.

KLASIFIKACE PROCESŮ OBRÁBĚNÍ

Při řezání je odřezávaná vrstva materiálu odebrána nástrojem s jednou nebo více řeznými hranami s určitou geometrií ve formě lidským okem viditelné třísky. Nástroj je v přímém kontaktu s obrobkem. Geometrie nástroje je určena a používána podle normy STN ISO 3002/1 (22 0011) a STN 22 0012.

Při broušení, také nazývaném abrazivním opracováním, je přídavek na obrábění odebraný nespočítatelným množstvím řezných hran brusiva s geometricky neurčenou řeznou hranou, ve formě rozměrově velmi malé třísky (mikrotřísky, popisově uváděné jako lidským okem neviditelné částice). Jednotlivé brusné zrna jsou v přímém kontaktu s povrchem obrobku.

Progresivní metody (netradiční, nekonvenční) úběru materiálu používají kromě mechanické energie i jiné formy energie na odebrání materiálu ve formě lidským okem neviditelných částic (mikro až nano částice). Na tvarování povrchu materiálu nevyužívají přímý kontakt nástroje, ale elektrické, tepelné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ PROCESY OBRÁBĚNÍ

Výrobní technologie, které využívají známé fyzikální a chemické jevy na úběr materiálu (akustické vlnění, vysokotlakový vodní paprsek, plazmu, tok fotonů – laser, elektrický výboj, elektrolýzu, tok elektronů a iontů).

Název progresivní způsoby úběru materiálu nebo progresivní způsoby obrábění se používá pro širokou škálu mechanických, elektrických tepelných a chemických procesů při úběru (odstraňování) materiálu, které byly vyvinuté převážně po roce 1940.

Stručnou definici progresivních (netradičních, nekonvenčních) technologií je těžké zavést, kvůli široko rozdílným procesům, které do této kategorie patří. V odborné literatuře panuje shoda v tom, že do této skupiny patří procesy zavedené za posledních 60 let 20. století, které používají běžné formy energie novým způsobem anebo používají energii, která nebyla nikdy předtím použita.

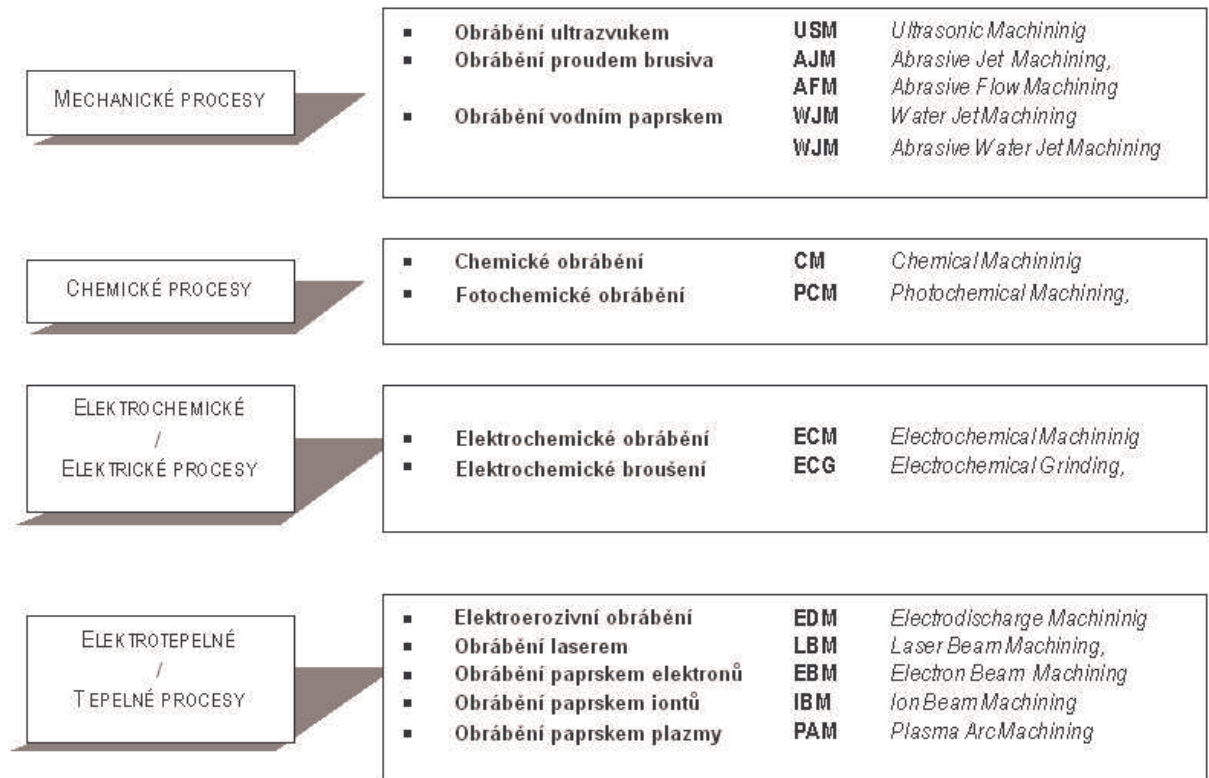
Původně byly tyto způsoby úběru určeny pro zvláštní použití, které nebylo extenzivně šířené. V současnosti je však toto konstatování zavádějící. I když většina těchto metod byla vyvinuta pro řešení speciálních úkolů v leteckém a kosmonautickém průmyslu v letech 1950 a 1960, dnes většina z nich nachází široké uplatnění v rozličných průmyslových odvětvích.

1.1 Odlišnosti v porovnání s klasickými technologiemi

- V místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor, řezná síla, obrobky se nedeformují vlivem mechanického zatížení.
- Úběr materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech materiálů jako je třeba tvrdost, pevnost, houževnatost a klasický pojem obrobitelnost ztrácí svůj význam.
- Úběr materiálu - oddělování částic je po čas jednoho cyklu (např. jeden impulz výboje při elektrojiskrovém opracování) a dochází k němu na velkém počtu lokalit současně. V závislosti na rozměrech odebíraných částic, může být úběr materiálu vyjádřen jedno - dvoj nebo trojrozměrnými hodnotami tj. délkou, plochou, průřezem nebo objemem.
- Opracovává se celý povrch obrobku naráz.

- Maximální velikost obrobku je limitovaná energetickou základnou zařízení ($10^2 - 10^3$ kW).
- Možnost mikroobrábění a dosahování „nano“ 10^{-9} mm rozměrů.
- Z místa úběru materiálu přechází méně tepla do hmoty obrobku, protože:
 - oddělování částic je mikrorozměrové a dochází k němu na velkém počtu lokalit,
 - frekvence elementárních úběrů je vysoká.
- Řeší problémy spojené s opotřebením nástroje při řezání a broušení.
- V porovnání s klasickými procesy vykazují vyšší spotřebu energie při úběru materiálu a o hodně nižší poměrný úběr.

1.2 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění



Obr.1. Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění

1.3 Směry využívání nekonvenčních technologií

- Využívání elektrické, tepelné, chemické a elektrochemické energie na podporu klasických procesů opracování s nástroji jako geometrickým tělesem, které **snižují intenzitu jeho opotřebení**.
- Využívání mechanické, elektrické, tepelné, chemické a elektrochemické energie v soustředěném energetickém svazku na opracování materiálů **bez použití nástroje jako geometrického tělesa**, nebo s podporou nástroje jako geometrického tělesa **bez jeho aktivní účasti na procese úběru materiálu**.
- Využívání progresivních technologií řeší požadavky **na zpracování těžkoobrobitelných konstrukčních materiálů, kde jsou kladeny nároky na:**
 - vysokou pevnost a tvrdost materiálů, obvykle nad 400 HB
 - opracování tenkostěnných a poddajných materiálů, kde působí řezné síly při mechanickém opracování (broušení, řezání, tváření) může mít za následek jejich deformaci.
 - složitost tvaru dílců, která způsobuje problémy při jejich upínání
 - přesnost a tolerance rozměrů, na drsnost dokončovaných povrchů (požadavek zrcadlově lesklých povrchů s optickou přesností),
 - integrita povrchů s cílem vyloučit nežádoucí tepelné ovlivnění povrchových vrstev a vznik zbytkových napětí pod povrchem.

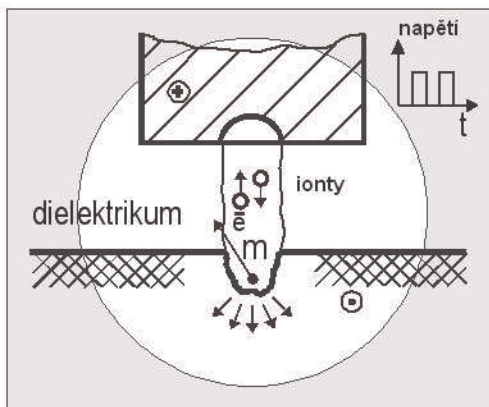
2 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE SE ZAMĚŘENÍM NA ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

2.1 Elektroerozivní obrábění EDM

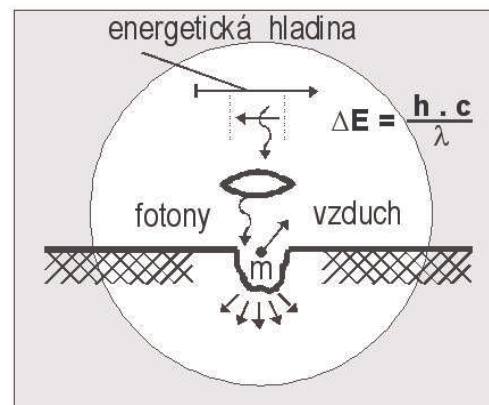
- K úběru materiálu dochází elektricky, pomocí rychle se **opakujících periodických impulzů jiskrového výboje za přítomnosti dielektrika** (kapalné médium).
- Pro **elektricky vodivé a tvrdé materiály**.
- **Nevýhody:** nutnost výroby vždy nové nástrojové elektrody při změně profilu dílce.
- EDM zvyšuje tvrdost vytvářené povrchové vrstvy (zpevnění) a redukuje mez únavy.

2.2 Laserové obrábění LBM

- Je zesílení světla pomocí vybudované emise záření (úzký svazek fotonů)
- Široko aplikovatelná technologie pro všechny druhy materiálů.
- **Nevýhody:** tepelně ovlivněná zóna, nerovnoměrnost řezu a vysoké nároky na přesnost nastavení ohniskové vzdálenosti paprsku od povrchu obrobku, nákladné zařízení a energeticky náročný proces.



Obr.2. Elektroerozivní obrábění EDM



Obr.3. Laserové obrábění LBM

2.3 Obrábění plazmovým paprskem PAM

- Plazma vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách 20 000°C nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou.
- Vhodné pro opracování všech kovových materiálů s vysokou rychlostí úběru.

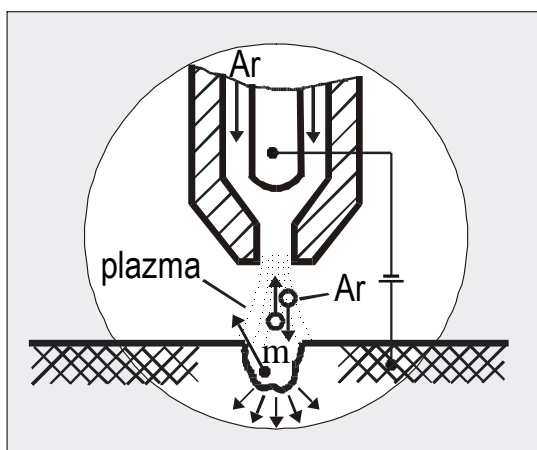
- **Nevýhody:** vysoké provozní náklady, náklady na zařízení a tepelně ovlivněná zóna řezu.

2.4 Obrábění elektronovým paprskem EBM

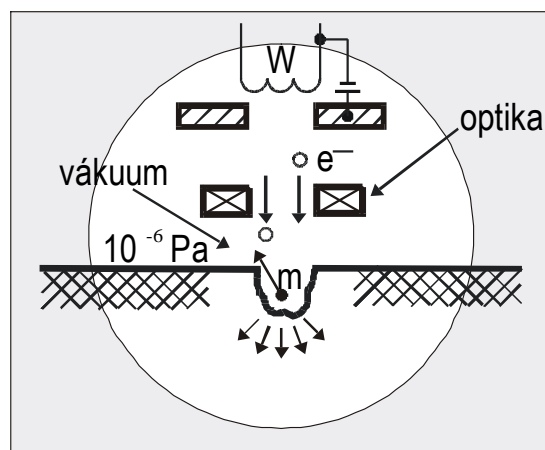
- Proces natavení a odpaření materiálu svazkem elektronů emitovaných žhavenou elektrodou ve vakuu.
- Pro práci se vyžaduje vakuové prostředí (vakuová komora).
- Vhodné pro vrtání otvorů, tvarování mikro rozměrů.
- **Nevýhody:** vysoké náklady na zařízení, (vrtání do hloubky 6 mm), nízká produktivita a tepelné ovlivnění vytvářeného povrchu.

2.5 Obrábění iontovým paprskem IBM

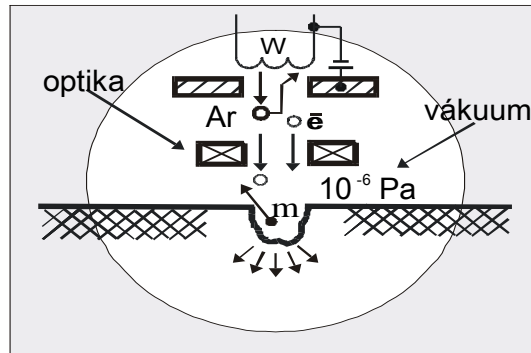
- Průběh ve vakuu, kde nabité atomy (ionty) ze zdroje iontů ostřelují povrch cíle (obrobku) pomocí urychlovacího napětí.
- Vhodné pro tvarování mikro a nano rozměrů a velmi jemné opracování povrchů.
- **Nevýhody:** vysoké náklady na zařízení.
- **Výhody:** povrchy nejsou ovlivněné teplem, není to tepelný proces ale dynamický



Obr.4. Obrábění plazmovým paprskem
PAM



Obr.5. Obrábění elektronovým paprskem
EBM



Obr.6. Obrábění iontovým paprskem IBM

2.6 Použití nekonvenčních technologií při zpracování materiálů

Tab.1. Použití nekonvenčních technologií při zpracování materiálů

| | Úběr a dělení materiálů | Spájení a zpevňování Modifikace povrchu | Tvarování Rozměrové opracování | Povrchová úpra- va |
|----------------------------|--------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| Laserový paprsek | LBM | sváření | Broušení | Kalení, vytvrzová- ní |
| Elektronový paprsek | EBM | sváření, naprašování | Leštění | Žhání, kalení |
| | EDM, WEDM | nárazové sváření | | |
| Iontový paprsek | LAM | Implantace iontového plátování | Iontové hlazení, leštění | Iontová nitridace |
| Plazma | Iontové opracování, leptání | Sváření TIG, MIG, spájení, pokovování | Leštění | kalení |
| Chemický paprsek | CM, PCM | CVD, chemické ce- mentování | Chemicko- mechanické leštění a broušení | Reaktivní chemic- ké čištění |
| Elektrochemický paprsek | ECM | potahování | Leštění | Reaktivní el.chemické čiště- ní |

2.7 Kritéria pro výběr technologie

Tab.2. Kritéria pro výběr technologie

| | |
|---------------------------|--|
| Obrobek | Tvar, rozměry, druh materiálu, citlivost na tlak, řezné síly, teplotu, korozi |
| Kvalita povrchu | Přesnost tvaru a rozměrové tolerance, integrita povrchu, reprodukovatelnost |
| Hospodárnost | Doba přípravy, výrobní čas, kapitálové náklady, provozní náklady (včetně nákladů na obsluhu- jící personál, nástroje, údržbu a běžné výdaje) |
| Provozní požadavky | Lidské zdroje: vzdálenost, zručnost, bezpečnost, pracovní podmínky, životní prostředí Organizační: flexibilita, předpoklady pro automatizaci a integraci do automatizovaných vý- robních systémů |

3 LASER

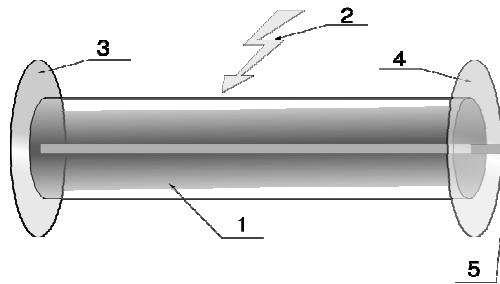
Obrábění laserem (LBM - Laser Beam Machining) patří k jedněm z mnoha průmyslových aplikací laserového paprsku. Historický vývoj poznatků o laserovém paprsku začíná popisem teoretických základů vynucené emise záření, které podal Albert Einstein v roce 1917. Avšak enormní rozvoj laserové technologie byl zaznamenán od roku 1971. V současnosti nachází laser široké uplatnění v různých oblastech. Nejznámější jsou:

- průmyslové aplikace laseru jako řezání, vrtání, sváření, tepelné zpracování (kalení), povrchové natavování, legování, nanášení povlaků, tvarování, obrábění, příprava kovových soustav v amorfním stavu, tepelné zpracování povrchů,
- nedestruktivní metody zkoušení,
- měřicí systémy v metrologii,
- CD přehrávače (kompakt disky),
- informační a telekomunikační technologie (přenos a uchovávání informací),
- humánní medicína ("laserový skalpel").

Laser je vhodný pro opracování materiálů, jako jsou kompozity, plasty, keramika, sklo, diamant, těžkoobrobitelné oceli.

3.1 Princip

- **Laser** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zesílení světla pomocí vybudované emise záření.
- Vzniká infračervené, ultrafialové nebo viditelné světelné záření.
- Laser je kvantový elektronický zesilovač a generátor světelných vln.



Obr.7. Konstrukce laseru

Laser je tvořen aktivním prostředním (1), rezonátorem (3,4) a zdrojem energie (2).

Zdrojem energie, který může představovat například výbojka, je do aktivního média dodávána ("pumpována") energie. Ta energeticky vybudí elektrony aktivního prostředí ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny, dojde k tzv. excitaci. Takto je do vyšších energetických stavů vybudena většina elektronů aktivního prostředí a vzniká tak tzv. inverzní populace.

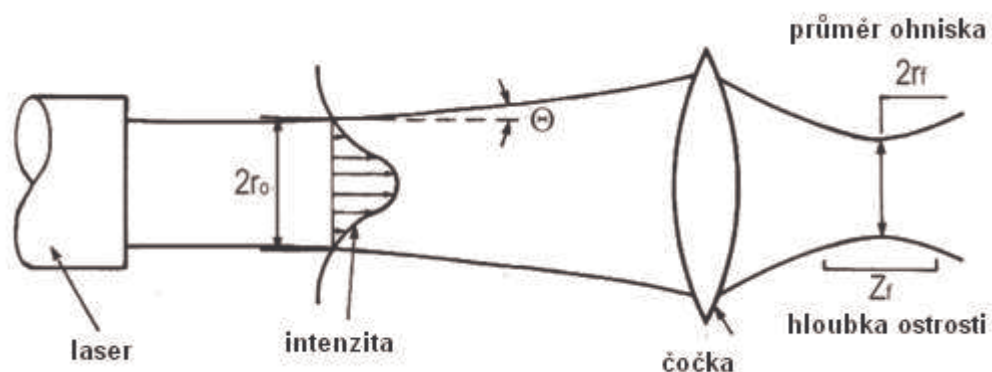
Při opětovném přestupu elektronu na nižší energetickou hladinu dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony následně interagují s dalšími elektrony inverzní populace, čímž spouštějí tzv. stimulovanou emisi fotonů, se stejnou frekvencí a fází, i u nich.

Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například zrcadly, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím. To dále podporuje stimulovanou emisi, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný světelný paprsek pak opouští tělo laseru průchodem skrze polopropustné zrcadlo.

Laser je tedy kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku.

Základní vlastnosti laserového paprsku:

- vysoký stupeň prostorové a časové koherence,
- minimální divergence (rozbíhavost),
- vysoká výstupní intenzita,
- vysoce monochromatický.

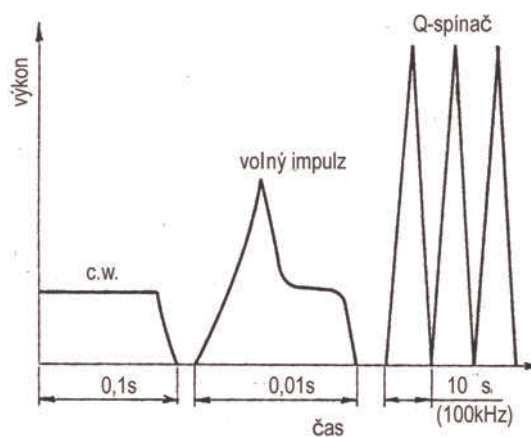


Obr.8. Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace laserového paprsku.

3.2 Rozdělení laserů

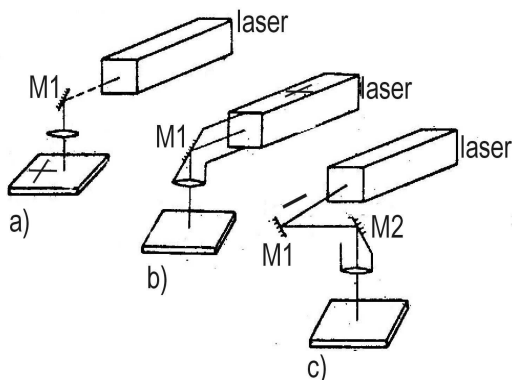
Vzhledem na rozmanitost dostupných laserů, rozdílnost jejich vlastností, dosahovaných výkonů jako i oblastí použití, je potřebná určitá systematická kategorizace a rozdělení druhů laserů

- aktivního prostředí tj. skupenství materiálu, které se používá na generování záření:
 - pevné,
 - plynové,
 - kapalinové,
 - polovodičové.
- vlnové délky:
 - infračervené záření (IR) $f < f_{opt}$
 - optozáření, světelné záření $f \sim f_{opt}$
 - ultrafialové záření (UV) $f > f_{opt}$
 - rentgenové RTG a gama záření $f \gg f_{opt}$
- druhu paprsku resp. režimu paprsku:
 - v kontinuálním režimu (continuous wave - cw),
 - v pulzním režimu (pulsed wave - pw),
 - v tzv. Q - switched (Qs) režimu - je to zvláštní kontinuální režim s vysokou energií.



Obr.9. Režimy paprsku

- z hlediska konstrukce laserového zařízení:
 - systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek
 - pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek
- podle dosahovaného výkonu:
 - nízko-výkonové (desetiny W až stovky W),
 - vysoko-výkonové (1kW až 30kW).



- a) Systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek.
- b) Pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek.
- c) Systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečený zrcátky, zatímco laserová hlavice a obrobek jsou stacionární.

Obr.10. Rozdělení laserů dle systému

3.3 Klasifikace laserových technologických operací

Úběr materiálu - řezání, vrtání, mikroobrábění a čištění pomocí laseru

- Mikroobrábění zahrnuje technologie: přistřihování, ořezávání, značkování, renovace masek, gravírování a rytí.
- Čištění je odstraňování tenké povrchové vrstvy kontaminované oleji a plyny.

Spájení a zpevňování - svařování, spájení, potahování a tvrdé spájení

Tepelné zpracování povrchu - kalení, žíhání, povrchové legování, rekrystalizace polovodičových krystalů po iontové implantaci a také potahování metodami CVD a PVD pomocí laserového ohřevu.

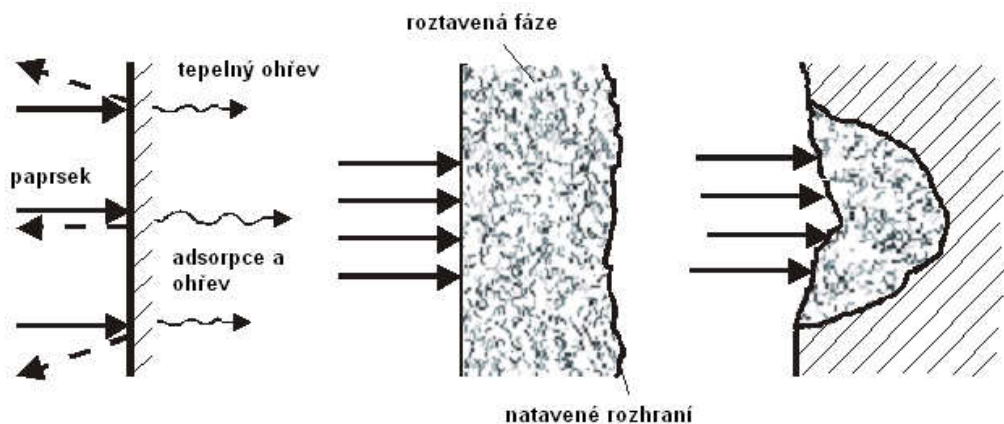
Nové procesy - růst safírových krystalů, tahání optických vláken, barvení, dělení skla a keramiky kontrolovaným lomem, procesy laserem podporovaného obrábění jako je soustružení, broušení a jiné kombinované procesy využívající laser.

3.4 Účinek laserového paprsku na materiál a úběr materiálu

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsku odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde materiálem. Absorbované paprsky ohřívají materiál, který se ohřevem nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti. Množství odražených paprsků závisí na vlastnostech materiálů a jejich schopnosti pohlcovat a odrážet laserové záření.

Důležité faktory pro použití laserového paprsku:

- reflektivita - odrazivost povrchu,
- absorpce - pohlcování laserového záření,
- tepelná vodivost,
- tavení povrchové vrstvy,
- odpařování.



Obr.11. Účinek laserového paprsku při jeho dopadu na povrch materiálu

Absorpce světelného záření a následný ohřev kovového povrchu, ale i jiných materiálů, závisí na teplotní vodivosti materiálů. Vedení tepla z laseru do materiálu je komplikovaný jev. V současnosti není odpovídající teorie pro vyjádření tepelné vodivosti a výpočet teploty, protože přestup tepla je velmi rychlý.

Protože není účelem této kapitoly podrobně rozebírat přestup tepla při řezání laserem, více není třeba uvádět. Co je potřeba uvést je, že v současnosti se jen velmi málo práce soustřeďuje na teorii termodynamických jevů v zóně řezání laserem. Většina zdrojů se orientuje na technologické možnosti laserového nástroje bez hlubších teoretických analýz, protože to už zasahuje do oblasti laserové fyziky a termodynamiky.

Působením intenzivního soustředěného laserového paprsku na materiál dochází k jeho natavení. Když laserový paprsek s určitou hustotou výkonu ozáří povrch materiálu, absorbované paprsky lokálně ohřívají částice materiálu až na teplotu tavení. Když záření přestane, nebo když se paprsek posouvá dopředu, tavenina začíná tuhnout nebo rekrystalizovat a v tuhnoucí tavenině vznikají a zůstávají zvýšené napětí.

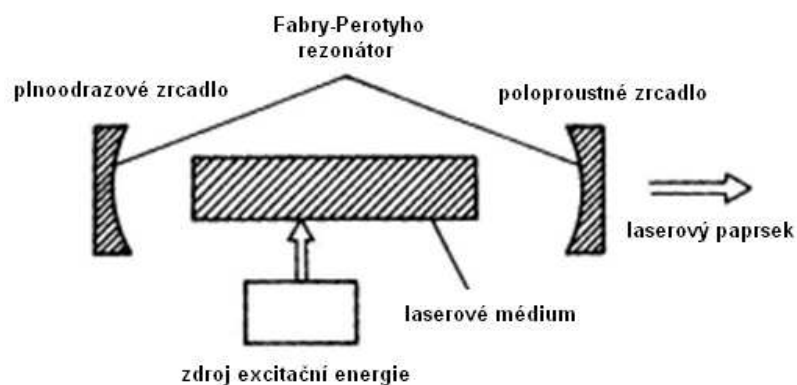
V závislosti na použité technologii obrábění (vrtání, řezání, hloubení drážek), tepelně ovlivněná zóna může být dvou nebo třírozměrná. Řezání laserem se charakterizuje jako ustálený proces, při kterém se tepelně ovlivněná zóna tvoří jen na stěnách zářezu. Hloubení drážek nebo tvarování profilů laserem je také ustálený proces, protože čelo eroze je stacionární vzhledem k ose pohybu laseru. Tepelně ovlivněná oblast je na obou dvou stěnách a také na ve spodní části drážky a oblast vedení tepla je trojrozměrná. Vrtání pomocí laseru se charakterizuje jako proces nestacionární, protože čelo eroze se pohybuje s ohledem na pevný laserový paprsek a tepelně ovlivněná zóna se tvoří na stěnách otvoru.

Tepelně ovlivněná zóna HAZ (heat affected zone) je různá pro rozdílné materiály a závisí na posuvu paprsku, vlnové délce a absorpčních vlastnostech materiálu.

- Čím vyšší je rychlost posuvu paprsku, tím menší je hloubka tepelně ovlivněné zóny.
- Intenzita absorpce laserových paprsků do materiálu se zvyšuje se zvětšováním vlnové délky záření.

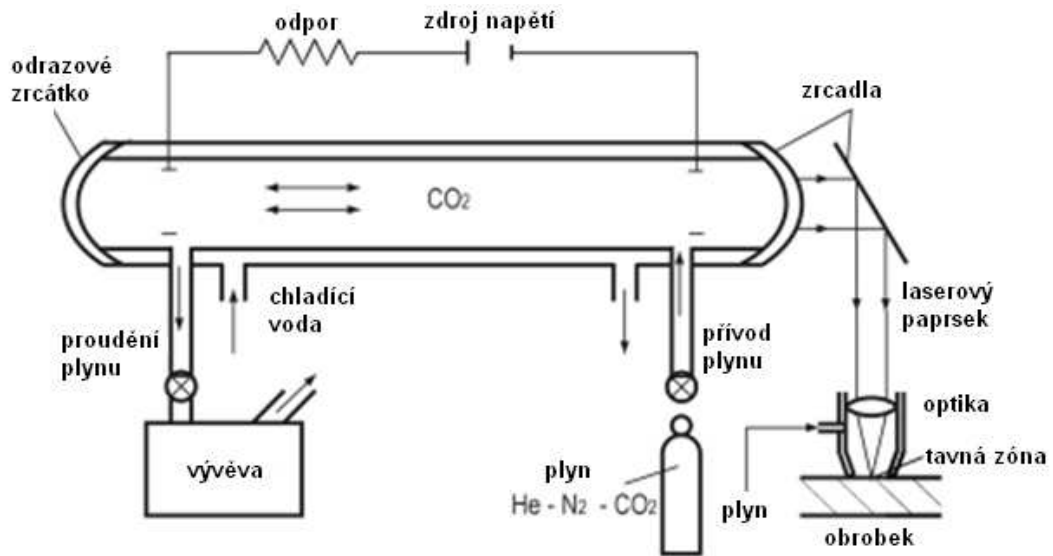
3.5 Zařízení pro laserové opracování

Základní struktura laserového zařízení je vlastní každému typu laseru, sestává z laserového média (aktivní látka), zdroje excitační energie (čerpání), Fabry-Perotyho optického rezonátoru, pomocí kterého se část stimulované emise záření neustále vrací do laserové dutiny.



Obr.12. Základní sestava laseru

3.5.1 CO₂ laser



Obr.13. CO₂ laser

Hlavní částí CO₂ laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a hélia. Energie potřebná na excitaci je vytvářena ve formě doutnajícího výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí.

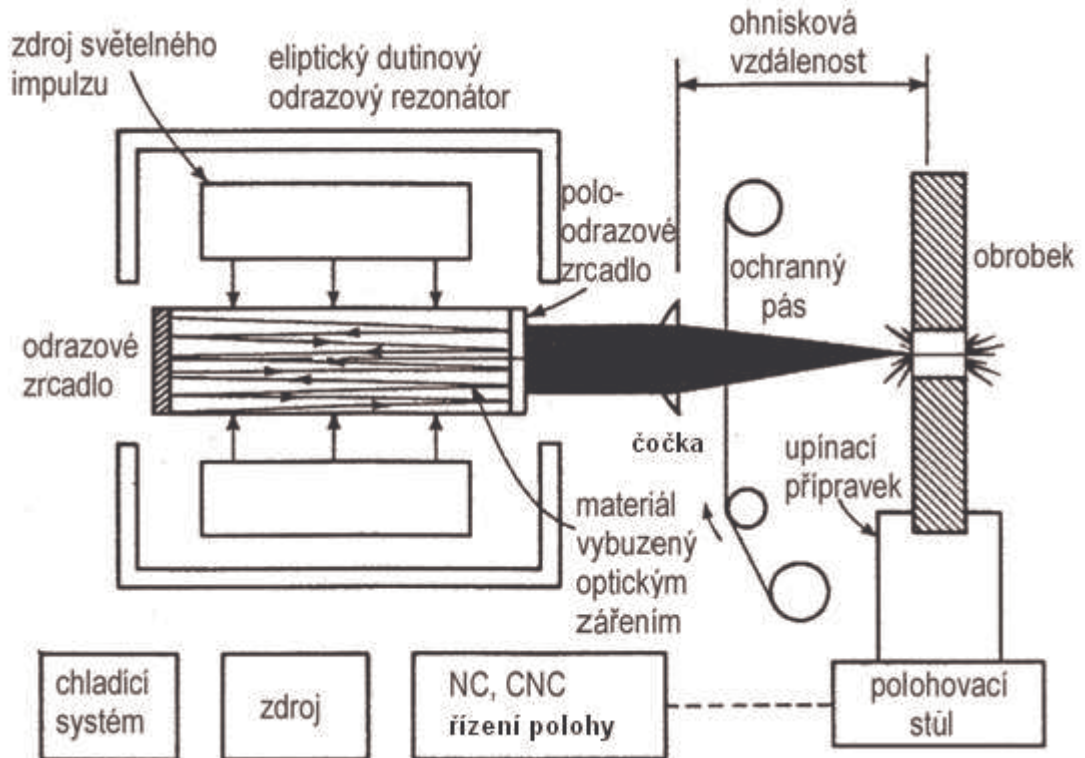
Teplota je ze systému odváděna chladícím médiem (nejčastěji vodou), pomocí chladícího agregátu. Chlazení musí být natolik účinné, aby teplota v dutině nepřekročila asi 400°K.

3.5.2 Nd - YAG laser

- je v dnešní době nepoužívanější typ pevno-látkového laseru,
- aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y₃Al₅O₁₂) dopovaný ionty neodymu (Nd³⁺),
- ionty neodymu tvoří oscilační médium, aktivní prostředí pracuje v pulzním nebo kontinuálním režimu,
- výkonová hladina je několika 100 W.

Princip zařízení pro pevno-fázové lasery je znázorněn na obr. 14. Zdrojem buzení (optického čerpání) je světelná impulz z kryptonové nebo xenonové obloukové lampy. Světlo odrazem od rezonátoru aktivuje oscilační médium.

Odrazový rezonátor má zpravidla tvar dutiny cylindrického nebo eliptického průřezu, je vyrobený z kovů, které mají vysokou tepelnou vodivost jako Cu (měď), Be-Cu nebo W (wolfram).



Obr.14. Ilustrace konstrukce typického pevnolátkového laseru

Použití:

- pro vrtání, sváření, žíhání, řezání a značkování,
- v medicíně, vědě, biologii a ve vojenských aplikacích,
- v oftalmologii pro odstranění druhotného šedého zákalu či vytvoření otvorů v duhovce za účelem redukce nitroočního tlaku (při odstranění druhotného šedého zákalu je laserem vytvořen otvor do zadního čočkového pouzdra).

3.5.3 Excimerové lasery

- patří mezi plynové lasery s krátkou vlnovou délkou,
- vytvářejí světelné záření v ultrafialové a částečně i v oblasti měkkého RTG záření pracujícím v pulzním režimu,

- jsou to vysoko-rychlostní lasery s ultrakrátkým trváním impulzu, lasery s nejkratšími, možnými impulzy elektromagnetického záření.

Použití:

- zpracování keramických a kompozitních materiálů (oblast mikro-obrábění),
- označování kovových předmětů,
- odstraňování nadbytečného materiálu na plošných spojích,
- mikro-řezání měkkých a tvrdých biologických tkání v humánní medicíně.

3.6 Provozní charakteristiky laserů

- Průměr fokusovaného paprsku typicky v rozsahu $0,18 \div 0,30$ mm, konkrétně pro jednotlivé druhy laserů: rubínový laser, Nd-YAG $0,013$ mm, Nd-sklo $0,020$ mm, CO_2 $0,076$ mm,
- Minimální průměr vrtání $0,005$ mm 5%, hloubka vrtaného otvoru 23 mm v závislosti od vrtaného materiálu,
- Průměry nad 1,27 mm se vrtají technologií vyvrtávání resp. vrtání na jádro,
- Šířka přetavené vrstvy se udává v rozsahu $0,03 \div 0,05$ mm, někdy až 0,25 mm,
- Průměrná rychlost úběru materiálu $8,20$ mm³/hod,
- Trvání impulzu pro průmyslové využití je 0,6 ms, pro vrtání a mikroobrábění nano - piko až femto sekundy,
- Šířka zářezu (řezné škáry) se udává v závislosti na tloušťce materiálu v rozsahu $0,64 \div 2,54$ mm; pro materiály tenčí jako 1,6 mm zářez může být 0,13 mm, takovýto úzký zářez se tvoří vyššími rychlostmi,
- Rychlost řezání závisí na druhu laseru a jeho výkonu a taky na tloušťce řezaného materiálu. Běžně používaná rychlost posuvu pro ocel tloušťky 2 mm je okolo 6 m/min, pro polyakrylát 12 m/min (řezání CO_2 laserem, výkon 1 kW).

3.7 Kvalita povrchu po opracování laserem

Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem:

Δs – náběhová a výběhová oblast při řezání

(0,1 – 0,2 mm podle tloušťky materiálu),

M – měřená oblast pro určení hodnot R_z , u , α ,

R_z – výška nerovností,

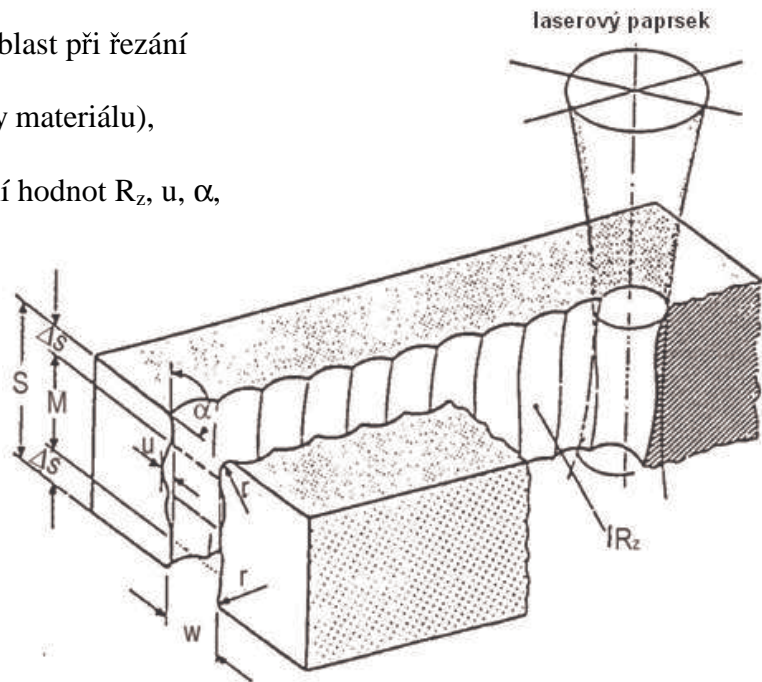
u – nepravidelnost škáry,

α – úhel vychýlení paprsku,

r – zaoblení vlivem řezání,

w – šířka řezu,

S – tloušťka materiálu



Obr.15. Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem

Kvalita povrchu závisí na několika faktorech:

1) Parametrech procesu:

- výkonu paprsku,
- rychlosti posuvu paprsku
- šířce vytvořené škáry (zářezu),
- druhu paprsku a jeho módu,
- ohniskové vzdálenosti,
- průměru fokusovaného paprsku,
- úhlu vychýleného paprsku α , důsledkem průchodu paprsku materiálem odchylna od původního směru ($\alpha = 75 \div 80^\circ$),
- přídatném plynu (druh plynu, tlak plynu).

2) Parametrech materiálu produktu:

- fyzikálně - chemické vlastnosti materiálu,
- typ materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit...),
- termo - fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, reflektivita),

- geometrie obrobku.

3) Kvalitě řezu:

- šířka řezu (řezné škáry),
- zaoblení hrany vlivem řezání,
- nepravidelnost hrany,
- šířka tepelně ovlivněné vrstvy (poškození vrstvy),
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupu paprsku),
- tvoření trhlin,
- úbytek materiálu,
- šířka kráteru,
- vychýlení paprsku,
- změna struktury povrchu materiálu,
- zpevnění.

Obecně je teda kvalita řezu určená ve spojitosti s třemi základními parametry a to s řeznou rychlostí, která by měla být co nejvyšší, šířkou zářezu (škáry) s požadavky, aby byla co nejužší a na konec kvalitou povrchu, po řezání určení parametry drsnosti Ra a Rz.

3.8 Použití laserového paprsku

V současnosti se laserové technologie v procesech úběru materiálu (obrábění) dělí do dvou skupin podle způsobu použití:

- laserové obrábění / opracování (LM - Laser Machining), které představuje alternativu k tradičnímu opracování a používá se pro řezání, vrtání a tvarové opracování různých materiálů,
- laserem podporované obrábění (LAM - Laser Assisted Machining), které představuje alternativu k procesu řezání a broušení tvrdých kalených materiálů a keramiky.

Při obrábění s podporou laseru, slouží laserový paprsek na ohřev povrchu obrobku a jeho následné řezání nebo broušení v "plastickém" stavu. Při technologii LAM materiál

není natavený a následně odpařený, ale laser se používá jako intenzivní tepelný zdroj na změnu deformačního chování materiálu a jeho "přeměnu" z křehkého na tvárný.

3.9 Výhody opracování laserem

- laserem se obrábějí všechny druhy materiálů bez ohledu na tvrdost, křehkost, pevnost,
- šířka zářezu je úzká a získávají se ostré hrany,
- vysoká rychlost a přesné řezání je možné zabezpečit vhodnou volbou přídavného plynu,
- tvar řezu může být řízený NC a CNC,
- deformace řezaných částí je velmi malá,
- bezkontaktní opracování materiálů,
- změna tvaru obrobku, tvaru řezání a plánování výroby je velmi jednoduché s podporou PC,
- na obrobek působí jen laserový paprsek, odpadají problémy s vibrací stroje, nástroje, odpadá složitost upínacího zařízení,
- spolehlivé a velmi vysoce kvalitní řezání v automatickém cyklu.

4 PLAZMA

Plazmové způsoby řezání (PBM Plasma Beam Machining nebo taky PAM Plasma Arc Machining) se začaly používat začátkem 50.ých let 20. století jako alternativní způsoby řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů

Plazma, jako čtvrté skupenství látky, je elektricky vodivý stav plynu, který se na Zemi vyskytuje jen výjimečně.

Vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách nad 20 000°C, nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou.

Termín plazma se používá pro označení velkého počtu částic (atomů, molekul iontů, elektronů) bez pevné vzájemné vazby, ze kterých aspoň některé mají elektrický náboj a v dostatečně velkém objemu je součet kladných a záporných elektrických nábojů nulový.

Jako celek je plazma v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může být částečně nebo úplně ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy je 5 000° ÷ 15 000° K, teplota úplně ionizované asi 100 000° K

Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům elektrického a magnetického pole.

Hlavní oblasti aplikace plazmového paprsku jsou:

- Nanášení povlaků plazmovým paprskem, např. vysoce kvalitní kovové a keramické povlaky o tloušťce 0,1 mm odolné vůči korozi, teplotě a opotřebení.
- Sváření, které představuje poměrně širokou oblast použití plazmy.
- Řezání / dělení materiálů, např. řezání tenkých plechů, hliníkových plátů, korozivzdorných ocelí o tloušťce až 25 mm.
- Obrábění / soustružení pomocí plazmového paprsku jednak jako zdroje lokálního ohřevu materiálu před odřezáním třísky (princip je podobný jako při technologii LAM – laserem podporované soustružení), jednak jako přímého úběru materiálu jeho postupným odtavením.

4.1 Vznik plazmy a plazmového zařízení

Plazma je pojem zavedený pro osobitný stav plynů, při kterém se stávají vodivými ionizací atomů. Je to směs elektronů a kladných iontů, která může být, a většinou i je, rozložená ve vnitř plynu z neutrálních částic.

Plazma se nejčastěji může tvořit ohřátím látky na vysokou teplotu nebo elektricky obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, případně mechanicky kompenzovaným iontovým svazkem.

Jako zdroj tepla pro ionizaci plynů se v technické praxi nejvíc používá elektrický oblouk. Samotný elektrický oblouk je plazmou s nízkým stupněm ionizace.

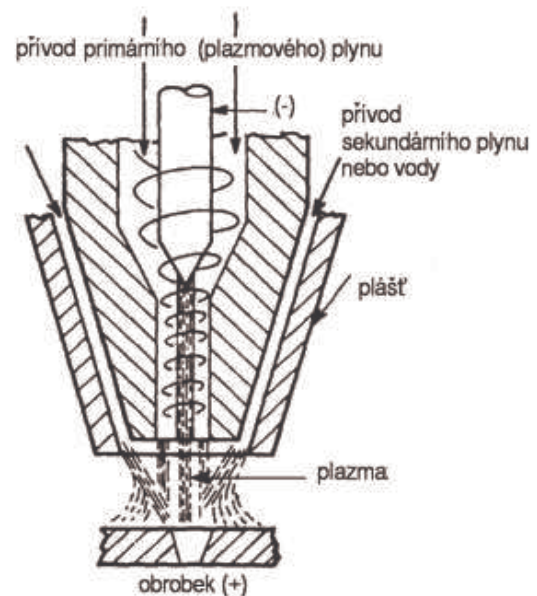
Na vytvoření vhodného stavu plazmového oblouku se začal běžně používat název stabilizace oblouku. Stabilizace oblouku znamená udržení paprsku plazmy v určitém požadovaném kontrahovaném (zúženém) tvaru a to je možné zabezpečit:

- tvarem dýzy plazmového hořáku,
- proudícím plynem,
- vodou

4.2 Princip tvorby plazmy v hořáku

K dosažení technicky kvalitní plazmy je potřeba sledovat **parametry tvořící se plazmy**:

- teplotu a elektrickou vodivost (zvyšováním velikosti proudu se zvyšuje teplota a elektrická vodivost plazmy),
- hustotu proudu plazmy, průměr paprsku,
- stupeň fokusace paprsku po výstupu z dýzy.



Obr.16. Princip tvorby plazmy v hořáku

Na vlastnosti plazmy mají vliv **vlastnosti používaných plynů**:

- plazmové plyny - (Ar), argon a vodík (Ar + H₂), (He), (N₂), CO₂, vzduch,
- fokusační plyny - (Ar), (Ar + H₂), argon a dusík (Ar + N₂), (N₂),
- ochranné plyny - (Ar)

Plazma se vytváří rozkladem molekul těchto plynů za vysokého výkonu tepla, při přechodu elektrickým obloukem, který hoří mezi netavící se elektrodou (obvykle zápornou wolframovou katodou) a řezaným materiálem (kladnou anodou).

Základní konfigurace hořáku pro plazmový oblouk:

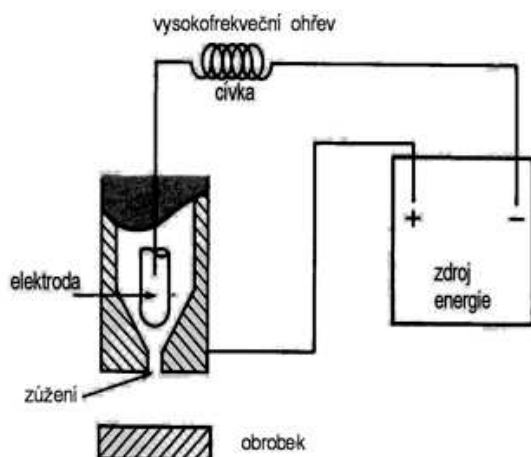
- Záporně nabitá elektroda a kladně nabitý obrobek tvoří oblouk.
- Plazmový (primární plyn) je ionizovaný a ohříván na vysokou teplotu.
- Sekundární přívod plynu chrání oblast tavení materiálu.

4.3 Plazmové zařízení

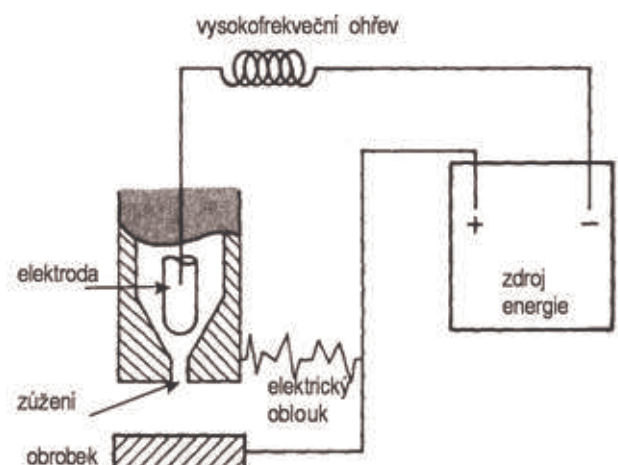
Plazmové zařízení sestává ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky (obvykle NC nebo CNC řízení).

Dělí se na dva základní typy, které používají:

- přenesený (transferovaný) plazmový oblouk (plasma arc),
- nepřenesený (netransferovaný) – nevodivé materiály.



Obr.17. Transferovaný plazmový oblouk



Obr.18. Netransferovaný plazmový oblouk

V prvním případě se oblouk tvoří mezi elektrodou ve vnitř plazmového hořáku a materiálem. Obvykle se pro obrábění používá v tomto případě označení *PAM Plasma Arc Machining*. Používá se pro vodivé materiály. V tomto případě je dýza méně tepelně namáhána.

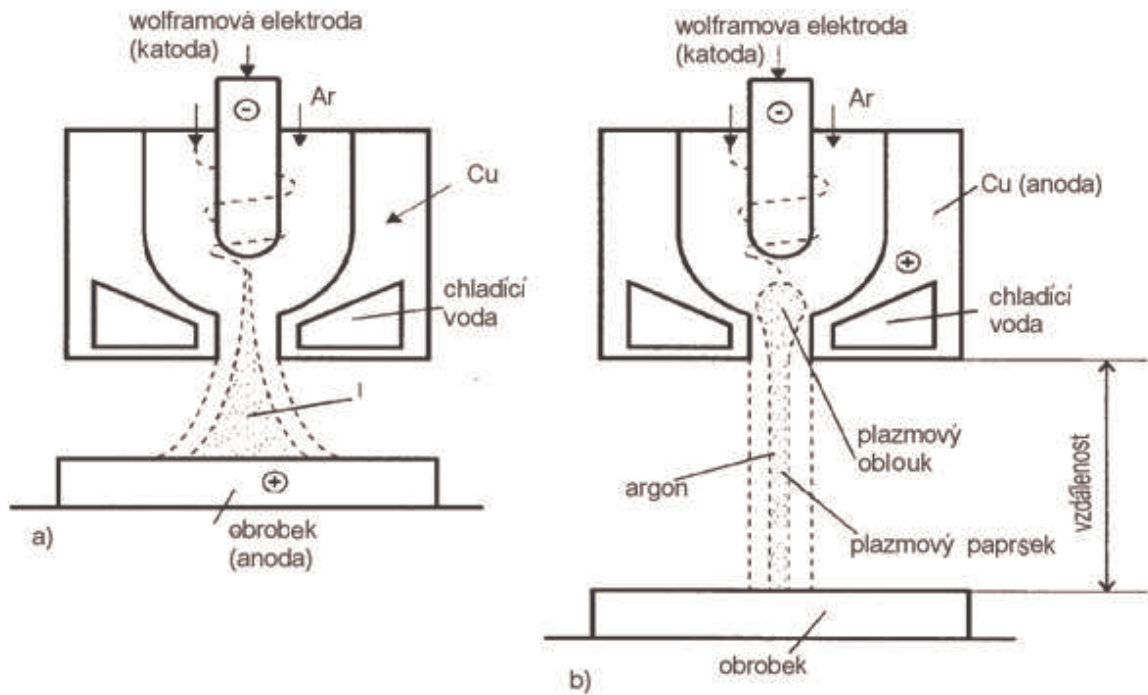
Netransferovaný (také nepřenesený) oblouk se tvoří jen v samotném plazmovém hořáku mezi dvěma elektrodami. Pro ionizovaný plyn resp. plazmu se zažilo označení plazmový paprsek (*plasma jet*), mezinárodní zkratka pro opracování plazmovým paprskem je *PBM Plasma Beam Machining*. Používá se pro nevodivé materiály.

Důležitou částí plazmového zařízení jsou plazmové hořáky, které musí zabezpečovat:

- přívod proudu na elektrodu (většinou wolframovou),
- přívod pracovních plynů tj. plazmového, fokusačního a ochranného,
- tvarování plazmového oblouku,
- usměrnění plazmového paprsku na místo řezání.

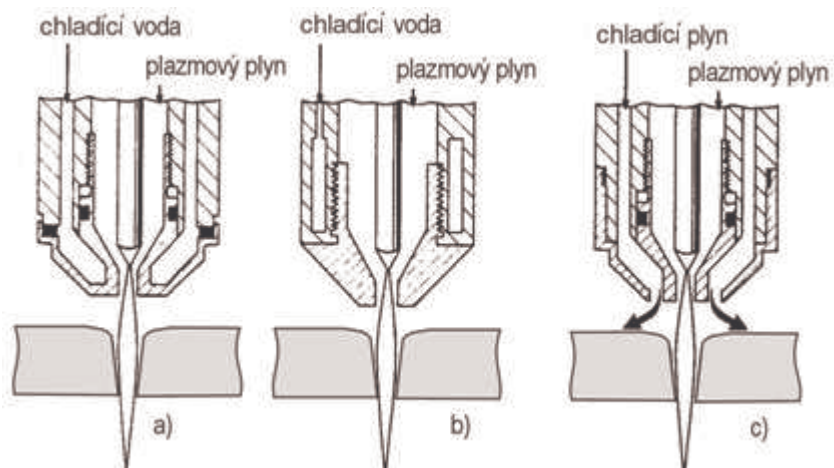
Plazmové hořáky je možno rozdělit podle:

- výkonu (výkon je daný součinem proudu a napětím oblouku),
- způsobu chlazení (přímé chlazení vodou, nepřímé chlazení vodou, chlazení plynem),
- složení plazmového plynu (oxidační, neoxidační),
- druhu materiálu katody (wolfram, zirkonium, hafnium),
- pracovního systému hořáku (na principu stlačeného vzduchu, vstřikování vody atd.),
- použití, na hořáky pro ruční nebo strojní řezání.



Obr.19. a) Plazmový oblouk – plasma arc; b) plazmový paprsek – plasma jet

Na dosáhnutí úzkého svazku plazmy s vysokou teplotou je nevyhnutelné intenzivní chlazení, které je zabezpečené konstrukcí plazmových hořáků. Hořák je chlazený chladicí kapalinou, většinou vodou, nebo chladícím plynem.



Obr.20. Druhy plazmových hořáků s rozdílným chlazením

a) přímé chlazení vodou b) nepřímé chlazení vodou c) chlazení plynem

4.4 Mechanismus plazmového řezání materiálů

Princip plazmového řezání spočívá v tavení děleného materiálu extrémně vysokými teplotami, které se tvoří vznikem plazmy. Vysoké teploty ($17\,000 \div 33\,000\text{ °C}$) a vysoká intenzita přenosu tepla do materiálu ($24,1 \div 68,7\text{ MW/m}^2$) charakterizují přednosti plazmového řezání v porovnání s řezáním třeba plamenem ($2\,900\text{ °C}$).

Při styku plazmy s povrchem tuhého materiálu nastává vlivem vysoké teploty tavení materiálu, odtékání, odstříkování, odpařování, sublimace nebo rozprašování. Tyto jevy se pak využívají na technologické procesy tavení, sváření, řezání materiálů nebo tvoření povlaků.

4.5 Proces úběru materiálu (řezání / dělení) plazmou je ovlivněno následujícími parametry

- **Průměr dýzy;** Kvalita řezu závisí na tepelné intenzitě, na dosažení co nejvyšší teploty je potřebný velmi malý průměr dýzy. Malé průměry dýz snižují jejich životnost (zvyšuje se sklon k opálení výtokového otvoru dýzy). Používané průměry otvoru dýzy jsou udávány v rozsahu $0,79 \div 6,35\text{ mm}$.
- **Zdroj výkonu pro oblouk;** Užitečný výkon pro řezání plazmou je okolo 250 kW , pro proudy v rozsahu $50 \div 1000\text{ A}$, a napětí $100 \div 250\text{ V}$. Potřebný výkon se mění v závislosti na druhu a tloušťce materiálu.
- **Použité plazmové plyny;** argon, helium, dusík a další; Plazmové plyny svojí cenou ovlivňují náklady na proces. Stejně ovlivňují kvalitu řezu, rychlost řezání a životnost dýz.
- **Vzdálenost mezi hořákem a materiálem;** Je důležitá při řezání plazmovým paprskem sloupovitého tvaru. Pro vzdálenost mezi hořákem a materiálem, která se může měnit v rozsahu $6,4 \div 76,2\text{ mm}$, platí:
 - a) kvalita řezné drážky se zlepšuje se snižováním vzdálenosti a zvyšováním intenzity tepla,
 - b) zvyšování vzdálenosti zvyšuje nároky na výkon paprsku.

- **Rychlost řezání**, má vliv na kvalitu řezné drážky, na požadovanou drsnost, na velikost tepelně ovlivněné oblasti (HAZ). Rychlost řezání se nelineárně zvyšuje se zvyšováním výkonu plazmového hořáku. Se zvyšováním tloušťky materiálu rychlost klesá. Platí to pro procesy, které využívají tepelnou energii při natavování materiálu při jeho zpracování.
- **Šířka řezné drážky**; řezná drážka po řezání plazmou je charakterizovaná výraznou šířkou až několik milimetrů v porovnání s řezáním laserem nebo kyslíkovým plamenem.

4.6 Použití plazmového paprsku pro opracování materiálů

Mezi výhody plazmového řezání v porovnání s řezáním plamenem a laserem patří:

- lepší kvalita řezu při řezání hrubých materiálů (v porovnání s plamenem),
- rychlejší řezání jako při řezání plamenem,
- při řezání tenkých plechů je levnější jako laser.

Mezi nevýhody patří:

- vyšší náklady jako při řezání plamenem,
- méně kvalitní hrany v porovnání s laserem.

4.7 Druhy plazmových řezacích strojů

MG – Vysoce profesionální tavící (obráběcí) zařízení.

PLS – Přesné vysokovýkonné řezací zařízení.

HS – Přesné vysokovýkonné řezací zařízení.

CombiCut – Vysoce profesionální tavící zařízení (plazma / autogen).

OXYCUT – zařízení na řezání autogenem (případně plazmou).

MicroCut – Pro menší a střední provozovny.

AirCut – automatické plazmové řezací zařízení pro vzduchotechniku.

5 OPRACOVÁNÍ SVAZKEM ELEKTRONŮ

Opracování svazkem elektronů (mezinárodně používaný název EBM Electron Beam Machining) patří mezi progresivní výrobní procesy především v oblasti mikroobrábění.

Opracování svazkem elektronů využívá kinetickou energii urychlených elektronů, která se při srážce s materiálem přemění na tepelnou energii schopnou natavit a odpařit materiál v místě dopadu. Proces probíhá ve vakuu.

Používání koncentrovaného svazku elektronového paprsku pro procesy zpracování materiálu se v současnosti ubírá dvěma směry:

- **Tepelné procesy:** obrábění, sváření, žíhání, tepelné zpracování,
- **Reaktivní procesy:** elektronová litografie, nanášení tenkých vrstev, polymerizace a depolymerizace elektronovým paprskem.

Princip elektronového paprsku se využívá i v dalších oblastech, např. elektronová mikroskopie, elektronová spektroskopie a jiné.

Proces se může použít pro všechny druhy kovových a nekovových materiálů, přičemž jejich vlastnosti (tvrdost, tažnost, elektrická vodivost, tepelná vodivost a bod tavení) nejsou limitující. Široké uplatnění nachází tato technologie v leteckém a kosmickém průmyslu a je na předním místě v oblasti výroby polovodičů a mikroelektronických prvků.

5.1 Základní pojmy

- **Elektron** je elementární částice s hmotností $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg a záporným nábojem s hodnotou $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Elektron je částí atomu a množství elektronů v atomu je závislé na chemickém prvku a je udané atomovým číslem v periodické tabulce prvků.
- **Emise elektronů** je výstup elektronů z povrchu pevných látek a kapalin. K emisi elektronů dochází, když se překoná potenciální bariéra na rozhraní kov – prostředí. Na překonání této bariéry je potřebné dodat elektronům energii, která se nazývá výstupná práce.
- **Výstupní práce** je množství energie, které je třeba dodat elektronu, aby přešel z Fermiho hladiny na hladinu vakua nebo okolí obklopujícího povrch do vzdálenosti

10^{-4} cm. Výstupní práce je teda rozdíl mezi energiemi volného elektronu E_e a Fermiho energií E_F a určuje zákonitosti emise elektronů z kovu při daných fyzikálních podmínkách.

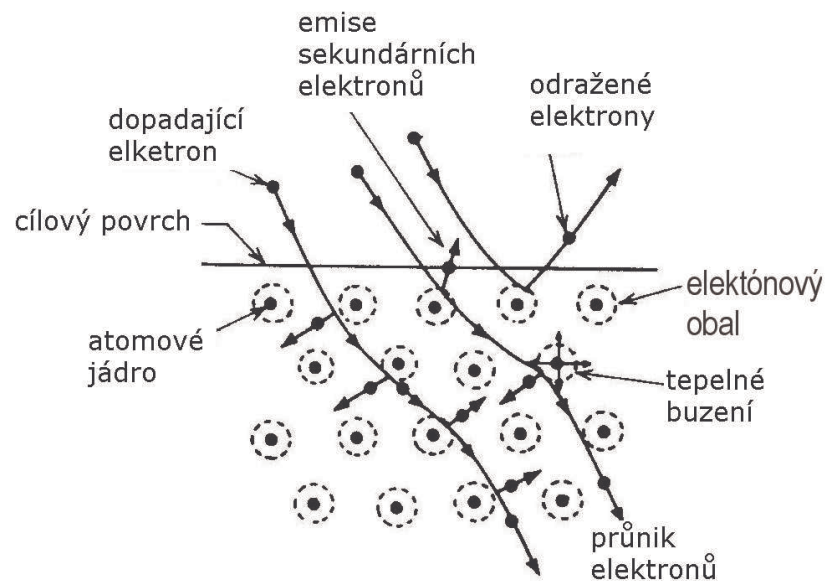
Elektrony se uvolňují tehdy, když dosáhnou alespoň energii rovnou výstupní práci. Podle dodaného druhu energie (tepelná, tok fotonů, tok elektronů) se pak mluví o termoemisi, fotoelektronové emisi nebo sekundární emisi. Pro vznik toku elektronů potřebných pro EBM technologii se využívá jev termoemise. Volné elektrony se mohou vlivem elektrického nebo magnetického pole přemísťovat, soustředit a ovládat.

5.2 Účinek dopadu elektronů na povrch materiálu

Při dopadu elektronů na povrch materiálu se jejich rychlost prudce sníží v důsledku srážek s atomy kovu, na který dopadají.

Při srážce odevzdávají svoji kinetickou energii atomům materiálu, což je spojeno se zvýšením teploty v okolí průniku. Energie elektronů se absorbuje jen do hloubky jejich průniku a ne do celého povrchu materiálu.

Obr.21. ilustruje mechanismus přenosu energie z elektronů na atomy materiálu. Je potřeba zdůraznit, že energie elektronů se absorbuje jen do hloubky jejich průniku a ne do celého povrchu materiálu.



Obr.21. Účinek dopadu elektronů na povrch materiálu

5.3 Princip opracování materiálu elektronovými paprsky

Obrábění elektronovým paprskem je **proces natavení a odpaření materiálu** svazkem elektronů emitovaných žhavenou elektrodou ve vakuu. Žhavená elektroda (katoda) obvykle wolframový drát emituje elektrony, které jsou urychlované vysokým napětím ($30 \div 180$ kV). Pomocí magnetického pole nebo vysokofrekvenčního elektrického pole je svazek letících elektronů zkoncentrovaný, nasměrovaný a urychlovaný směrem k cílovému předmětu (obrobku). Podle oblasti použití bývá průměr fokusovaného paprsku $0,025 \div 1$ mm. Tento proces probíhá jen ve vakuu. Koncentrovaný vysoko-energetický svazek elektronů při dopadu na materiál vyvolává jeho lokální ohřev nad teplotu tavení a materiál se intenzivně odpařuje (*evaporate*).

Obrábění svazkem elektronů je definované jako postup změny tvaru, vlastností materiálu nebo obrobku použitím elektronového paprsku.

Výhody:

- možnost jemné fokusace paprsku do bodu,
- možnost generovat vysoko-energetický paprsek,
- schopnost rychle a přesně vychylovat paprsek elektronů,
- možnost měnit energii paprsku změnou urychlovacího napětí a řídit hranice průniku paprsku,

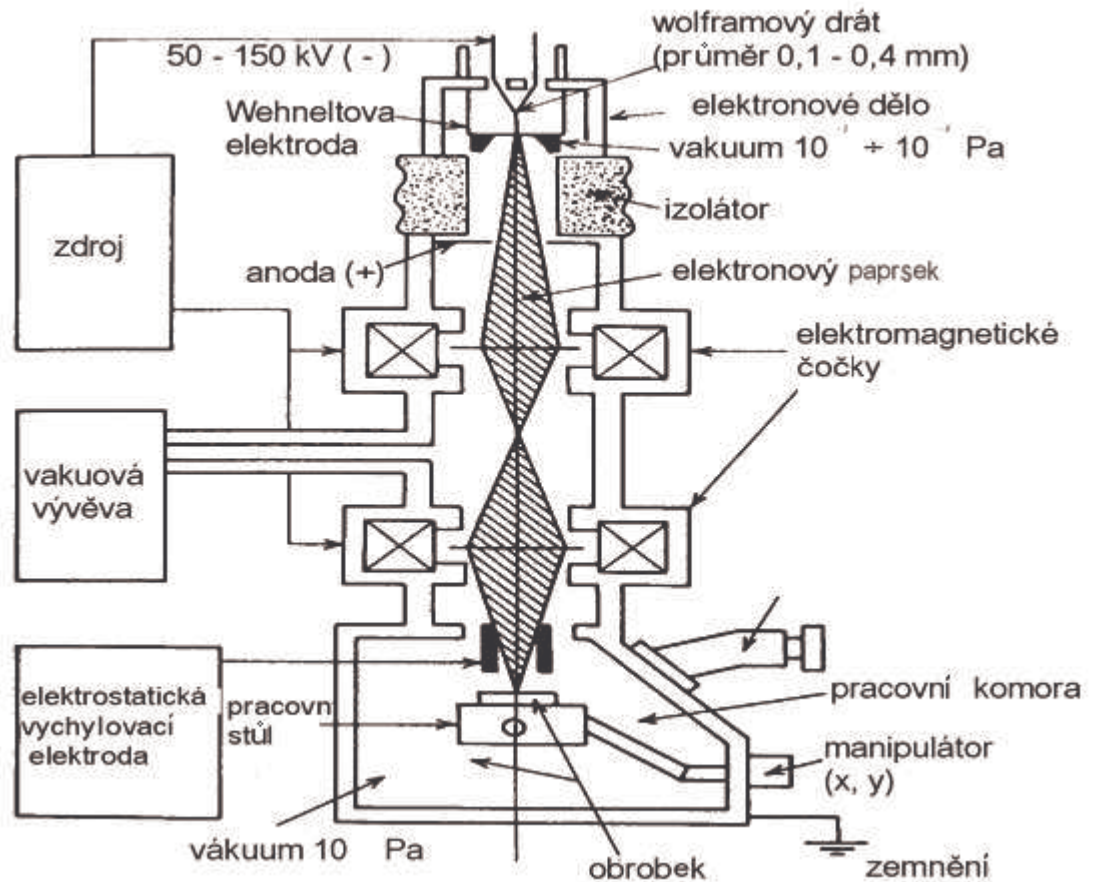
Nevýhody:

- nutnost vysokého vakua při generování elektronů a nutnost práce ve vakuu (výjimku tvoří některé procesy jako sváření mimo vakuum a využívání toku elektronů na změnu vlastností ozařováním),
- vznik škodlivého RTG záření,
- problémy při zpracování elektricky nevodivých materiálů (izolátorů) a diamantů.

5.4 Zařízení pro opracování elektronovými paprsky

Zařízení pro obrábění svazkem elektronů je znázorněno na Obr.22. Jeho konstrukce je podobná elektronovému mikroskopu. Sestává z elektronového děla, usměrňovacího sys-

tému (fokusační a vychylovací cívka), pracovní komory, vakuového odsávacího systému (rotační a difuzní vývěvy), zdroje energie a řídicího systému.

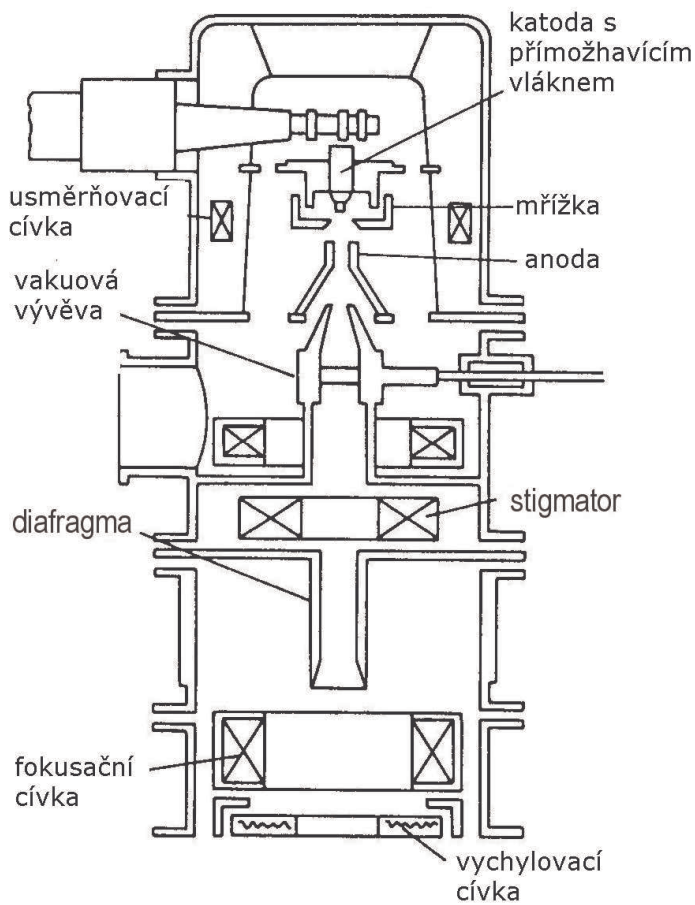


Obr.22. Zařízení na opracování svazkem elektronů

Elektronové dělo pracuje na principu triody sestávající z katody, mřížky a anody. Katoda při ohřevu na žhavicí teplotu (okolo $2\,500 \div 3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) emituje elektrony. Nejjednodušší zdroj elektronů (katoda) je žhavený wolframový drát.

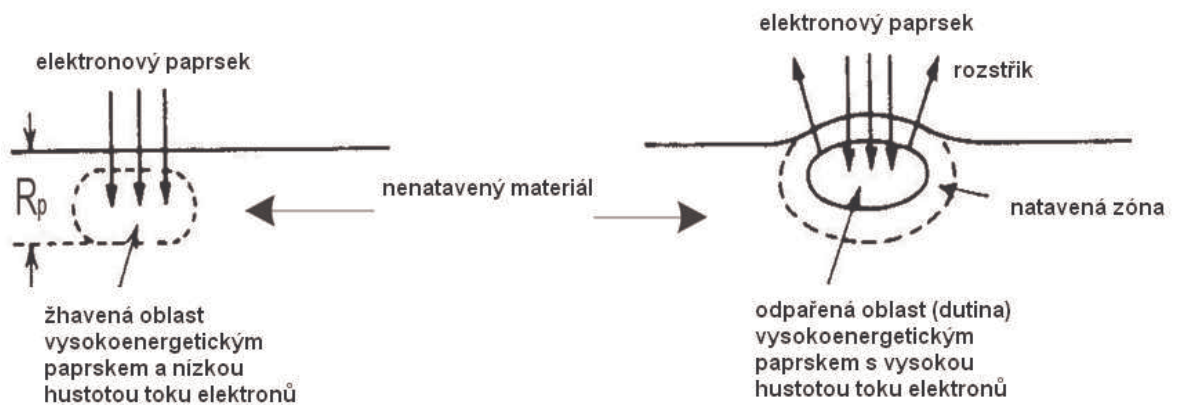
Elektronové dělo produkuje elektronové paprsky malého průměru s velkou hustotou energie a urychlované volné elektrony na rychlost blízkou rychlosti světla. Letící elektrony dosahují rychlosti okolo 60% rychlosti světla.

Obrobek je umístěný na stole, který je spojen s manipulátorem zabezpečujícím posuv stolu většinou ve dvou osách x a y. V pracovní komoře je vakuum okolo 10^{-1} Pa. Vakuum v oblasti elektronového děla je 10^{-2} až 10^{-3} Pa. Vakua se dosahuje systémem oněch rotačních a difuzních vývěv. Princip elektronového děla s přímo žhavenou katodou je znázorněn na Obr.23.



Obr.23. Elektronové dělo používané na vrtání

Na Obr.24. jsou znázorněny děje při hloubkovém průniku paprsku do materiálu, charakteristické pro procesy vrtání a sváření.



Obr.24. Model tavení materiálu elektronovým paprskem a model úběru materiálu

5.5 Oblast využití technologie elektronového paprsku

- Vrtání otvorů – např. otvory o průměru 50 μm pro tryskové motory
- Dělení materiálů – proces je limitovaný velikostí vakuové komory
- Dírkování (perforation) – textilu, polymerů
- Mikroobrábění – tvoření tenkých štěrbin, vzorů (pattern) a otvorů
- Značkování, zdobení a gravírování – výhodnější jako laser, vyšší přesnost a rychlost
- Elektronová litografie (Electron Beam Lithography) – proces používaný při výrobě integrovaných obvodů (výroba čipů až s 200 000 odlišnými strukturními detaily, výroba stop ve vzdálenosti 40 μm)
- Sváření – předností jsou úzké a hluboké svarové spoje
- Tepelné zpracování – používá se na lokální zpevnování povrchu dílců
- Napařování - tvoření tenkých vrstev (Electron-beam vapour deposition)

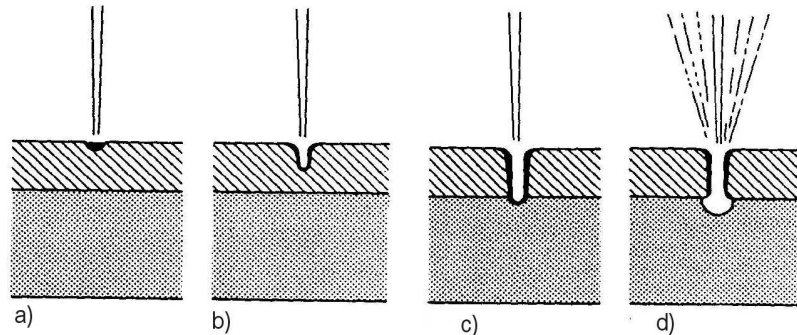
5.6 Vrtání elektronovým paprskem

5.6.1 Posloupnost procesu

Posloupnost procesu lze rozdělit do čtyř kroků:

- pulzující bodový paprsek vyvolá lokální ohřev a natavení materiálu a následné odpaření malého množství ohřátého materiálu, Obr.25.a,
- přes úzký vytvořený kanálek paprsek proniká hlouběji do materiálu, ten se ohřívá, natavuje a postupně odpařuje; odpařování je ve formě erupce částec materiálu, který jednak vystřikuje přes vznikající otvor a jednak se usazuje na stěně otvoru, Obr.25.b,
- při natavování vznikají malé bubliny, přes které paprsek lehčeji proniká do hlubších vrstev; když paprsek začne pronikat do pomocného materiálu, zvyšuje se tlak par nataveného kovu (pomocný materiál se používá na vymrštění nataveného materiálu z otvoru pomocí vysokého tlaku páry, která vzniká při jeho tavení), Obr.25.c,

- vysoký tlak par pomocného materiálu vymrští natavený materiál na stěny, zanechává po sobě otvor a v pomocném materiálu dutinu, Obr.25.d.



Obr.25. Postup vrtání pomocí elektronového paprsku

Pomocný materiál se volí s ohledem na vlastnosti materiálu obrobku a geometrii otvoru. Používají se materiály speciálního složení. Nejčastěji používaný materiál je označován jako HM/S a skládá se ze tří dílů mosazného prášku a jediného dílu silikonového kaučuku.

5.6.2 Výhody a nevýhody vrtání pomocí elektronového paprsku

Výhody:

- Rychlost vrtání až 4000 otvorů za sekundu.
- Možnost vrtání rozličných uspořádání otvorů, pohyb paprsku je řízený počítačem.
- Mechanické vlastnosti materiálu (tvrdost, tažnost, křehkost), elektrické vlastnosti nebo vlastnosti povrchu (odrazivost) nejsou limitující faktory při EBM vrtání.
- Parametry vrtání je možno jednoduše měnit od procesu k procesu.
- Opotřebení nástroje neexistuje.
- Vlastnosti dokončeného povrchu jsou v porovnání s jinými procesy kvalitativně lepší

Nevýhody:

- Vysoké kapitálové náklady na zařízení.
- Neproduktivní čas při odsávání vakuové komory, obvykle trvá odsávání 10 ÷ 20 minut.
- Požadavky na zručnost a vzdělanost personálu.
- Nutnost používat přídavný materiál.

6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ze zadání bakalářské práce plynou tyto následující úkoly:

- a) Zpracovat rešerši se zaměřením na téma „Elektrotepelné procesy obrábění“.
- b) Vypracovat studijní podklady pro výuku předmětu Nekonvenční technologie ve formě prezentací a názorných ukázek (video) těchto technologií.
- c) Vypracovat kontrolní testy pro řešenou problematiku.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 PREZENTACE

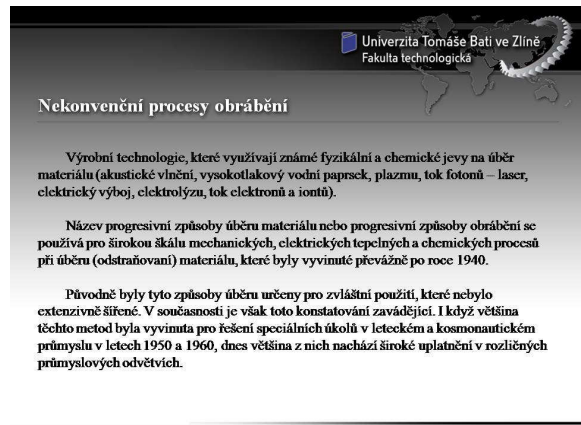
Úkolem praktické části této bakalářské práce bylo vypracovat podklady pro možnou výuku předmětu „nekonvenční technologie“, ve formě prezentací, se zaměřením na elektro-tepelné principy, tj.:

- Seznámení s nekonvenčními technologiemi
- Obrábění laserem
- Obrábění plazmou
- Opracování materiálu svazkem elektronů

Tyto prezentace jsou doplněny názornými ukázkami jednotlivých technologií ve formě obrázků, příkladů použití a krátkých videí, která se spouštějí přímo v prezentaci. Ve druhé části jsou zpracovány kontrolní testy pro prověření znalostí studentů z této oblasti obrábění.

7.1 Seznámení s nekonvenčními technologiemi

Tato prezentace je úvodem do předmětu Nekonenčních technologií. Okrajově se seznámíme s principy jednotlivých metod obrábění a hlavními rozdíly, jakož i s výhodami a nevýhodami oproti ostatním technologiím.



Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění

| | |
|---|---|
| MECHANICKÉ PROCESY | <ul style="list-style-type: none"> • Obrábění ultrazvukem USM Ultrasonic Machining • Obrábění pevným brusivem APM Abrasive Jet Machining • Obrábění vodním paprskem WJM Water Jet Machining • Obrábění vodní jet WJM Abrasive Water Jet Machining |
| CHEMICKÉ PROCESY | <ul style="list-style-type: none"> • Chemické obrábění CM Chemical Machining • Fotochemické obrábění PCM Photochemical Machining |
| ELEKTROCHEMICKÉ / ELEKTRICKÉ PROCESY | <ul style="list-style-type: none"> • Elektrochemické obrábění ECM Electrochemical Machining • Elektrochemické brúsení ECG Electrochemical Grinding |
| ELEKTROTEPELNÉ / TEPELNÉ PROCESY | <ul style="list-style-type: none"> • Elektroerozivní obrábění EDM Electrodischarge Machining • Obrábění ionovými LBM Laser Beam Machining • Obrábění paprskem elektronů EBM Electron Beam Machining • Obrábění paprskem ionů IBM Ion Beam Machining • Obrábění paprskem plazmy PAM Plasma Arc Machining |

ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Laserové obrábění LBM

- Je zesílené světlo pomocí vybudované emise záření (úzký svazek fotónů)
- Široko aplikovatelná technologie pro všechny druhy materiálů.
- **Nevýhody:** tepelné ovlivňovací zóna, necvornost rezu a vysoké nároky na přesnost nastavení ohniskové vzdálenosti paprsku od povrchu obrobnku, nákladné zařízení a energeticky náročný proces.

ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Elektroerozivní obrábění EDM

- K úběru materiálu dochází elektricky, pomocí rychle se opakujících periodických impulzů jiskrové výboje za přítomnosti dielektrika (kapalném médium).
- Pro elektricky vodivé a tvrdé materiály.
- **Nevýhody:** nutnost výroby vždy nové nástrojové elektrody při změně profilu dílce.
- EDM zvyšuje tvrdost vytvářené povrchové vrstvy (zpevnění) a redukuje mez únavy.

ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Obrábění plazmovým paprskem PAM

- Plazma vzniká ionizací plynu při vysokých teplotách 20 000°C nebo jako elektrický výboj mezi anodou a katodou.
- Vhodné pro opracování všech kovových materiálů s vysokou rychlostí úběru.
- **Nevýhody:** vysoké provozní náklady, náklady na zařízení a tepelné ovlivňovací zóna rezu.

ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Obrábění elektronovým paprskem EBM

- Proces nastavení a odpaření materiálu svazkem elektronů emitovaných žhavicí elektrodou ve vakuu.
- Pro práci se vyžaduje vakuové prostředí (vakuová komora).
- Vhodné pro vrtání otvorů, tvarování mikro rozměrů.
- **Nevýhody:** vysoké náklady na zařízení, (vrtání do hloubky 6 mm), nízká produktivita a tepelné ovlivnění vytvářecího povrchu.

ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Obrábění iontovým paprskem IBM

- Průběh ve vakuu, kde nabitě atomy (ionty) ze zdroje iontů ostřelují povrch cíle (obrobnku) pomocí urychlovacího napětí.
- Vhodné pro tvarování mikro a nano rozměrů a velmi jemné opracování povrchů.
- **Nevýhody:** vysoké náklady na zařízení.
- **Výhody:** povrchy nejsou ovlivněny teplem, není to tepelný proces ale dynamický

ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Použití nekonvenčních technologií při zpracování materiálů

| | Úběr a dělení materiálů | Spájení a zpevňování / Modifikace povrchu | Tvarování / Rozměrové opracování | Povrchová úprava |
|-------------------------|-----------------------------|---|--|-------------------------------|
| Laserový paprsek | LBM | svaření | Broušení | Kalení, vytváření |
| Elektronový paprsek | EBM | svaření, naprašování | Leštění | Žhání, kalení |
| Elektronový paprsek | EDM, WEDM | nárazové svaření | | |
| Iontový paprsek | LAM | implantace iontového plátování | iontové hlazení, leštění | iontová nitidace |
| Plazma | iontové opracování, leptání | Svaření TIG, MIG, spájení, pokovování | leštění | kalení |
| Chemický paprsek | CM, PCM | CVD, chemické cementování | Chemicko-mechanické leštění a broušení | Reaktivní chemické čistění |
| Elektrochemický paprsek | ECM | potahování | Leštění | Reaktivní el chemické čistění |

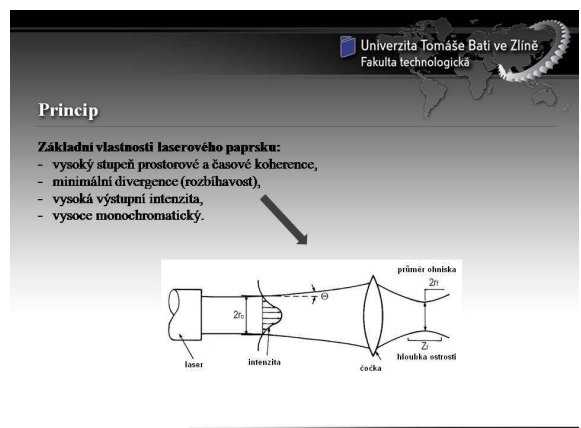
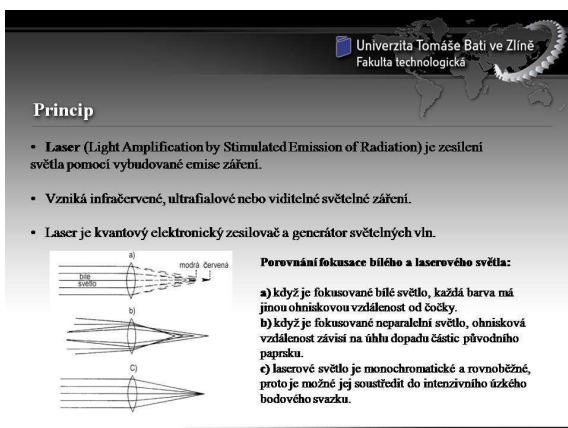
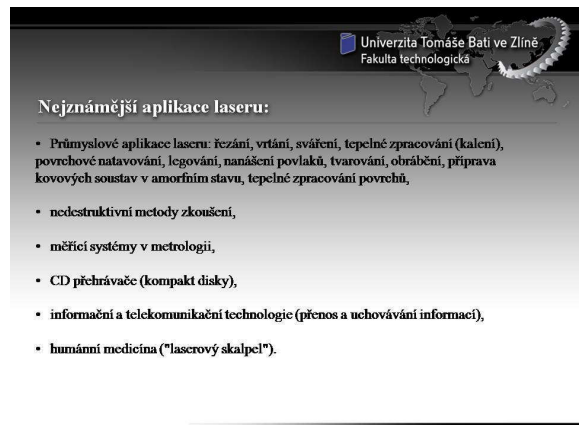
ELEKTROTEPELNÉ PRINCIPY

Kritéria pro výběr technologie

| | |
|---------------------------|--|
| Obrobnok | Tvar, rozměry, druh materiálu, citlivost na tlak, tezné síly, teplotu, korozi |
| Kvalita povrchu | Přesnost tvaru a rozměrové tolerance, integrita povrchu, reprodukovatelnost |
| Hospodárnost | Doba přípravky, výrobní čas, kapitálové náklady, provozní náklady (včetně nákladů na obsluhující personál, nástroje, údržbu a běžné výdaje) |
| Provozní požadavky | Lidské zdroje: vzdálenost, zručnost, bezpečnost, pracovní podmínky, životní prostředí Organizační: flexibilita, přestřelky pro automatizaci a integraci do automatizovaných výrobních systémů |

7.2 Obrábění laserem

Tato prezentace je zaměřena na opracování materiálu pomocí laseru. Na úvod vysvětluje princip laseru, oblasti použití, výhody a nevýhody použití této technologie, základní provozní charakteristiky a na závěr jsou přiloženy video ukázky obrábění laserem.



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Rozdělení laserů

1) aktivního prostředí tj. skupenství materiálu, které se používá na generování záření:

- pevné,
- plynové,
- kapalinové,
- polovodičové.

2) vlnové délky:

- infračervené záření (IR) $f < f_{opt}$
- optozáření, světelné záření $f \sim f_{opt}$
- ultrafialové záření (UV) $f > f_{opt}$
- rentgenové RTG a gama záření $f \gg f_{opt}$

3) druhu paprsku resp. režimu paprsku:

- v kontinuálním režimu (continuous wave - cw),
- v pulzním režimu (pulsed wave - pw),
- v tzv. Q - switched (Qs) režimu - je to zvláštní kontinuální režim s vysokou energií.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Rozdělení laserů

4) podle dosahovaného výkonu:

- nízko-výkonové (desetiny W až stovky W),
- vysoko-výkonné (1kW až 30kW).

5) z hlediska konstrukce laserového zařízení:

- systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek
- pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek

a) Systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek.
b) Pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek.
c) Systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečený zrcátky, zatímco laserová hlavice a obrobek jsou stacionární.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Klasifikace laserových technologických operací

Úběr materiálu - řezání, vrtání, mikroobrábění a čištění pomocí laseru

Mikroobrábění zahrnuje technologie: přišťování, ořezávání, značkování, renovace masek, gravírování a rytí.
 Čištění je odstraňování tenké povrchové vrstvy kontaminované oleji a plyny.

Spájení a zpevňování - svařování, spájení, potahování a tvrdé spájení

Tepelné zpracování povrchu - kalení, žhání, povrchové legování, rekystalizace polovodičových krystalů po iontové implantaci a také potahování metodami CVD a PVD pomocí laserového ohřevu.

Nové procesy - růst safírových krystalů, tahání optických vláken, barvení, dělení skla a keramiky kontrovaným lomem, procesy laserem podporovaného obrábění jako je soustružení, broušení a jiné kombinované procesy využívající laser.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Účinek laserového paprsku na materiál a úběr materiálu

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsku odrazí, část se absorbuje do materiálu a část projde materiálem. Absorbované paprsky ohřívají materiál, který se ohřevem nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti. Množství odražených paprsků závisí na vlastnostech materiálů a jejich schopnosti pohlcovat a odrazet laserové záření.

Důležité faktory pro použití laserového paprsku:

- reflektivita - odrazivost povrchu,
- absorpce - pochování laserového záření,
- tepelná vodivost,
- tavení povrchové vrstvy,
- odpařování.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Zařízení pro laserové opracování

Základní struktura laserového zařízení je vlastní každému typu laseru, sestává z laserového média (aktivní látka), zdroje excitací energie (čerpání), Fabry-Perotova optického rezonátoru, pomocí kterého se část stimulované emise záření neustále vrací do laserové dutiny.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Zařízení pro laserové opracování

CO₂ laser

Hlavní částí CO₂ laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a hélia. Energie potřebná na excitaci je vytvářena ve formě doutnajícího výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Zařízení pro laserové opracování

Nd - YAG laser

- je v dnešní době nejpoužívanější typ pevně-látkového laseru,
- aktivním materiálem je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y₃Al₅O₁₂) dopovaný ionty neodemu (Nd³⁺),
- výkonová hladina je několika 100 W.
- ionty neodemu tvoří oscilační médium, aktivní prostředí pracuje v pulzním nebo kontinuálním režimu,

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Zařízení pro laserové opracování

Excimerové lasery

- patří mezi plynové lasery s krátkou vlnovou délkou,
- vytvářejí světelné záření v ultrafialové a částech i v oblasti měkkého RTG záření pracujícím v pulzním režimu,
- jsou to vysoko-rychlostní lasery s ultrakrátkým trváním impulzu, lasery s nejkratšími, možnými impulzy elektromagnetického záření.

Použití:

- zpracování keramických a kompozitních materiálů (oblast mikro-obrábění),
- označování kovových předmětů,
- odstraňování nadbytečného materiálu na plošných spojích,
- mikro-řezání měkkých a tvrdých biologických tkání v humánní medicíně.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Provozní charakteristiky laserů

- Průměr fokusovaného paprsku typicky v rozsahu $0,18 \div 0,30$ mm, konkrétně pro jednotlivé druhy laserů: rubínový laser, Nd-YAG $0,013$ mm, Nd-sklo $0,020$ mm, CO₂ $0,076$ mm.
- Minimální průměr vrtání $0,005$ mm 5%, hloubka vrtaného otvoru 23 mm v závislosti od vrtaného materiálu.
- Průměry nad $1,27$ mm se vrtají technologií vyvrtávání resp. vrtání na jádro.
- Šířka přetavné vrstvy se udává v rozsahu $0,03 \div 0,05$ mm, někdy až $0,25$ mm.
- Průměrná rychlost úběru materiálu $8,20$ mm³/hod.
- Trvání impulsu pro průmyslové využití je $0,6$ ms, pro vrtání a mikroobrábění nano - piko až femto sekundy.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Provozní charakteristiky laserů

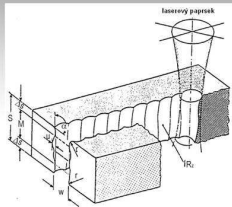
- Šířka zářezu (řezné škáry) se udává v závislosti na tloušťce materiálu v rozsahu $0,64 \div 2,54$ mm; pro materiály tenčí jako $1,6$ mm zářez může být $0,13$ mm, takovýto úzký zářez se tvoří vyššími rychlostmi.
- Rychlost řezání závisí na druhu laseru a jeho výkonu a taky na tloušťce řezaného materiálu. Běžně používaná rychlost posuvu pro ocel tloušťky 2 mm je okolo 6 m/min, pro polyakrylát 12 m/min (řezání CO₂ laserem, výkon 1 kW).

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Kvalita povrchu po opracování laserem

Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem:

As – náběhová a výběhová oblast při řezání ($0,1 - 0,2$ mm podle tloušťky materiálu),
M – měřená oblast pro určení hodnot $R_a, u, \alpha,$
 R_z – výška nerovnosti,
u – nepravidlost škáry,
 α – úhel vychýlení paprsku,
r – zaoblení vlivem řezání,
w – šířka řezu,
S – tloušťka materiálu



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Kvalita povrchu po opracování laserem

Kvalita povrchu závisí na několika faktorech:

- Parametrech procesu:
 - výkonu paprsku,
 - rychlosti posuvu paprsku
 - šířce vytvořené škáry (zářezu),
 - druhu paprsku a jeho módu,
 - ohniskové vzdálenosti,
 - průměru fokusovaného paprsku,
 - úhlu vychýlení paprsku α , důsledkem průchodu paprsků materiálem odchylka od původního směru ($\alpha = 75 \div 80^\circ$),
 - přidávném plynu (druh plynu, tlak plynu).

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Kvalita povrchu po opracování laserem

- Parametrech materiálu produktu:
 - fyzikálně - chemické vlastnosti materiálu,
 - typ materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit...),
 - termo - fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, reflektivita),
 - geometrie obrobku.
- Kvalitě řezu:
 - šířka řezu (řezné škáry), šířka kráteru
 - zaoblení hrany vlivem řezání, nepravidlost hrany,
 - šířka tepelně ovlivněné vrstvy (poškození vrstvy),
 - kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupu paprsku),
 - úbytek materiálu, změna struktury povrchu materiálu,
 - vychýlení paprsku,
 - tvoření trhlín,
 - zpevnění.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Výhody opracování laserem

- laserem se obrábějí všechny druhy materiálů bez ohledu na tvrdost, křehkost, pevnost,
- šířka zářezu je úzká a získávají se ostré hrany,
- vysoká rychlost a přesné řezání je možné zabezpečit vhodnou volbou přidávného plynu,
- tvar řezu může být řízený NC a CNC,
- deformace řezaných částí je velmi malá,
- bezkontaktní opracování materiálů,
- změna tvaru obrobku, tvaru řezání a plánování výroby je velmi jednoduché s podporou PC
- na obrobek působí jen lasrový paprsek, odpadají problémy s vibrací stroje, nástroje, odpadá složitost upínacího zařízení,
- spolehlivé a velmi vysoce kvalitní řezání v automatickém cyklu.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Použití laserového paprsku

V současnosti se lasrové technologie v procesech úběru materiálu (obrábění) dělí do dvou skupin podle způsobu použití:

lasrové obrábění / opracování (LM - Laser Machining), které představuje alternativu k tradičnímu opracování a používá se pro řezání, vrtání a tvarové opracování různých materiálů,

lasrem podporované obrábění (LAM - Laser Assisted Machining), které představuje alternativu k procesu řezání a broušení tvrdých kalených materiálů a keramiky. Při obrábění s podporou lasru, slouží lasrový paprsek na ohřev povrchu obrobku a jeho následné řezání nebo broušení v "plastickém" stavu. Při technologii LAM materiál není natavený a následně odpařený, ale laser se používá jako intenzivní tepelný zdroj na změnu deformačního chování materiálu a jeho "přeměnu" z křehkého na tvrdý.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ukázka použití laserového paprsku



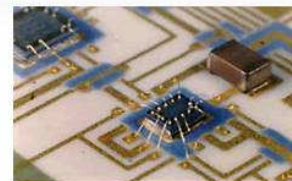
Ukázka použití laserového paprsku



- Laserové řezání



- Laserové obráběcí centrum



- Uplatnění laserové mikroobrábění

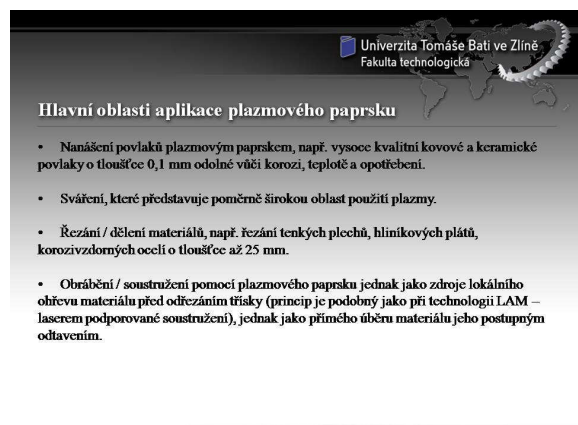
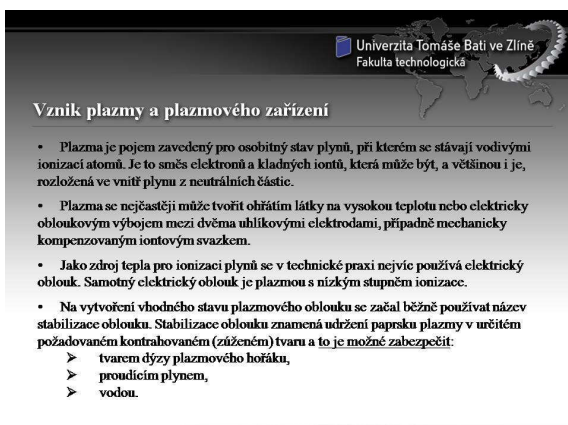
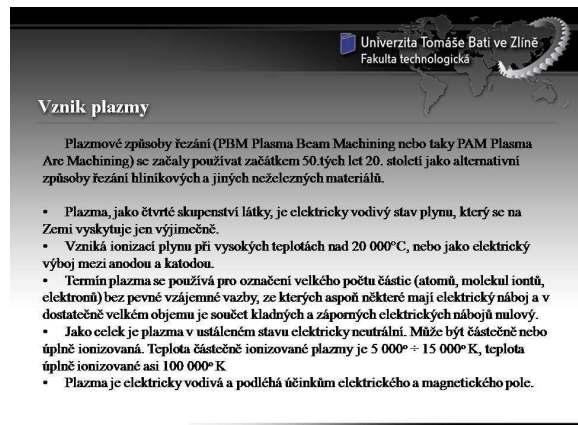
Ukázka použití laserového paprsku



- LAM (Laser Assisted Machining) – Laserem podporované obrábění

7.3 Obrábění plazmou

V této prezentaci se seznámíme s metodami opracování materiálu pomocí plazmy, principem tvorby plazmy, oblastmi použití, výhodami a nevýhodami použití této technologie, plazmovým řezáním a na závěr jsou opět přiloženy video ukázky řezání plazmou.



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

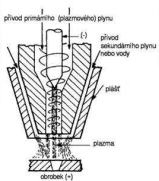
Princip tvorby plazmy v hořáku

K dosažení technicky kvalitní plazmy je potřeba sledovat parametry tvořící se plazmy:

- teplota a elektrická vodivost (zvyšováním velikosti proudu se zvyšuje teplota a elektrická vodivost plazmy),
- hustota proudu plazmy, průměr paprsku,
- stupeň fokuse paprsku po výstupu z dýzy.

Základní konfigurace hořáku pro plazmový oblouk:

- Záporně nabitá elektroda a kladně nabitý obrobek tvoří oblouk.
- Plazmový (primární plyn) je ionizovaný a ohříván na vysokou teplotu.
- Sekundární přívod plynu chrání oblast tavení materiálu.



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Princip tvorby plazmy v hořáku

Na vlastnosti plazmy mají vliv vlastnosti používaných plynů:

- plazmové plyny - (Ar), argon a vodík (Ar + H₂), (He), (N₂), CO₂, vzduch,
- fokusační plyny - (Ar), (Ar + H₂), argon a dusík (Ar + N₂), (N₂),
- ochranné plyny - (Ar)

Plazma se vytváří rozkladem molekul těchto plynů za vysokého vývinu tepla, při přechodu elektrickým obloukem, který hoří mezi netavící se elektrodou (obvykle zápornou wolframovou katodou) a řezaným materiálem (kladnou anodou).

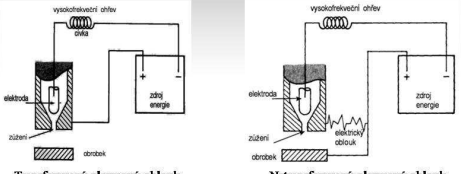
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Plazmové zařízení

Plazmové zařízení sestává ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky (obvykle NC nebo CNC řízení).

Dělí se na dva základní typy, které používají:

- přenesený (transferovaný) plazmový oblouk (plasma arc),
- nepřenesený (netransferovaný) – nevodivé materiály.



Transferovaný plazmový oblouk **Netransferovaný plazmový oblouk**

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

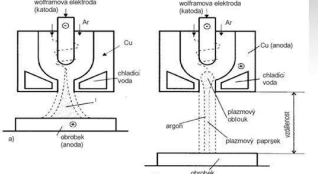
Plazmové zařízení

Důležitou částí plazmového zařízení jsou plazmové hořáky, které musí zabezpečovat:

- přívod proudu na elektrodu (většinou wolframovou),
- přívod pracovních plynů tj. plazmového, fokusačního a ochranného,
- tvarování plazmového oblouku,
- usměrnění plazmového paprsku na místo řezání.

Základní typy plazmy:

- Plazmový oblouk – Plasma Arc
- Plazmový paprsek – Plasma Jet



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

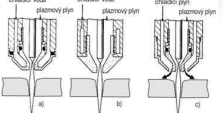
Plazmové zařízení

Plazmové hořáky je možno rozdělit podle:

- výkonu (výkon je daný součinem proudu a napětím oblouku),
- způsobu chlazení (přímé chlazení vodou, nepřímé chlazení vodou, chlazení plynem),
- složení plazmového plynu (oxidační, neoxidační),
- druhu materiálu katody (wolfram, zirkonium, hafnium),
- pracovního systému hořáku (na principu stlačeného vzduchu, vstříkávání vody atd.),
- použití, na hořáky pro měni nebo strojní řezání.

Druhy plazmových hořáků s rozdílným chlazením:

- přímé chlazení vodou
- nepřímé chlazení vodou
- chlazení plynem



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Mechanismus plazmového řezání materiálů

Princip plazmového řezání spočívá v tavení děleného materiálu extrémně vysokými teplotami, které se tvoří vznikem plazmy. Vysoké teploty (17 000 ÷ 33 000 °C) a vysoká intenzita přenosu tepla do materiálu (24,1 ÷ 68,7 MW/m²) charakterizují přednosti plazmového řezání v porovnání s řezáním třeba plamenem (2 900°C).

Při styku plazmy s povrchem tuhého materiálu nastává vlivem vysoké teploty tavení materiálu, odtékání, odstříkávání, odpařování, sublimace nebo rozprašování. Tyto jevy se pak využívají na technologické procesy tavení, svaření, řezání materiálů nebo tvoření povlaků.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Proces úběru materiálu (řezání/dělení) plazmou

Je ovlivněno následujícími parametry:

- **Průměr dýzy:** Kvalita řezu závisí na tepelné intenzitě, na dosažení co nejvyšší teploty je potřebný velmi malý průměr dýzy. Malé průměry dýz snižují jejich životnost (zvyšuje se sklon k opálení výtokového otvoru dýzy). Používané průměry otvoru dýzy jsou udávány v rozsahu 0,79 ÷ 6,35 mm.
- **Zdroj výkonu pro oblouk:** Užitečný výkon pro řezání plazmou je okolo 250 kW, pro proudy v rozsahu 50 ÷ 1000 A, a napětí 100 ÷ 250 V. Potřebný výkon se mění v závislosti na druhu a tloušťce materiálu.
- **Vzdálenost mezi hořákem a materiálem:** Je důležitá při řezání plazmovým paprskem sloupovitého tvaru. Pro vzdálenost mezi hořákem a materiálem, která se může měnit v rozsahu 6,4 ÷ 76,2 mm, platí:
 - kvalita řezné drážky se zlepšuje se snižováním vzdálenosti a zvyšováním intenzity tepla,
 - zvyšování vzdálenosti zvyšuje nároky na výkon paprsku.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Proces úběru materiálu (řezání/dělení) plazmou

Je ovlivněno následujícími parametry:

- **Použité plazmové plyny:** argon, helium, dusík a další; Plazmové plyny svoji cenou ovlivňují náklady na proces. Stejně ovlivňují kvalitu řezu, rychlost řezání a životnost dýz.
- **Rychlost řezání,** má vliv na kvalitu řezné drážky, na požadovanou drsnost, na velikost tepelné ovlivněné oblasti (HAZ). Rychlost řezání se nelineárně zvyšuje se zvyšováním výkonu plazmového hořáku. Se zvyšováním tloušťky materiálu rychlost klesá. Platí to pro procesy, které využívají tepelnou energii při natavování materiálu při jeho zpracování.
- **Šířka řezné drážky;** řezná drážka po řezání plazmou je charakterizovaná výraznou šířkou až několik milimetrů v porovnání s řezáním laserem nebo kyslíkovým plamenem.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Druhy plazmových řezacích strojů

MG – Vysoce profesionální tavicí (obráběcí) zařízení.
 PLS – Přesné vysokovýkonné řezací zařízení.
 HS – Přesné vysokovýkonné řezací zařízení.
 CombiCut – Vysoce profesionální tavicí zařízení (plazma / autogen).
 OXYCUT – zařízení na řezání autogenem (případně plazmou).
 MicroCut – Pro menší a střední provozovny.
 AirCut – automatické plazmové řezací zařízení pro vzduchotechniku.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Použití plazmového paprsku pro opracování materiálů

Mezi výhody plazmového řezání v porovnání s řezáním plamenem a laserem patří:

- lepší kvalita řezu při řezání hrubých materiálů (v porovnání s plamenem),
- rychlejší řezání jako při řezání plamenem,
- při řezání tenkých plechů je levnější jako laser.

Mezi nevýhody patří:

- vyšší náklady jako při řezání plamenem,
- méně kvalitní hrany v porovnání s laserem.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ukázka použití plazmy



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická


Ukázka použití plazmy

Motoman SK120 MRC Robot




Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Ukázka použití plazmy

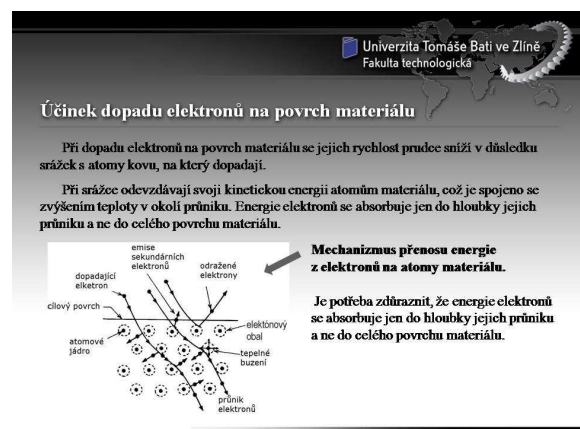
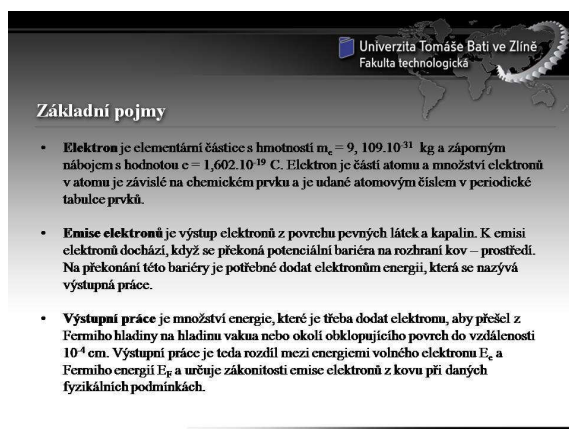
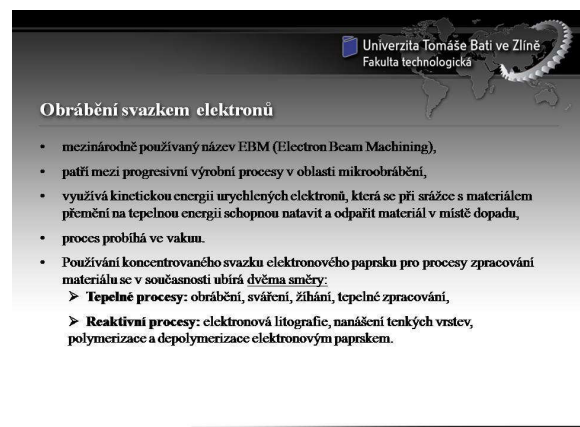


• 3D Plazma obráběcí stroj



7.4 Opracování materiálu svazkem elektronů

Tato prezentace je zaměřena na obrábění materiálu pomocí svazku elektronů. Na úvod vysvětluje princip a účinky plazmy. Neopomíná ani oblasti použití, výhody a nevýhody použití této technologie, jakož i zařízení využívající tohoto jevu. Na závěr můžeme shlédnout video ukázky obrábění svazkem elektronů.



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Princip opracování materiálu elektronovými paprsky

- Obrábění elektronovým paprskem je proces **natavení a odpaření materiálu** svazkem elektronů emitovaných žhavenou elektrodou ve vakuu.
- Žhavená elektroda (katoda) obvykle wolframový drát emituje elektrony, které jsou urychlované vysokým napětím ($30 \div 180$ kV).
- Pomocí magnetického pole nebo vysokofrekvenčního elektrického pole je svazek letících elektronů zkoncentrovaný, nasměrovaný a urychlovaný směrem k cílovému předmětu (obrobku).
- Podle oblasti použití bývá průměr fokusovaného paprsku $0,025 \div 1$ mm. Tento proces probíhá jen ve vakuu.
- Koncentrovaný vysoko-energetický svazek elektronů při dopadu na materiál vyvolává jeho lokální ohřev nad teplotu tavení a materiál se intenzivně odpaňuje (*evaporate*).

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Princip opracování materiálu elektronovými paprsky

Obrábění svazkem elektronů je definované jako postup změny tvaru, vlastností materiálu nebo obrobku použitím elektronového paprsku.

Výhody:

- možnost jemné fokusace paprsku do bodu,
- možnost generovat vysoko-energetický paprsek,
- schopnost rychle a přesně vychylovat paprsek elektrónů,
- možnost měnit energii paprsku změnou urychlovacího napětí a řídit hranice průniku paprsku,

Nevýhody:

- nutnost vysokého vakua při generování elektronů a nutnost práce ve vakuu (výjimku tvoří některé procesy jako sváření mimo vakuu a využívání toku elektronů na změnu vlastností ozařováním),
- vznik škodlivého RTG záření,
- problémy při zpracování elektricky nevodivých materiálů (izolátorů) a diamantů.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Zařízení pro opracování elektronovými paprsky

Jeho konstrukce je podobná elektronovému mikroskopu.

Sestává z:

- elektronového děla,
- usměrňovacího systému (fokusací a vychylovací cívky),
- pracovní komory,
- vakového odsávacího systému (rotační a difúzní vývěvy),
- zdroje energie a řídicího systému.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Zařízení pro opracování elektronovými paprsky

Elektronové dělo

- pracuje na principu triody sestávající z katody, mřížky a anody. Katoda při ohřevu na žhavici teplotu (okolo $2\,500 \div 3\,000$ °C) emituje elektrony. Nejjednodušší zdroj elektronů (katoda) je žhavený wolframový drát.
- produkuje elektronové paprsky malého průměru s velkou hustotou energie a urychlované volně elektrony na rychlost blízko rychlosti světla. Letící elektrony dosahují rychlosti okolo 60% rychlosti světla.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Model tavení a úběru materiálu elektronovým paprskem

elektronový paprsek

elektronový paprsek

rozetník

nenatavený materiál

natavená zóna

zhavená oblast vysokoenergetickým paprskem a nízkou hustotou toku elektronů

odpařená oblast (dutina) vysokoenergetickým paprskem s vysokou hustotou toku elektronů

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Oblast využití technologie elektronového paprsku

- Vrtání otvorů – např. otvory o průměru $50 \mu\text{m}$ pro tryskové motory
- Dělení materiálů – proces je limitovaný velikostí vakuové komory
- Dirkování (perforation) – textilu, polymerů
- Mikroobrábění – tvoření tenkých štěrbin, vzorů (pattern) a otvorů
- Značkování, zdobení a gravírování – výhodnější jako laser, vyšší přesnost a rychlost
- Elektronová litografie (Electron Beam Lithography) – proces používaný při výrobě integrovaných obvodů (výroba čipů až s $200\,000$ odlišnými strukturálními detaily, výroba stop ve vzdálenosti $40 \mu\text{m}$)
- Sváření – přednosti jsou úzké a hluboké svarové spoje
- Teplotní zpracování – používá se na lokální zpevňování povrchu dílů
- Napařování - tvoření tenkých vrstev (Electron-beam vapour deposition)

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Vrtání elektronovým paprskem

- pulzující bodový paprsek vyvolá lokální ohřev a natavení materiálu a následně odpaření malého množství ohřátého materiálu,
- přes úzký vytvořený kanálek paprsek proniká hlouběji do materiálu, ten se ohřívá, natavuje a postupně odpaňuje; odpařování je ve formě erupce částic materiálu, který jednak vystřikuje přes vznikající otvor a jednak se usazuje na stěně otvoru,
- při natavování vznikají malé bubliny, přes které paprsek lehceji proniká do hlubších vrstev; když paprsek začne pronikat do pomocného materiálu, zvyšuje se tlak par nataveného kovu (pomocný materiál se používá na vymrštění nataveného materiálu z otvoru pomocí vysokého tlaku páry, která vzniká při jeho tavení),
- vysoký tlak par pomocného materiálu vymrští natavený materiál na stěny, zanechává po sobě otvor a v pomocném materiálu dutinu,

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Výhody a nevýhody vrtání pomocí elektronového paprsku

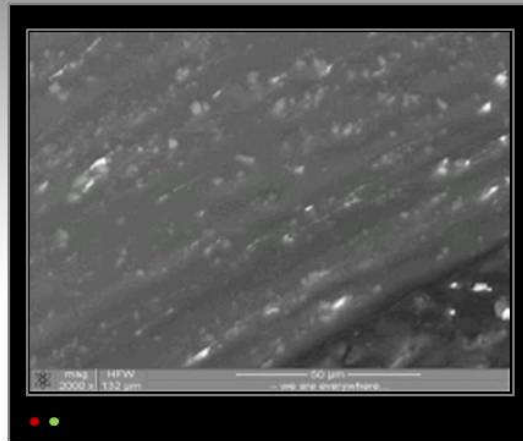
Výhody:

- Rychlost vrtání až 4000 otvorů za sekundu.
- Možnost vrtání rozličných uspořádání otvorů, pohyb paprsku je řízený počítačem.
- Mechanické vlastnosti materiálu (tvrdost, tažnost, křehkost), elektrické vlastnosti nebo vlastnosti povrchu (odrazivost) nejsou limitující faktory při EBM vrtání.
- Parametry vrtání je možno jednoduše měnit od procesu k procesu.
- Opatřební nástroje nexistují.
- Vlastnosti dokončeného povrchu jsou v porovnání s jinými procesy kvalitativně lepší

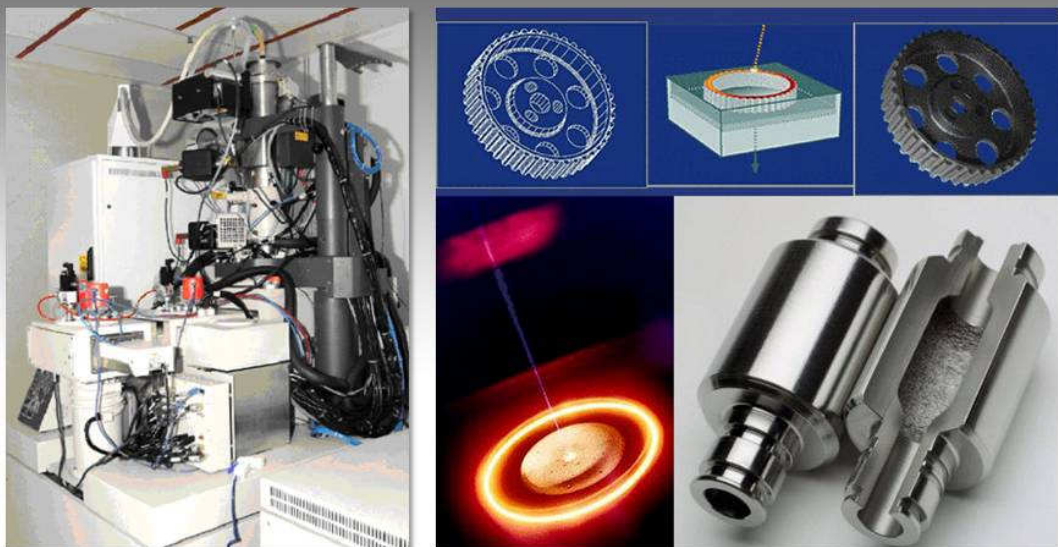
Nevýhody:

- Vysoké kapitálové náklady na zařízení.
- Neproduktivní čas při odsávání vakuové komory, obvykle trvá odsávání $10 \div 20$ minut.
- Požadavky na zručnost a vzdělanost personálu.
- Nutnost používat přídavný materiál.

Ukázka použití elektronového paprsku



Ukázka použití elektronového paprsku



- Leica/Vistec VB6 electron beam lithography tool

ZÁVĚR

Tato práce především popisuje současné metody obrábění pomocí progresivních technologií. Název progresivní způsoby úběru materiálu nebo progresivní způsoby obrábění se používá pro širokou škálu mechanických, elektrických tepelných a chemických procesů při úběru (odstraňování) materiálu, které byly vyvinuté převážně po roku 1940. Jednotlivé metody jsou přehledně rozděleny a popsány, včetně vhodnosti použití a uvedení příkladů. Každá metoda má také své výhody a nevýhody, které jsou taktéž u každé z nich uvedeny.

V prezentacích, které byly vypracovány v praktické části, jsem se snažil o co nejsrozumitelnější vysvětlení problémů nekonvenčních technologií za pomoci videí, jež ukazují jejich užití v různých průmyslových odvětvích. Kladl jsem důraz jak na obsahovou, tak na grafickou stránku těchto prezentací aby výuka i učení bylo pro obě strany příjemné. Rovněž jsou vypracovány testy k dané problematice, které mohou posloužit jako pomůcka při výuce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bhushah, B.: Handbook of trilogy, McGraw.hill New York, 1991, 1.ed
- [2] Snoeys, R.; Staelens, F.; Dekkyser, W.: Current Trends in Non-Conventional Material Removal Processes, Annals of the CIRP Vol.35/2, (1986), p.468
- [3] Vasilko, K. a kol.: Nové materiály a technologie ich spracovania Alfa Bratislava, 1990, 1.vyd.
- [4] Král, J.; Líška, D.; Maňková, I.; Ferdinandy, M.: Ionové plátovanie – progresívna technológia tvorby povlakov, časť III. Ocelové plechy XIII, č.1-2, 1986 s.52-61
- [5] Přednášky prof. Ing. Ildikó Maňková, CSc.
- [6] McGeough, J. A.: Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, (1988), 1.ed.
- [7] Maňková, I.: Progresivně technologie, Advanced methods of material removal, Vienala 2000, 1vyd.
- [8] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [10] <http://www.youtube.com/watch?v=506BV0IdNWM>
- [11] <http://www.youtube.com/watch?v=jhc5xzm1IP8>
- [12] http://www.youtube.com/watch?v=FHUs_u27IpE

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|------------|--|
| HB | Tvrдость (podle Brinella). |
| EDM | Elektroerozivní obrábění (Electrodischarge machining). |
| LBM | Laserové obrábění (Laser Beam Machining). |
| PAM | Obrábění plazmovým obloukem (Plasma Arc Machining). |
| PBM | Obrábění plazmovým paprskem (Plasma Beam Machining). |
| EBM | Obrábění elektronovým paprskem (Electron Beam Machining). |
| IBM | Obrábění iontovým paprskem (Ion Beam Machining). |
| CM | Chemické obrábění (Chemical machining). |
| PCM | Fotochemické obrábění (Photochemical machining). |
| ECM | Elektrochemické obrábění (Electrochemical machining). |
| IR | infračervené záření. |
| UV | ultrafialové záření. |
| RTG | rentgenové záření. |
| cw | Kontinuální režim (continuous wave). |
| pw | Pulzní režim (pulsed wave). |
| Qs | Q - switched režim (zvláštní kontinuální režim s vysokou energií). |
| PVD | Physical Vapor Deposition. |
| CVD | Chemical Vapor Decomposition. |
| HAZ | Tepelně ovlivněná zóna (heat affected zone). |
| Nd-YAG | Neodym-Yttrium Aluminium Granát. |
| Δs | Náběhová a výběhová oblast při řezání. |
| M | Měřená oblast pro určení hodnot R_z , u , α . |
| R_z | Výška nerovností. |
| u | Nepřavidelnost škáry. |

| | |
|----------|-------------------------------|
| α | Úhel vychýlení paprsku. |
| r | Zaoblení vlivem řezání. |
| w | Šířka řezu. |
| S | Tloušťka materiálu. |
| LAM | Laser Assisted Machining. |
| LM | Laser Machining. |
| E_e | Energiemi volného elektronu. |
| E_F | Fermiho energie. |
| m_e | Hmotnost elementární částice. |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| <i>Obr.1. Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění</i> | 11 |
| <i>Obr.2. Elektroerozivní obrábění EDM</i> | 13 |
| <i>Obr.3. Laserové obrábění LBM</i> | 13 |
| <i>Obr.4. Obrábění plazmovým paprskem PAM</i> | 14 |
| <i>Obr.5. Obrábění elektronovým paprskem EBM</i> | 14 |
| <i>Obr.6. Obrábění iontovým paprskem IBM</i> | 15 |
| <i>Obr.7. Konstrukce laseru</i> | 16 |
| <i>Obr.8. Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace laserového paprsku.</i> | 17 |
| <i>Obr.9. Režimy paprsku.....</i> | 18 |
| <i>Obr.10. Rozdělení laserů dle systému.....</i> | 19 |
| <i>Obr.11. Účinek laserového paprsku při jeho dopadu na povrch materiálu</i> | 20 |
| <i>Obr.12. Základní sestava laseru</i> | 21 |
| <i>Obr.13. CO₂ laser</i> | 22 |
| <i>Obr.14. Ilustrace konstrukce typického pevnolátkového laseru.....</i> | 23 |
| <i>Obr.15. Kritéria pro hodnocení povrchu po řezání laserem</i> | 25 |
| <i>Obr.16. Princip tvorby plazmy v hořáku</i> | 29 |
| <i>Obr.17. Transferovaný plazmový oblouk.....</i> | 30 |
| <i>Obr.18. Netransferovaný plazmový oblouk</i> | 30 |
| <i>Obr.19. a) Plazmový oblouk – plasma arc; b) plazmový paprsek – plasma jet</i> | 32 |
| <i>Obr.20. Druhy plazmových hořáků s rozdílným chlazením</i> | 32 |
| <i>Obr.21. Účinek dopadu elektronů na povrch materiálu</i> | 36 |
| <i>Obr.22. Zařízení na opracování svazkem elektronů</i> | 38 |
| <i>Obr.23. Elektronové dělo používané na vrtání</i> | 39 |
| <i>Obr.24. Model tavení materiálu elektronovým paprskem a model úběru materiálu.....</i> | 39 |
| <i>Obr.25. Postup vrtání pomocí elektronového paprsku</i> | 41 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| <i>Tab.1. Použití nekonvenčních technologií při zpracování materiálů</i> | 15 |
| <i>Tab.2. Kritéria pro výběr technologie</i> | 15 |

SEZNAM PŘÍLOH

P I: Seznámení s nekonvenčními technologiemi

P II: Obrábění laserem

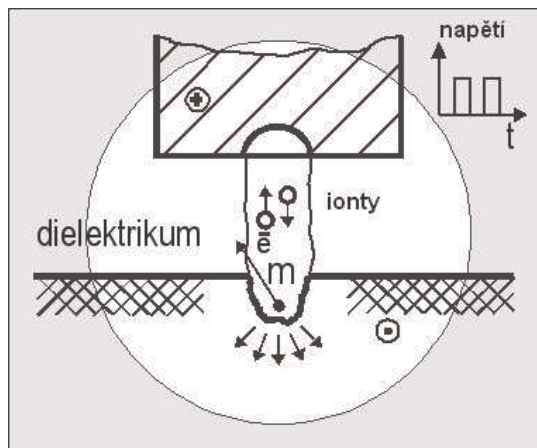
P III: Obrábění plazmou

P IV: Opracování materiálu svazkem elektronů

P V: Cd disk obsahující: - bakalářskou práci,
- prezentace a testy.

P I: SEZNÁMENÍ S NEKONVENČNÍMI TECHNOLOGIEMI

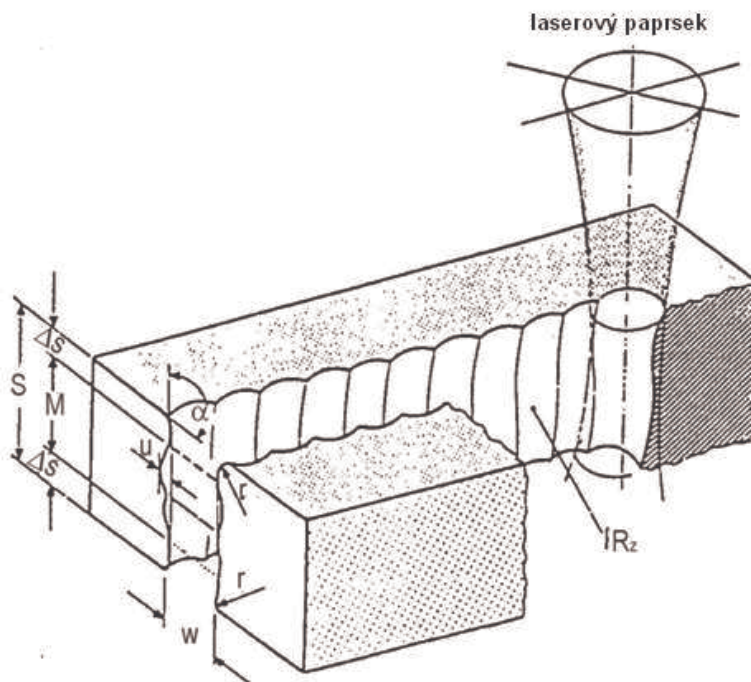
- 1) Co jsou to nekonvenční technologie?
- 2) Vyjmenujte alespoň 5 metod nekonvenčního obrábění.
- 3) Vysvětlete rozdíl mezi LBM a EBM.
- 4) Jaký je princip obrábění iontovým paprskem IBM?
- 5) Vyjmenujte alespoň 3 odlišnosti oproti klasickým technologiím.
- 6) Kterou metodu popisuje tento obrázek? Napište ve stručnosti princip této metody.



- 7) Výhody a nevýhody obrábění pomocí PAM.
- 8) Napište alespoň 5 kritérií pro výběr technologie obrábění.
- 9) Oblast použití LBM.
- 10) Které metody jsou vhodné pro sváření?

P II: OBRÁBĚNÍ LASEREM

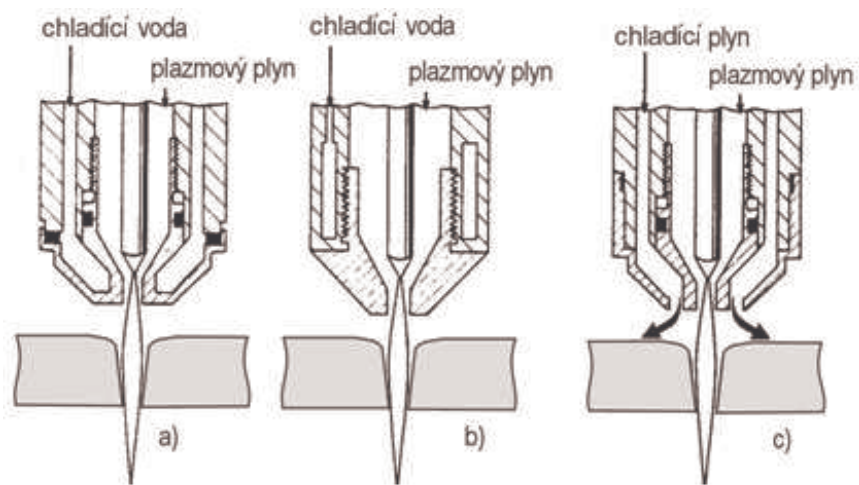
- 1) Neznámější aplikace laseru.
- 2) Rozdělení laserů.
- 3) Jakým způsobem dochází k úběru materiálu pomocí laseru?
- 4) Z čeho se skládá základní struktura laserového zařízení?
- 5) Vyjmenujte alespoň 3 druhy laserových zařízení.
- 6) Na jakých faktorech závisí kvalita opracovaného povrchu?
- 7) Popište jednotlivé veličiny (Δs , M , R_z , u , α , r , w , S)



- 8) Výhody obrábění laserem.
- 9) Co je to LAM? Vysvětlete.
- 10) Vysvětlete princip CO_2 laseru.

P III: OBRÁBĚNÍ PLAZMOU

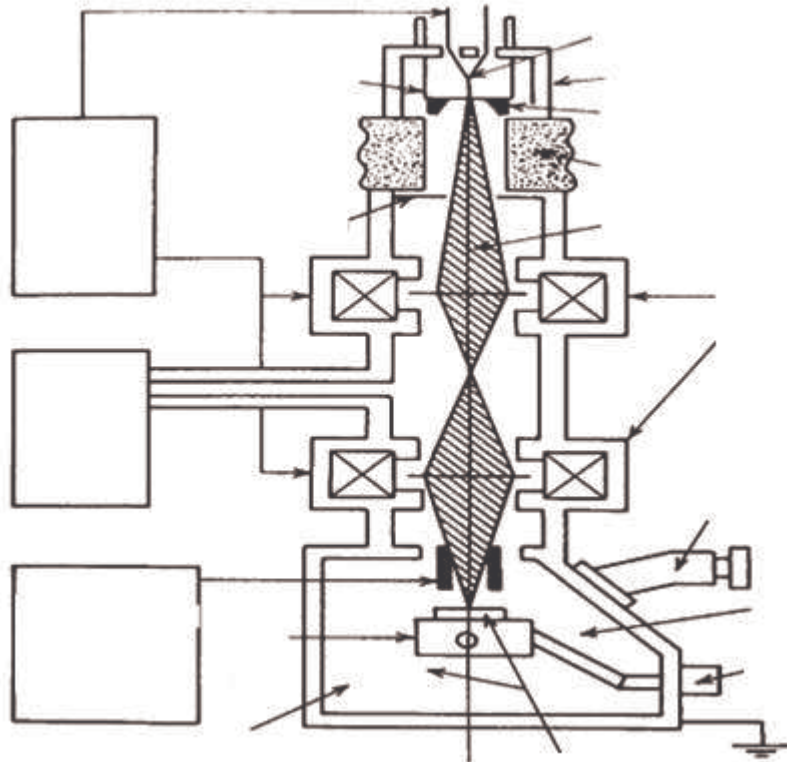
- 1) Co je to plazma, jak vzniká?
- 2) Hlavní oblasti aplikace plazmového paprsku.
- 3) Z čeho se skládá plazmové zařízení?
- 4) Princip tvorby plazmy v hořáku.
- 5) O jaký druh plazmových hořáků jde?



- 6) Jakým způsobem dochází k řezání pomocí plazmy?
- 7) Co je to „plasma arc“?
- 8) Jaké parametry mají vliv na kvalitu řezání pomocí plazmy?
- 9) Výhody a nevýhody použití plazmy.
- 10) Co má vliv na vlastnosti plazmy?

P IV: OPRACOVÁNÍ MATERIÁLU SVAZKEM ELEKTRONŮ

- 1) Vysvětlete pojmy elektron, emise elektronů, výstupní práce.
- 2) Stručně vysvětlete princip obrábění pomocí EBM.
- 3) Výhody a nevýhody EBM.
- 4) Účinek dopadu elektronů na povrch materiálu.
- 5) Z čeho se skládá zařízení pro obrábění pomocí elektronových paprsků? Popište jednotlivé části obrázku:



- 6) Elektronové dělo.
- 7) Oblasti použití EBM.
- 8) Jak dochází k vrtání otvorů elektronovými paprsky?
- 9) Vysvětlete pojem „electron beam lithography“
- 10) Výhody a nevýhody vrtání pomocí EBM oproti ostatním technologiím.