

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

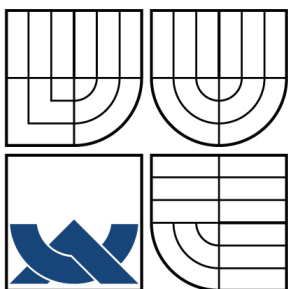
NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY DĚLENÍ MATERIÁLŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KULENDA

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY DĚLENÍ MATERIÁLŮ

UNCONVENTIONAL METHODS OF MATERIAL CUTTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN KULENDA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Kulenda

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nekonvenční způsoby dělení materiálů

v anglickém jazyce:

Unconventional methods of material cutting

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie možných nekonvenčních metod dělení materiálů se zaměřením na jejich vhodnost pro velko- či malosériovou výrobu. Rešerše bude obsahovat základní rozdělení a principy.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na nekonvenční metody dělení materiálů se zhodnocením jejich vhodnosti či nevhodnosti a s ukázkami použití.

Seznam odborné literatury:

1. FOREJT, M. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Brno, Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1991. 187 s. Edit. Nakladatelství VUT v Brně. ISBN 80-214-0294-6.
2. ŽÁK, Jan, SAMEK, Radko, BUMBÁLEK, Bohumil. Speciální letecké technologie I. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0128-1. s. 220.
3. PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 12.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

KULENDA Martin: Nekonvenční způsoby dělení materiálů.

Bakalářská práce shrnuje poznatky o nekonvenčních způsobech dělení materiálů. V práci jsou rozebrány pouze v praxi nejpoužívanější a nejvhodnější metody. Mezi popsání metody patří dělení materiálů laserem, plazmou, vodním paprskem, paprskem elektronů a ultrazvukem. U každé z uvedených metod je popsán princip technologie a současná technologická zařízení sloužící k dělení materiálů v průmyslu. Práce srovnává jednotlivé metody z hlediska jejich výhod a nevýhod při dělení různých typů materiálů, dále pak vhodnost použití těchto metod v malosériové či velkosériové výrobě.

Klíčová slova: laser, plazma, vodní paprsek, paprsek elektronů, ultrazvuk, dělení materiálů, nekonvenční technologie, řezání

ABSTRACT

KULENDA Martin: Unconventional methods of material cutting.

The present bachelor thesis summarizes the findings of unconventional methods of materials cutting. The thesis is only concerned with the most common and most appropriate methods used in practice. The described methods include cutting by laser, plasma, water jet, electron beam and ultrasound. For each of these methods, the principle of current technologies and technological equipment used for materials cutting in industrial practice is described. This thesis compares the individual methods in terms of their advantages and disadvantages when cutting different types of materials and also the appropriateness of the use of such methods in small or large series production.

Keywords: laser, plasma, water jet, electron beam, ultrasound, materials cutting, unconventional technologies, cutting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KULENDA, M. *Nekonvenční způsoby dělení materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 26.5.2009

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat všem mým rodinným příslušníkům a přátelům, kteří mě podporovali při psaní této práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1 ÚVOD	9
2 ŘEZÁNÍ LASEREM	10
2.1 Princip technologie, výhody a nevýhody	10
2.2 Metody řezání	11
2.2.1 Tavné dělení	11
2.2.2 Oxidační dělení.....	11
2.2.3 Sublimační dělení	12
2.3 Typy laserů	12
2.3.1 Pevnolátkové	12
2.3.2 Kapalinové.....	13
2.3.3 Plynové.....	13
2.3.4 Polovodičové	14
2.3.5 Lasery pro průmysl.....	14
3 ŘEZÁNÍ PLAZMOU	15
3.1 Princip technologie, výhody a nevýhody	15
3.2 Používané plyny	16
3.3 Technologická zařízení	16
3.3.1 Plynová stabilizace plazmového hořáku	17
3.3.2 Vodní stabilizace plazmového hořáku	17
4 ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM	18
4.1 Princip technologie, výhody a nevýhody	18
4.2 Automatizované dělení materiálu a dělicí stroje	19
5 ŘEZÁNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ	21
5.1 Princip technologie, výhody a nevýhody	21
6 ŘEZÁNÍ ULTRAZVUKEM	23
6.1 Princip technologie, výhody a nevýhody	23
6.2 Technologická zařízení	24
7 ZÁVĚR	25

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk

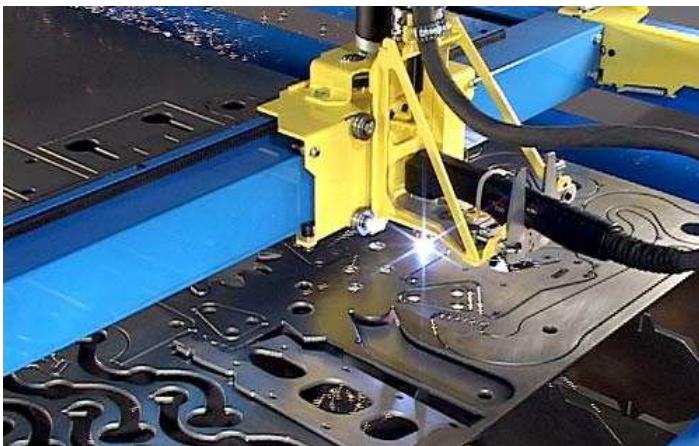
1 Úvod [21] [23]

Pod pojmem nekonvenční dělení materiálu si můžeme představit netradiční způsoby, které nejsou v praxi aplikovány v takovém rozsahu jako tradiční metody (např. upichování, řezání plamenem, stříhání, atd.). U těchto metod se využívá různých účinků k úběru materiálu (např. tepelné, elektrochemické, chemické, mechanické aj.). Narozdíl od tradičních metod využívají nekonvenční technologie bezsilové působení na obráběný materiál bez vzniku třísek. Mezi nejznámější a v praxi nejrozšířenější metody patří řezání laserem, plazmou, vodním paprskem, paprskem elektronů a řezání ultrazvukem.

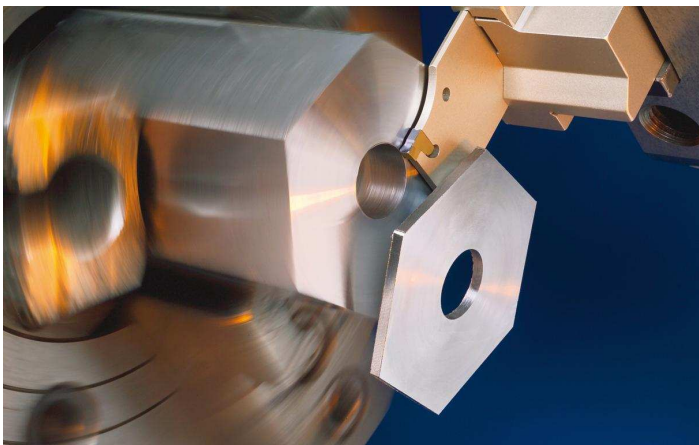
Některé z nekonvenčních technologií byly vyvinuty již v 50. letech 20. století, ale jejich masivnější nástup do průmyslu se datuje o třicet až čtyřicet let později. Tento nástup byl vyvolán stále se zvyšujícími požadavky strojírenství:

- vývoj a použití nových materiálů s lepšími chemickými a fyzikálními vlastnostmi (vyšší tvrdost, pevnost, houževnatost), které nelze nebo lze jen velmi obtížně obrobit konvenčními metodami
- vyšší nároky na přesnost a hospodárnost výroby
- zrychlení výrobního procesu

V současnosti jsou jednotlivé metody stále více zdokonalovány a zaváděny do průmyslu. Při dělení materiálů pomocí nekonvenčních technologií již není do řezného procesu zapojen přímo lidský faktor, nýbrž přesně naprogramované dělicí stroje, které umožňují vyrobit součásti velmi přesné a tvarově složité. Ovšem jejich nákup není ekonomicky nejvýhodnější, proto je důležitým rozhodnutím, zda se výrobním podnikům vyplatí nákup těchto zařízení. Díky konstrukci těchto strojů se zvýšila i bezpečnost a produktivita práce.



Obrázek 1.1 Nekonvenční metoda dělení materiálů - řezání plazmou [11]



Obrázek 1.2 Tradiční metoda dělení materiálů - upichování [27]

2 Řezání laserem [1] [2]

Metoda pro dělení materiálu, využívající laser jako technologické zařízení. Zesílený laserový paprsek umožňuje dělit materiály a slitiny nezávisle na jejich tepelně - fyzikálních vlastnostech. Předností technologie je velmi malá šířka řezu s minimální tepelně ovlivněnou oblastí.

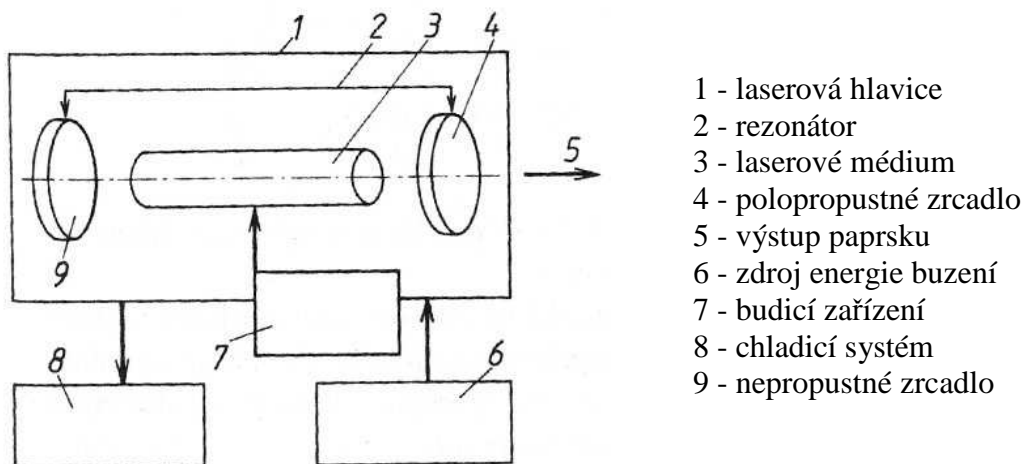


Obrázek 2.1 - ukázka řezání laserem, - vyřezané výrobky [4]

2.1 Princip technologie, výhody a nevýhody [1] [3] [14]

Vznik této technologie se datuje do 60-tých let minulého století. Ovšem lasery se začaly zdokonalovat a více technologicky zavádět do průmyslové výroby až v 90. letech 20.století.

Laser pracuje na principu stimulované emise záření, která je vyvolána dopadem záření na atom prvku. Dopadající záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii, a tím vystoupat na vyšší energetickou hladinu. Následující příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní (nižší) energetickou hladinu a tím dojde k vyzáření (emisi) kvanta energie ve formě fotonů do prostoru. Vzniklé záření je monochromatické (přesně definované vlnovou délkou) a koherentní (fotony se pohybují ve svazku jedním směrem a jsou v jeho průřezu buď stejnoměrně, nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny).



Obrázek 2.2 Schéma zařízení pro řezání laserem [1]

Mezi výhody této metody patří:

- vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálu
- řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, ostroúhlých tvarů, výroba komplexních obrysových dílů

- pravouhlá řezná hrana
- výborná automatizace řezného procesu
- velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu
- velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm)
- vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů

Mezi nevýhody metody patří:

- vysoké investiční a provozní náklady (vysoká spotřeba plynů)
- omezení tloušťky materiálu:

konstrukční ocel:	20 (25) mm
vysokolegovaná ocel:	15 mm
hliník:	10 mm
- u středně tlustých materiálů žádná přímá hladká řezná plocha
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
- omezení stability paprsku u řezání konstrukční oceli s normálním Si a P obsahem
- snížení stability procesu u řezání lesknoucích se povrchů materiálu
- menší účinnost (CO₂ - laser max. 10 %)

2.2 Metody řezání

Řezání laserem lze rozdělit na tři metody:

- tavné dělení
- oxidační dělení
- sublimační dělení

Liší se zejména použitými plyny a způsobem odstraňování děleného materiálu v místě řezu. Každá z uvedených metod dělení je vhodná jen pro určité druhy materiálů.

2.2.1 Tavné dělení [2] [4] [5]

Dělený materiál se lokálně nataví a vzniklá tavenina se od základního materiálu odděluje proudem vysoce čistého inertního plynu, přiváděného do místa řezu (inertním plynem bývá zejména dusík). Přiváděný plyn se nepodílí na vlastním procesu řezání. Tento typ dělení materiálů dosahuje ve srovnání s ostatními metodami nižší řezné rychlosti, což je způsobeno zvoleným řezným plynem. Řezná rychlost stoupá lineárně s výkonem laseru a snižuje se přibližně lineárně s tloušťkou a teplotou řezaného materiálu. Absorbance laserového paprsku je jen velmi malá.

Tavné dělení s použitím dusíku je vhodné především k dosažení korozivzdornosti řezné hrany, jako např. u korozivzdorných ocelí, hliníku, mosazi, mědi a pozinkovaného plechu. Při použití dusíku s vysokou čistotou a s vysokým tlakem (1 - 2 MPa), jsou výsledkem řezání kovové lesklé řezné plochy, nevyžadující žádné dokončovací úpravy. V závislosti na kvalitě řezaného materiálu se mohou na spodní hraně řezu objevit otřepy, které je nutno odjehlit.

2.2.2 Oxidační dělení [2] [4] [5]

Tato metoda se od tavného řezání liší pouze použitím kyslíku jako řezného plynu. Vzájemným chemickým působením kyslíku s roztaveným povrchem kovu vzniká exotermická reakce, zajišťující vyšší řezné rychlosti z důvodu rychlejšího a vyššího ohřevu řezaného materiálu. Dále je řezná rychlost výrazně ovlivněná čistotou kyslíku. Důsledkem tohoto efektu lze dosáhnout u konstrukčních ocelí vyšších rychlostí řezu než při použití dusíku. U oxidačního dělení se využívá nižší řezný tlak než u tavného dělení, důvodem je zmíněná exotermická reakce.

Metoda je vhodná jen pro nelegované a nízkolegované oceli. U vysokolegovaných ocelí a hliníku mají vyšší řezná rychlost a teplota nepříznivý vliv na strukturu a vlastnosti řezu (horší kvalita, širší spára, vyšší drsnost a větší tepelně ovlivněná oblast). K předcházení těchto negativních vlivů se používá přechodu na pulzní provoz laseru, při kterém se dělený materiál v mezeře mezi jednotlivými pulzy ochladí, tudíž nenastává exotermní reakce nebo se využívá tavné dělení s využitím dusíku. Další vylepšení kvality je možné dosáhnout regulací výkonu laseru, který je optimalizován dle tloušťky materiálu. Řezná rychlost je pak omezena sníženým výkonem laseru.

2.2.3 Sublimační dělení [2] [4]

Metoda řezání, při níž se materiál z místa řezu odpařuje, vhodná zejména pro nekovové materiály. U kovových materiálů není tato metoda v současnosti moc využívána. K minimalizaci tavné zóny, vznikající na hraně řezu, je nutná vysoká hustota energie laserového paprsku. Omezujícím faktorem dělení je tloušťka řezaného materiálu, která nesmí překročit průměr paprsku z důvodu opětovné kondenzace par děleného materiálu a následného svaření řezu. Tato omezení platí pouze u materiálů, u nichž vzniká tekutá fáze. U materiálů, které se netaví, např. dřevo, keramika aj., zanedbáváme omezující faktor tloušťky. Řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu.

2.3 Typy laserů [1] [6]

Jak již bylo nastíněno, princip všech laserů je stejný, avšak liší se svou konstrukcí a jejími vlastnostmi. Proto lasery klasifikujeme podle různých hledisek. Mezi tato hlediska patří lasery dle:

- **aktivního prostředí** (nejpoužívanější typy laseru): pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové, plazmatické
- **vlnových délek vysílaného optického záření**: submilimetrové, infračervené, lidským okem viditelné, ultrafialové, rentgenové
- **typu kvantových přechodů (energetických hladin)**: molekulární (rotační, rotačně-vibrační, vibrační), elektronové, jaderné
- **typu excitace (buzení)**: optickým zářením, elektrickým výbojem, elektronovým svazkem, termodynamicky, chemickou reakcí, rekombinací nebo injekcí nosičů náboje
- **časového režimu provozu laseru**: impulzní, kontinuální (spojitý)
- **délky generovaného pulzu**: s dlouhými pulzy, s krátkými pulzy, s velmi krátkými pulzy (pikosekundové, nanosekundové).

Z uvedeného rozdělení se z důvodu již velké rozvinutosti prakticky téměř nemění první skupina, která je také v praxi technologicky nejrozšířenější.

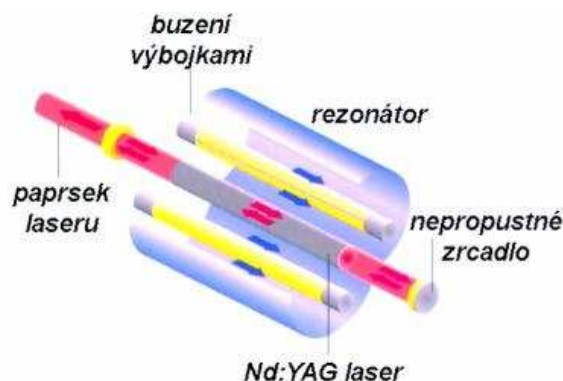
2.3.1 Pevnolátkové [1] [3] [6]

Aktivním prostředím pevnolátkových laserů je dielektrikum (krystalické nebo amorfni izolanty s příměsí vhodných iontů), jedná se proto o optickou excitaci. Materiál, určující většinu technických vlastností daného krystalu, je u pevnolátkových laserů matrice, která musí být průhledná, opticky homogenní a synteticky vyrobitelná.

Tyto lasery pracují v různých režimech a v různých provozních podmínkách, jsou stabilní a mají malé nároky na údržbu. Vlnové délky vysílaného záření náleží spektru infračerveného a viditelného světla.

Nejznámějším představitelem této skupiny je rubínový laser, jehož aktivním prostředím je krystal syntetického rubínu. Tento laser pracuje převážně v pulzním režimu a je vhodný např. pro vrtání tvrdých materiálů. Právě z rubínové tyčinky se podařilo získat první laserový paprsek červeného světla.

Nejrozšířenějším laserem je neodymový, vyzařující infračervené záření nebo zelené světlo. Jedná se zejména o typ laseru Nd:YAG (obr. 2.3). Tento laser, dosahující výkonů 100 až 4000 W, je schopen pracovat jak v pulzním, tak v kontinuálním režimu. Ve strojírenství se používá pro vrtání, svařování, řezání a žíhání.



Obrázek 2.3 Konstrukce Nd:YAG laseru [1]

2.3.2 Kapalinové [1] [3] [6]

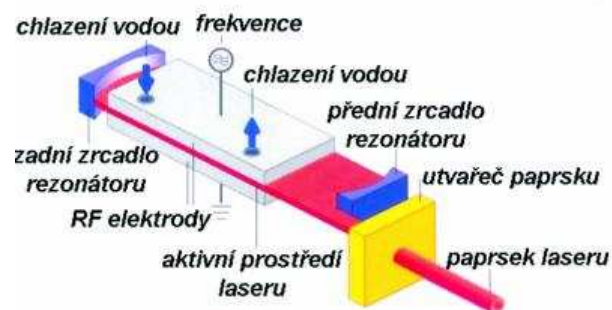
Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou opticky buzené roztoky organických barviv (např. rhodamin). Podle druhu barviva je možno prakticky vyvinout zařízení vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Tyto lasery se používají především ve spektroskopii. Ve strojírenství se neuplatňují z důvodu podstatné nevýhody, což je toxicita a nepříliš dlouhá životnost aktivního prostředí, které se rozkládá účinkem tepla a světla.

2.3.3 Plynové [1] [3] [6]

Aktivní prostředí (homogenní) je tvořeno atomy, molekulami nebo ionty různých plynů. Většina plynových laserů pracuje v širokém spektru vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. Buzení aktivního prostředí je realizováno zejména elektrickým výbojem ve zředěném plynu, chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů. Buzení optickým zářením je používáno zřídka. Nevýhodou jsou nízké výkony, ale byly vyvinuty i lasery s mimořádně vysokým výkonem pracující v pulzním provozu.

Zvláštním typem plynových laserů jsou excimerové lasery, kde aktivním prostředím jsou excimery (nestabilní molekula, která vzniká jen na proměnnou dobu důsledkem vzájemného působení vybuzeného atomu s atomem v základním stavu např. argon - krypton, krypton - fluor apod.). Jsou výkonným zdrojem ultrafialového záření. Buzení těchto laserů je realizováno elektrickým výbojem nebo svazkem rychlých elektronů. Použití excimerových laserů je při technologických aplikacích (např. při popisování součástí, vrtání).

CO₂ laser (obr. 2.4), aktivní prostředí jsou molekuly oxidu uhličitého, buzené elektrickým výbojem, který zapaluje směs plynů CO₂, N₂ a He. Vyzařuje infračervené záření. Tyto lasery se používají pro řezání, svařování, vrtání, popisování součástí, nanášení povlaků a tepelné zpracování.



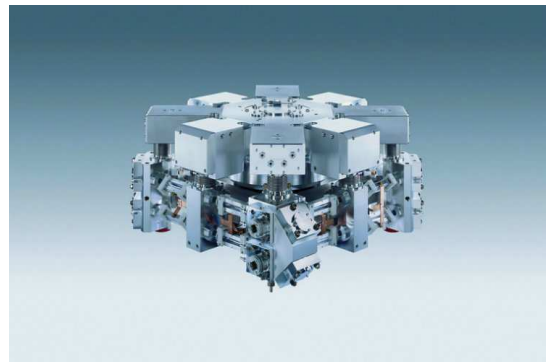
Obrázek 2.4 Konstrukce CO₂ laseru [1]

2.3.4 Polovodičové [1] [6]

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, jehož aktivními částicemi jsou nerovnovážné elektrony a volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Zdrojem záření je laserová dioda. Mezi výhody diod patří malé rozměry a velká účinnost (až 50 %), výkon lze snadno měnit modulací elektrického proudu. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a generace záření vlnových délek od 0,3 do 30 μm , která záleží na použitém aktivním prostředí. Nevýhody těchto laserů vyplývají z větší rozbíhavosti paprsku a z použitého polovodičového materiálu (závislost zejména na teplotě generovaného záření). Polovodičové lasery se uplatňují především pro popisování součástí, řezání, tepelné svařování a v technologiích Rapid Prototyping.

2.3.5 Lasery pro průmysl [7]

- **plynové CO₂ lasery** - Mezi tradiční výrobce patří i u nás známé firmy Trumpf a Rofin-Sinar. Firma Trumpf nabízí CO₂ lasery se středním výkonem 500 - 6000 W, které jsou používány většinou pro řezání ocelových plechů do tloušťky 25 mm (dosaženo i 40 mm), řezání trubek a profilů. Svou flexibilitou a snadným programováním řezu jsou vhodné i při malých a středních sériích. Při menších tloušťkách je možné řezat i hliník (do 15 mm) a mosaz (do 8 mm). Při výkonech nad 6000 W se CO₂ lasery používají zejména pro svařování v automatizované velkosériové výrobě (hloubky svaru až 20 mm). Pod hranicí výkonu 500 W se tyto lasery využívají většinou pro opracování nekovových materiálů, případně u kovů pro svařování, řezání a jiné opracování slabších profilů.



Obrázek 2.5 CO₂ laser firmy Trumpf - CO₂ laser TruFlow s vysokofrekvenčním buzením [7]

- **Pevnolátkové Nd:YAG lasery** - U pevnolátkových laserů se využívá rozsahu výkonů 200 až 2000 W zejména k řezání a svařování. V poslední době jsou tyto lasery stále častěji používány ke spékání nebo natavování materiálů v technologických procesech Laser Prototyping, Laser Tooling a Laser Manufacturing. Nižší výkony jsou vhodné pro práce v jemné mechanice a elektronice, popisování a mikroopracování. Novinkou u pevnolátkových laserů vyvíjenou v posledních letech zejména firmou Trumpf jsou i kotoučové lasery (aktivní krystal je ve tvaru tenkého kotouče o tloušťce desetin mm, obvyklé uspořádání krystalů je válečková forma).



Obrázek 2.6 Kotoučové lasery firmy Trumpf do výkonu 8 kW [7]

3 Řezání plazmou [8] [9] [10]

Plazma je tepelně vysoce žhavý elektricky vodivý plyn, tvořený ionty, elektrony, vybuzenými a neutrálními atomy a molekulami. Často je podle fyziky označována jako čtvrté skupenství.

Technologie řezání plazmou byla vyvinuta v padesátých letech 20. století, pro dělení materiálů, které není možné řezat hořlavým plynem (zejména kyslíkem). Mezi tyto materiály patří např. korozivzdorné oceli, měď a hliník. Tato technologie je označována jako oblouková z důvodu využití elektrického oblouku k ionizování plazmového plynu.



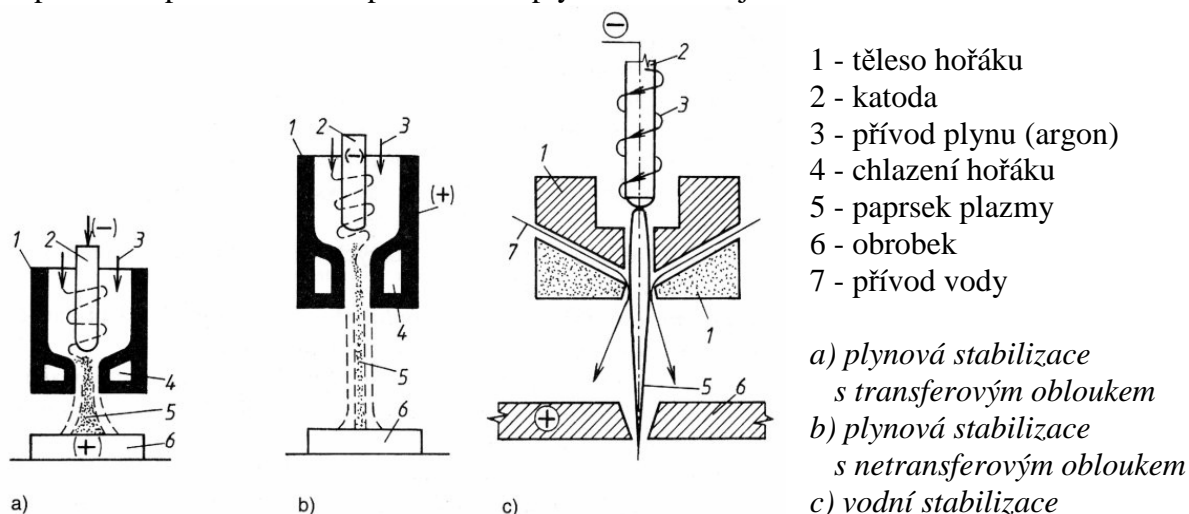
Obrázek 3.1 Řezání plazmou [10]

3.1 Princip technologie, výhody a nevýhody [8] [9] [14]

Ionizace plazmového plynu probíhá v plazmovém hořáku přívodem elektrické energie na elektrodu (katoda) oproti řezanému materiálu (anoda) a tento plyn je fokusován speciálně konstruovanou dýzou směrem k povrchu řezaného materiálu. Tímto vznikne mezi hořákem a řezaným materiálem plazmový elektrický oblouk o velmi vysoké teplotě (cca 20000 - 30000°C), a velmi silném dynamickém účinku, který je využíván k natavení a odvedení materiálu z řezné spáry.

Ke zvýšení koncentrace energie plazmového oblouku jsou používány chlazené plazmové hořáky, umožňující přívod fokusačního a ochranného (asistentního) plynu, případně vody. Zvýšení koncentrace energie má za následek výrazné zvýšení výkonu. Asistentní plyn obklopuje plazmový elektrický oblouk, čímž chrání vytvářené řezné hrany před působením okolní atmosféry. Odvedení taveniny a oxidů z místa řezu probíhá vyfukováním plazmového plynu.

Využitím vysokého výkonu plazmatu a vysoké dosahované teploty lze touto technologií řezat téměř všechny kovové materiály. Omezujícím faktorem řezání je tloušťka materiálu, což je způsobeno poklesem tlaku plazmového plynu se vzrůstající tloušťkou materiálu.



Obrázek 3.2 Plazmové hořáky se stabilizací

Mezi výhody této metody lze zahrnout:

- možnost provozu jednoho nebo více hořáků podle velikosti výrobní série
- vynikající výsledky řezu zejména při řezání slabých a středních tloušťek konstrukční oceli (do 30 mm)
- řezání elektricky vodivých materiálů
- možnost řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem
- vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než při řezání plamenem)
- velmi dobrá automatizace řezného procesu
- zlepšení pracovního prostředí při řezání pod vodou (snížení úrovně hluku, intenzivního UV záření, zvýšené prašnost)

Za nevýhody považujeme:

- omezené použití do 160 mm (180 mm) u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou
- širší řezná spára oproti řezání laserem



Obrázek 3.3 Příklady výrobků - řezání plazmou [11]

3.2 Používané plyny [8] [9]

U plazmových technologií se používá několik druhů plynů. Jednotlivé druhy plynů mají vliv na vznik a vlastnosti plazmatu a dále na vlastnosti vytvářeného řezu.

- **plazmové plyny** (slouží k ionizaci a disociaci energie) - argon, vodík, dusík a jejich směsi, dále je možné použít kyslík i vzduch
- **fokusační plyny** (slouží k zaostření paprsku plazmy) - argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popř. argonu a dusíku
- **asistentní plyny** (obklopují paprsek plazmatu a chrání místo řezu před nežádoucím chemickým působením s okolní atmosférou) - většinou stejné plyny jako plazmové, používanější z nich jsou argon a dusík

Správná volba plazmového a asistentního plynu závisí na druhu řezaného materiálu a na jeho tloušťce. Pro určité typy materiálů jsou vhodné tyto plazmové plyny:

- konstrukční ocel: kyslík, vzduch
- vysoce legovaná ocel: argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík
- neželezné kovy: argon/vodík, vzduch
- kompozitní materiály: argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík.

3.3 Technologická zařízení [9] [12]

V současnosti se řezání plazmou provádí zejména na CNC zařízeních. Na trhu jsou k dostání i přemístitelné plazmové zdroje, které jsou dodávány včetně plazmového hořáku, ale

jejich výkon a řízení není srovnatelný s moderními CNC dělicími stoly. Malé plazmové zdroje se používají k dělení menších součástí bez požadavku větší přesnosti řezu, značnou výhodou těchto zařízení je jejich mobilita a mnohonásobně nižší cena ve srovnání s CNC zařízeními.

Mezi nejznámější výrobce plazmových CNC dělicích zařízení patří německá firma MicroStep Group, jejíž pracovní stoly mají velký rozsah použití, dle rozměrů pracovní plochy (šířka se pohybuje od 1500 do 5000 mm a délka od 2000 do 30000 mm). Jako plazmového plynu se používá zejména kyslíku. Nejvýkonnější stroje této firmy jsou schopny dělit materiály až o tloušťce 300 mm a je možné použít zároveň až osm plazmových hořáků (dle typu stroje). Ovšem i s těmito parametry se dosahuje velmi vysoké kvality řezu (přesnost a dobrá dynamika řezu).



typ EasyCut



typ SPL

Obrázek 3.4 Plazmové CNC dělicí stroje firmy MicroStep Group [12]

Každé technologické zařízení pracující s plazmatem tvoří:

- plazmový hořák
- zdroj elektrického proudu
- řídicí jednotka
- manipulační zařízení, tj. souřadnicový pracovní stůl, manipulátor nebo robot

Důležitým parametrem plazmového hořáku je stabilizace elektrického oblouku, kterou lze rozdělit na dva druhy:

- a) plynová stabilizace
- b) vodní stabilizace

3.3.1 Plynová stabilizace plazmového hořáku [8] [9]

Tato metoda je založena na volbě vhodného fokusačního plynu. U plynové stabilizace hovoříme o plazmových hořácích s transferovým obloukem a s netransferovým obloukem.

V případě transferového oblouku hoří elektrický oblouk mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku (katoda) a obráběným materiálem (anoda). Tento typ hořáku se využívá pro opracování elektricky vodivých materiálů, například pro řezání ocelí a neželezných kovů.

Jinak je tomu u netransferového oblouku, kde elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou (katoda) a výstupní tryskou (anoda) a používá se pro obrábění elektricky nevodivých materiálů (např. keramiky) a k nanášení povlaků.

3.3.2 Vodní stabilizace plazmového hořáku [8] [9]

Řezací tryska plazmového hořáku s vodní stabilizací je doplněna o přídavné kanálky, jimiž je přiváděna voda do plazmového hořáku. Tyto hořáky jsou vhodné pro řezání ocelí a neželezných kovů a k nanášení povlaků. Již uvedenou výhodou je řezání pod vodní hladinou, která zlepšuje pracovní podmínky.

4 Řezání vodním paprskem [15] [16]

Technologie spočívající ve využití vysokotlakého vodního nebo hydroabrazivního paprsku k dělení materiálu. Technologie byla vyvinuta americkou firmou Flow International Corporation na přelomu 70. a 80. let 20. století pro vojenské a kosmické účely. V polovině 80. let 20. století byla již zaváděna do různých odvětví průmyslu. V současnosti je tato technologie plně automatizována a zaváděna do všech odvětví průmyslu po celém světě.



Obrázek 4.1 Řezání vodním paprskem s přívodem abraziva [15]

4.1 Princip technologie, výhody a nevýhody [13] [14] [15]

Technologie řezání vodním paprskem využívá vysokého pracovního tlaku vody, který se pohybuje v rozmezí 500 - 4150 bar (50 - 415 MPa). Zdrojem takto vysokých tlaků jsou speciální vysokotlaká čerpadla, lišící se příkonem (11 - 150 kW) a průtokem vody (1,2 - 5,2 l.min⁻¹). Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené tryskou. Pro řezání měkkých materiálů (např. plasty, dřevo, guma, korek, těsnění, aj.) se používá čistý vodní paprsek o tloušťce zhruba 0,15 - 0,30 mm. Alternativou pro řezání tvrdých materiálů je použití hydroabrazivního paprsku o tloušťce cca 0,8 - 1,5 mm s příměsí brusného prášku (přírodní olivín nebo granát - vhodné abrazivo se volí dle tvrdosti řezaného materiálu).

Vodní paprsek je možné využít pro dělení nejrůznějších materiálů, např. ocelí (konstrukčních, legovaných, tepelně zpracovaných, s extrémní tvrdostí apod.), slitin (hliníku, titanu, mědi, niklu apod.), sklolaminátu, kompozitů, plastů, mramoru, žuly, skla, těsnících a pěnových materiálů, dřeva aj.

Mezi výhody metody patří:

- řezání kovových, nekovových a kompozitních materiálů; velmi tvrdých a těžko opracovatelných materiálů a velkých tloušťek
- žádné metalurgické změny na řezné ploše (max. ohřev materiálu na teplotu 40 - 50°C)
- zachování povrchové úpravy - leštění, broušení, komaxit
- možnost náhrady souboru operací (dělení, vrtání, frézování) jediným technologickým procesem
- u kvalitnějších stupňů řezu většinou není nutné již žádné další opracování
- úzká řezná spára, vertikální řezání, možnost řezat velice detailní kontury, vynikající kvalita řezu
- dobrá automatizace řezného procesu
- podle druhu zařízení také provoz s více řezacími hlavami
- u materiálů větších tloušťek lze klást dílce těsně vedle sebe, což přináší úsporu materiálu, lze využít i tzv. společný řez
- řezání bez vzniku ekologicky škodlivých zplodin, technologie šetrná k životnímu prostředí

Nevýhodami metody jsou:

- vysoké investiční a provozní náklady (ve srovnání s plazmou: provozní náklady 1:5 až 1:20 podle materiálu a tloušťky)
- relativně malá řezná rychlost u tvrdých materiálů
- nevyhnutelný kontakt s vodou a většinou i s abrazivním materiálem (bez okamžitého vhodného ošetření rychlý nástup povrchové koroze, u nasákových materiálů delší vysoušení, možnost změny barvy, znečištění apod.)
- nemožnost použití pro ruční řezání a jen omezeně v 3D prostoru
- omezená možnost výroby velmi malých dílců (cca pod 30 - 50 mm); možno řešit můstky



Obrázek 4.2 Příklady výrobků - ocel tloušťky 60 mm, - hliník tloušťky 150 mm [17]

4.2 Automatizované dělení materiálu a dělicí stroje [13]

Řezný proces vodního paprsku se v dnešním průmyslu realizuje pouze na automatizovaných zařízeních (CNC stolech). Řezací hlava a tudíž i celá dráha řezu je řízena počítačem dle předem vytvořeného programu, což umožňuje provádět i tvarově složité řezy během jedné operace se standardní přesností výřezu pohybující se $\pm 0,1 \text{ mm.m}^{-1}$. Po provedení řezného procesu se směs vody a abraziva zachycuje v lapači (vaně), umístěné pod řezaným materiálem, kde je tato směs odfiltrována a znovu připravena k použití.

Dělicí stroje a přídatná zařízení [13] [18] [19]

CNC stůl - portálový CNC řezací stůl AquaCut vyvinutý speciálně na řezání vysokotlakým vodním paprskem je vybavený přesnou mechanickou konstrukcí, kvalitním řídicím systémem s jednoduchou obsluhou a špičkovou technologií, což zaručuje vysokou kvalitu a přesnost řezu (ostré úhly a rohy, přesné zachování kontur řezaných dílů). Vysoká dynamika zařízení je dosažena pomocí nízko osazeného portálu, digitálně řízených stejnosměrných servomotorů s bezvůlovou převodovkou a precizními nerezovými lineárními vedeními.



Obrázek 4.3 CNC stůl AquaCut firmy MicroStep Group pro řezání vodním paprskem [13]

Dálková doprava abraziva - volitelným příslušenstvím pro aplikace hydroabrazivního řezání mohou být CNC stroje vybaveny dálkovou dopravou abraziva, jež je ze zásobníku vytlačováno stlačeným vzduchem do rozvodového potrubí, kterým se dopravuje do malého zásobníku u dávkovače abraziva umístěného na suportu CNC stroje v blízkosti řezací hlavy. Výhodou tohoto řešení je plynulé dodávání abraziva do dávkovače, čímž je zaručen plynulý tok abraziva do směšovací trysky a tím i stálá kvalita řezu.

Vysokotlaká čerpadla - vysokotlaká čerpadla od firmy Accustream řady AS disponují výkony 22 - 110 kW. Volba čerpadla je důležitá pro zajištění optimálního řezného procesu. Ideálním řešením pro aplikace řezacích strojů se 2 abrazivními řezacími hlavami je čerpadlo o výkonu 56 kW od firmy Accustream (viz obrázek 4.4).



Obrázek 4.4 Vysokotlaké čerpadlo Accustream AS-6075 [13]

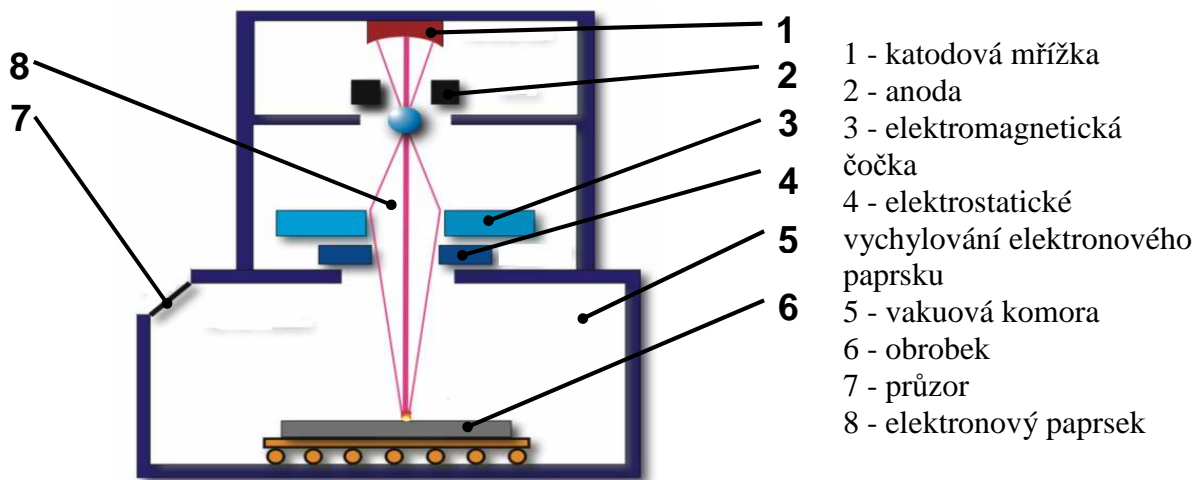
Řezací hlava - úkolem nové řezací hlavy PASER ECL Plus firmy Flow Europe GmbH (viz obrázek 4.5) je dosažení optimálního řezacího výkonu - nejrychlejší řezání při nejnižších provozních nákladech, a to díky optimálně zaostřenému a zohniskovanému paprsku. Výsledkem jsou vyšší řezná rychlost a vyšší výkon.



Obrázek 4.5 Řezací hlava firmy Flow Europe GmbH pro hydroabrazivní řezání [19]

5 Řezání paprskem elektronů [20]

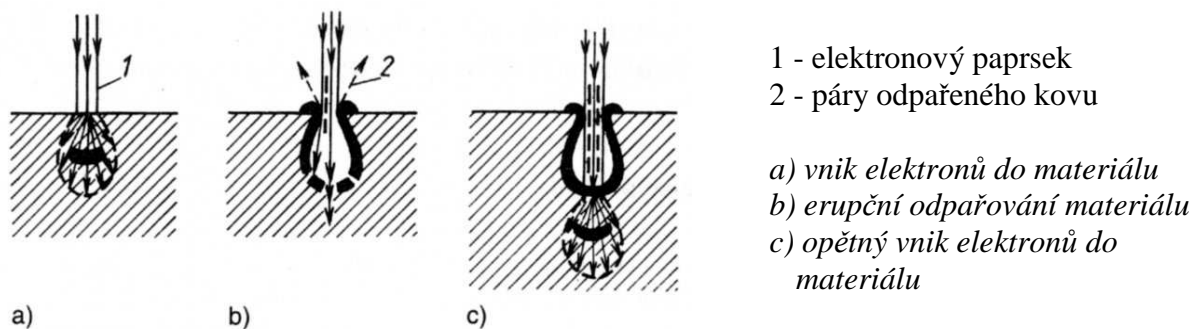
Elektroerozivní metoda dělení materiálu využívající kinetické energie svazku velmi zrychlených elektronů, usměrněného na povrch materiálu. V současnosti je spíše využívána ke svařování nebo k povrchovým úpravám součástí (např. leštění). U aplikace dělení materiálu není tak rozvinutá jako předešlé metody a je nahrazována spíše laserem. Tyto dvě metody jsou si velmi podobné, ale výrazným rozdílem a tudíž i nevýhodou řezání paprskem elektronů je nutnost vakuové komory, což omezuje velikost řezaných součástí.



Obrázek 5.1 Schéma zařízení pro obrábění paprskem elektronů [22]

5.1 Princip technologie, výhody a nevýhody [20] [21] [22]

Při dopadu paprsku elektronů, jež jsou urychleny na (50 ÷ 80) % rychlosti světla, na povrch materiálu se jejich kinetická energie mění na tepelnou, čímž je dělený materiál natavován a následně se odpařuje z místa řezu (viz obrázek 5.2). Paprsek vniká jen do určité hloubky materiálu, kde se pohyb elektronů zcela zastaví. Koncentrovaná tepelná energie vzniklá pod povrchem obrobku způsobuje erupční odpařování materiálu, což má za následek odvádění částic z otvoru vysokým tlakem. Vzniklé páry odpařeného materiálu jsou zionizovány, což způsobí nové zaostření paprsku v pracovním místě. K úběru materiálu dochází několikanásobným opakováním tohoto procesu. Celý proces je nutné provádět ve vakuu z důvodu ochrany elektronů před srážkami a reakcemi s molekulami vzduchu (snížení energie paprsku - viz obrázek 5.3).



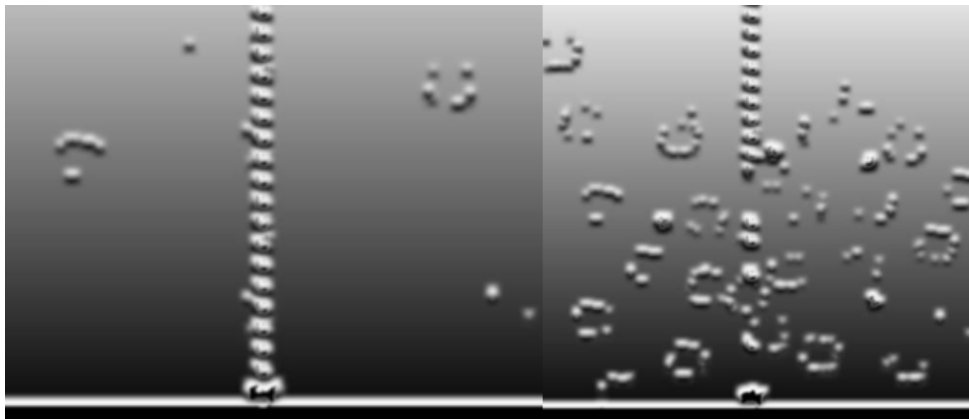
Obrázek 5.2 Princip metody obrábění elektronovým paprskem [20]

Řezání paprskem elektronů může probíhat ve dvou pracovních režimech:

- pulzní - nejčastěji používáno při vrtání elektronovým paprskem. Odpařování materiálu probíhá postupnými erupcemi, přičemž se dosahuje přesného opracování materiálu (doba pulzu je od 2 μ s do 0,01 s, při frekvenci pulzů 500 až 10000 Hz)
- kontinuální (nepřetržitý) - odpařování materiálu probíhá plynule

Z technologického hlediska lze elektronový paprsek použít pro:

- termické procesy - svařování, pájení, vrtání dlouhých děr malých průměrů, řezání a tepelné zpracování materiálů;
- netermické procesy - využití paprsku elektronů k vyvolání chemické reakce, které se využívá v elektrotechnice při výrobě čipů - litografická technologie. Tato metoda umožňuje vytvořit na čipu až 200000 strukturálních detailů, čehož nelze jinými technologiemi dosáhnout



Obrázek 5.3 Elektronový paprsek pohybující se - ve vakuu, - ve vzduchu [22]

Mezi výhody patří:

- rychlý a velmi přesný způsob dělení materiálu
- možnost řezání mnoha druhů materiálů různých tloušťek (omezujícími faktory nejsou ani tvrdost, houževnatost, elektrická vodivost a bod tavení)
- obrábění těžkoobrobitelných materiálů (žárpevných a austenitických ocelí, slitin zinku s niobem, hliníkových a titanových slitin, křemíku, drahokamů, tantalu, wolframu a speciálních slitin používaných v letectví a kosmonautice)
- velmi výhodné pro malosériovou výrobu
- jednotný postup - možnost využití dělicího zařízení i ke svařování a k jiným technologickým operacím - snížení nákladů a výrobních časů
- vrtání děr velmi malých průměrů v rozmezí 0,015 - 1 mm

Mezi nevýhody lze zařadit:

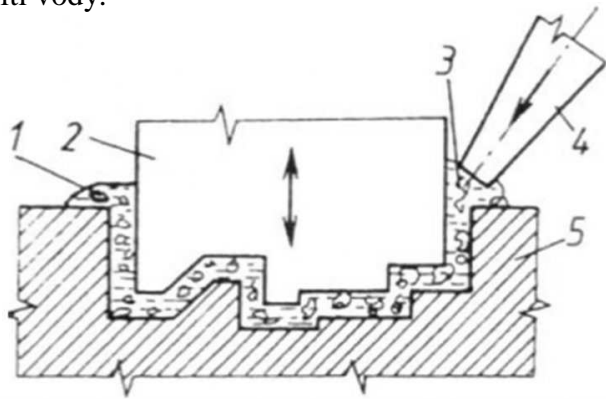
- nutnost vakuových komor - menší rozměry polotovarů
- velmi nákladné, pokud není požadovaná velká přesnost výroby
- laserové řezání je téměř stejně účinné a cenově výhodnější - nahrazování této technologie
- velká spotřeba energie a velmi drahé dělicí stroje
- touto metodou jsou hůře obrobitelné mosaz, bronz, zinek, hořčík a slinované kovy
- obrobek musí být podložen dalším materiálem z důvodu styku paprsku elektronů s podkladovým materiálem (erupční vypařování by mohlo poškodit dělicí stroj)

6 Řezání ultrazvukem [21] [24] [25]

Metoda dělení, popřípadě obrábění materiálu tvrdých a křehkých kovových a nekovových materiálů založena na mechanickém úběru materiálu, využívající ultrazvukových vibrací nástroje, přiváděných zrn abrazivního materiálu a kavitační eroze. Metoda nevyužívá k dělení termální, chemické ani elektrické účinky, což neovlivňuje metalurgické, chemické a fyzikální vlastnosti děleného materiálu. Obrábění ultrazvukem je aplikováno ve dvou variantách - nárazové broušení a rotační obrábění.

6.1 Princip technologie, výhody a nevýhody [21] [24] [25]

Proces úběru materiálu je realizován přívodem směsi zrn abrazivního materiálu a kapaliny mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá frekvencí 20 až 30 kHz kolmo k obráběnému povrchu. Zrna získávají kmitáním nástroje velkou kinetickou energii a jejich přitlačováním stálou silou na obráběný povrch dochází k porušování celistvosti povrchu (obrázek 6.1). Kavitační účinky umožňují rychlou výměnu opotřebených zrn za nová. Nástroj je schopen vykonávat i přímočarý posuvný pohyb nebo kombinaci obou pohybů. Kapalina ve směsi se zrnou bývá většinou voda, benzín nebo petrolej, ovšem nejlepších výsledků se dosahuje při použití vody.



- 1 - kapalina
- 2 - nástroj
- 3 - brousící zrna
- 4 - přívod brousících zrn a kapaliny
- 5 - obrobek

Obrázek 6.1 Princip metody pro obrábění ultrazvukem [24]

Mezi výhody této metody patří:

- řezání tvrdých a křehkých kovových, nekovových a kompozitních materiálů (keramika, slinuté karbidy, křemen, atd.)
- větší úběr materiálu, menší tlaky nástroje na jemné součásti
- lze obrábět elektricky vodivé i nevodivé materiály
- žádné metalurgické změny na řezné ploše
- při řezání je zároveň vybroušena povrchová vrstva (záleží na typu abraziva)
- úzká řezná spára (tloušťka řezného nástroje je 0,1 až 0,8 mm)
- automatizace řezného procesu
- dálková doprava směsi kapaliny a abraziva

Mezi nevýhody metody patří:

- plastické, měkké a houževnaté materiály jsou ultrazvukem neobrobitelné (lepí se na nástroj a snižují jeho řezivost)
- po řezání musí být výrobek očištěn od směsi kapaliny a abraziva, popřípadě povrchově chemicky ošetřen (např. lakováním nebo barvením), důvodem je možnost rychlého vzniku povrchové koroze u určitých typů materiálů
- delší vysoušení u nasákových materiálů
- řezný nástroj musí být vyroben z korozivzdorného materiálu

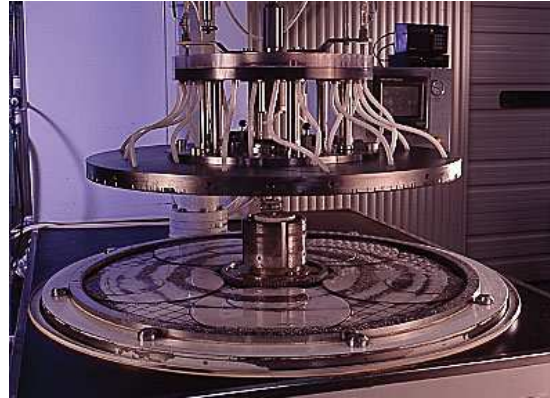


Obrázek 6.2 Příklady výrobků - obrábění ultrazvukem [24]

6.2 Technologická zařízení [21] [24] [26]

Jak již bylo zmíněno v úvodu, ultrazvuk lze použít dvěma variantami k obrábění a to k nárazovému broušení a k rotačnímu obrábění.

- a) **ultrazvukové nárazové broušení** - metoda je založena na řízeném rozrušování obráběného materiálu účinkem abrazivních zrn mezi obrobkem a kmitajícím nástrojem o ultrazvukové frekvenci (rozsah 20 až 30 kHz, amplituda kmitání 25 až 90 μm). K úběru materiálu se využívá směs kapaliny (většinou voda) a abrazivního brusiva (karbid bóru, karbid křemíku, aj.). Nástroje pro nárazové broušení jsou vyrobeny většinou z korozivzdorné oceli. Touto metodou lze obrábět velmi tvrdé materiály (např. slinuté karbidy, aj.)



Obrázek 6.3 Obráběcí stroj pro broušení a leštění [25]

- b) **rotační obrábění** - metoda podobná vrtání diamantovým vrtákem, s tím rozdílem, že rotující vrták je rozechvíván ultrazvukovými vibracemi (frekvence kolem 20 kHz). Na rozdíl od nárazového broušení se nepřivádí mezi obrobek a řezný nástroj abrazivum (pouze chladicí kapalina), tudíž nástroj řezá sám obráběný materiál. Značnou výhodou metody oproti tradičnímu vrtání je, že se snižuje tření a brání zadírání nástroje s obráběným materiálem. Tyto výhody zvyšují řeznou rychlost vrtání. Metoda uplatňující se při opracování nekovových materiálů (např. kompozity, aj.)



Obrázek 6.4 Obráběcí stroj firmy Sonic - Mill pro rotační obrábění [26]

7 Závěr

Cílem této práce bylo popsat a porovnat jednotlivé nekonvenční metody dle vhodnosti použití.

Z hlediska vhodnosti použití metod pro určité typy výrob (malosériová či velkosériová) jsou v praxi nejvíce využívány laser a plazma. Velký rozsah jejich využití vyplývá z rozsáhlých technologických aplikací (neslouží jen k dělení materiálu), mezi něž patří např. svařování, obrábění, atd. Uvedené metody jsou uplatňovány hlavně ve velkosériové výrobě z důvodu velikosti a vysoké pořizovací ceny technologických zařízení, ale použitelné jsou i v malosériové výrobě.

Vodní paprsek a ultrazvuk se aplikují v širším spektru při dělení a obrábění materiálů. Jsou vhodné pro malosériovou i velkosériovou výrobu (dle technologického zařízení). K prodražení výroby dochází v důsledku vyšších požadavků na nástroj a chemické náchylnosti obráběného materiálu. Oproti laseru a plazmě se tyto metody využívají při technologických aplikacích, kde je požadována metalurgická neovlivnitelnost materiálu.

Nejméně využívanou metodou je řezání paprskem elektronů, zejména při malosériové výrobě nebo dokonce kusové výrobě (dalším použitím je např. svařování a pájení). Malé využití vychází z principu technologie a ekonomické náročnosti (vysoké požadavky na energii a na dělicí stroje).

Z hlediska vhodnosti použití jednotlivých metod pro různé typy materiálů (např. oceli, kompozity, hliník, aj.) je použití vyjádřeno v následujícím srovnání.

Řezání laserem je vhodné pro menší tloušťky materiálů např. konstrukčních a legovaných ocelí, hliníku, kompozitů. Laserem je vhodné dělit i měkké materiály, např. umělé hmoty, bronz a mnoho dalších.

Plazma je aplikována téměř pro stejné materiály jako laser, ale je možno řezat materiály větších tloušťek. Oproti laseru nelze technologií dělit elektricky nevodivé materiály (jen v případě plazmového hořáku se stabilizací).

Technologie vodního paprsku nachází uplatnění při řezání velkých tloušťek materiálů. Metoda je vhodná pro široké spektrum materiálů (např. dřevo, kovy, plasty, keramika, atd.).

Řezání, popř. obrábění paprskem elektronů se využívá u těžkoobrobitelných materiálů různých tloušťek s vysokou tvrdostí a pevností (žáropevné a austenitické oceli, titanové a wolframové slitiny, atd.). Technologie není příliš vhodná např. pro mosaz, bronz, zinek a slinované kovy.

Poslední z uvedených technologií je řezání ultrazvukem, které je používáno pro tvrdé a křehké kovové, nekovové a kompozitní materiály. Pro plastické, měkké a houževnaté materiály je ultrazvuk nepoužitelný.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění - 4. díl : Obrábění paprskem fotonů - laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, roč. 2008, č. 3 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>>. ISSN 1212-2572.
- [2] ZATLOUKAL, Petr. *Laserové dělení materiálu* [online]. 2007 , 10. 5. 2007 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>.
- [3] *Laser* [online]. 2005 , 6. 3. 2009 [cit. 2009-03-20]. Český. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
- [4] *Laserové technologie : Řezání laserem* [online]. c2008 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_lascut>.
- [5] *Laserové technologie : Plyny pro řezání laserem* [online]. c2008 [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_laser2>.
- [6] *Jak funguje laser : Typy laserů* [online]. c2009 [cit. 2009-03-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>>.
- [7] ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, roč. 2008, č. 7 [cit. 2009-03-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>>. ISSN 1212-2572.
- [8] *Obloukové technologie : Řezání plazmou* [online]. c2008 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_licht5>.
- [9] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění - 8. díl : Obrábění paprskem iontů - plazmatem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, roč. 2008, č. 10 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>>. ISSN 1212-2572.
- [10] *Co je řezání plazmou?* [online]. c2008 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.plazmacz.cz/index.html>>.
- [11] *Geometric Shapes products* [online]. c2004 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.plasmacam.com/geometric.php>>.
- [12] AWAC s.r.o. : *Systémy dělení materiálu - Plazma - kyslík* [online]. [2009] [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=11&m4=0>>.
- [13] BOUDA, Luděk . Řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, roč. 2008, č. 7 [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem>>. ISSN 1212-2572.
- [14] *Všeobecné přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení* [online]. c2008 [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: < <http://www.plazmacz.cz/prednosti.htm> >.
- [15] CHPS s.r.o. : *Vodní paprsek - Technologie* [online]. c2009 [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie.html>>.

- [16] *Flow Europe GmbH - Vodní paprsek : Historie Technologie* [online]. [2004] [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.floweurope.com/cz/history.php>>.
- [17] *CHPS s.r.o. : Vodní paprsek - Příklady vhodných a nevhodných aplikací vodního paprsku* [online]. c2009 [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/priklady-aplikaci.html>>.
- [18] *AWAC s.r.o. : Systémy dělení materiálu - Vodní paprsek* [online]. [2009] [cit. 2009-04-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=10&m4=0>>.
- [19] *Flow Europe GmbH - Vodní paprsek : řezací hlava PASER ECL Plus* [online]. [2004] [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.floweurope.com/cz/products/paserecl.php>>.
- [20] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl : Obrábění paprskem elektronů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, roč. 2008, č. 6 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2>>. ISSN 1212-2572.
- [21] KOČMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2005. 272 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [22] *Electron Beam Machining* [online]. [2005] [cit. 2009-04-20]. Anglický. Dostupný z WWW: <http://www.engr.ku.edu/~rhale/ae510/websites_f03/ebeam/index.htm>.
- [23] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění : Úvod. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, roč. 2007, č. 7 [cit. 2009-04-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>. ISSN 1212-2572.
- [24] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění - 3. díl : Obrábění ultrazvukem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, roč. 2007, č. 12 [cit. 2009-04-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil>>. ISSN 1212-2572.
- [25] *Bullen Ultrasonics, Inc. : Capabilities - Ultrasonic Machining* [online]. c2003 [cit. 2009-04-27]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.bullen-ultrasonics.com/UltraMachine.html>>.
- [26] *Sonic - Mill : Machining the unmachinable : Stationary Processing Equipment* [online]. [2008] [cit. 2009-04-27]. Anglický. Dostupný z WWW: <<http://www.sonicmill.com/ultrasonic.html>>.
- [27] *ISCAR : Soustružení* [online]. c2009 [cit. 2009-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.iscar.cz/ProductLines/ProductLineHeader.asp/ProductLineHeaderID/37/CountryID/6/MenuItemID3/294>>.

Seznam použitých zkratek

Označení	Legenda
3D prostor	trojdimenzionální prostor
anoda	kladná elektroda
CNC	z anglického Computer Numerical Control - numericky řízené počítačem
CO ₂	oxid uhličitý
Er	chemický prvek erbium
foton	elementární částice světla
He	chemický prvek helium
katoda	záporná elektroda
komaxit	prášková barva založená na bázi polyesteru, polyesterových a epoxidových pryskyřic
LASER	z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - zesilování světla stimulovanou emisí záření
Manufacturing	z angličtiny - výroba
N ₂	dvouatomová molekula dusíku
Nd	chemický prvek neodym
O ₂	dvouatomová molekula kyslíku
P	chemický prvek fosfor
Prototyping	z angličtiny - prototypování
Si	chemický prvek křemík
Tooling	z angličtiny - nástrojařství
UV záření	z anglického ultraviolet – ultrafialové záření
vakuum	vzduchoprázdno
YAG	krystal yttriumaluminumgranát