



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ UNCONVENTIONAL METHODS OF MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MATÚŠ HANUSKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. KAREL OSIČKA, PH.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Matúš Hanuska

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

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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 metody obrábění

v anglickém jazyce:

Unconventional Methods of Machining

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerže nekonvenčních technologií obrábění se zaměřením na využití ve stávajících podmínkách průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Úvod

Základní princip jednotlivých nekonvenčních metod.

Technologické možnosti nekonvenčních metod a jejich stávající využití v průmyslu.

Provozní náročnost nekonvenčních metod.

Ekologické posouzení nekonvenčních metod.

Závěr

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., Delenie kovových materiálů okružnou pilou, vodním proudem a plazmovým oblúkom, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6
5. BENKO, B., FODEREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R.I. Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
6. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.10.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá podrobným rozborom nekonvenčných technológií obrábania. V prvej časti je spracovaná charakteristika a základný princíp jednotlivých nekonvenčných metód. V druhej časti sú analyzované technologické možnosti využitia metód v súčasnom priemysle. Tretia časť sa zaoberá posúdením prevádzkovej náročnosti. V štvrtej časti je analyzovaný ekologický aspekt metód, ich environmentálny dopad na okolie a možnosti recyklácie použitých abrazív.

Kľúčové slová

Nekonvenčné metódy obrábania, obrábanie laserom, vodný paprsok, obrábanie lúčom plazmy, ekologický aspekt.

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with detailed analysis of unconventional methods machining technology. In the first part, characteristics and basic principle of each method are elaborated. In the second part, actual industry employment is analyzed. Third part deals with operational obstacles. In the fourth part, ecological aspect, enviromental impact on their surrioundings and possibility of recycling of abrasives are analyzed.

Key words

Unconventional methods of machining, laser beam machining, water jet, plasma beam machining, ecological aspect

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HANUSKA, M. Nekonvenční metody obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Osička, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Nekonvenčné metódy obrábania vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum :

.....

Matúš Hanuska

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Karlovi Osičkovi Ph.D. za cenné pripomienky, odbornú pomoc a rady pri vypracovaní bakalárskej práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prehlásenie	5
Poďakovanie.....	6
Obsah	7
ÚVOD	9
1 PREHLAD PARAMETROV A ROZDELENIE METÓD.....	10
1.1 Princíp obrábania lúčom laseru	12
1.2 Princíp a charakteristika obrábania lúčom plazmy.....	13
1.3 Princíp a charakteristika elektroerozívneho obrábania	14
1.4 Princíp a charakteristika elektrochemického obrábania.....	15
1.5 Princíp a charakteristika chemického obrábania	16
1.6 Princíp a charakteristika fotochemického obrábania	17
1.7 Princíp a charakteristika obrábania ultrazvukom	17
1.8 Princíp a charakteristika obrábania vodným paprskom	18
1.9 Princíp a charakteristika obrábania abrazívnym vodným paprskom.....	18
2 Technologické možnosti jednotlivých metód a ich súčasné využitie v priemysle	20
2.1 Možnosti a využitie obrábania LASERom.....	20
2.2 Vývoj LBM	22
2.3 Možnosti a využitie obrábania plazmou.....	23
2.4 Možnosti a využitie elektroerozívneho obrábania.....	24
2.5 EDM hĺbenie dutín a tvarových otvorov	24
2.5.1 EDM drôtové rezanie.....	25
2.5.2 EDM mikrodierovanie	25
2.6 Možnosti a využitie elektrochemického obrábania.....	26
2.7 Možnosti a využitie fotochemického a chemického obrábania	27
2.8 Možnosti a využitie obrábania ultrazvukom	28
2.9 Možnosti a využitie obrábania abrazívnym lúčom vody.....	29
2.9.1 Sústruženie pomocou vodného lúča	29
2.9.2 Frézovanie a vŕtanie pomocou vodného lúča.....	30
3 Prevádzková náročnosť nekonvenčných metód	31
3.1 Prevádzková náročnosť LBM	31

3.2	Prevádzková náročnosť AWJ	31
3.3	Prevádzková náročnosť EDM	32
3.4	Prevádzková náročnosť CHM	32
4	Ekologické posúdenie nekonvenčných metód	33
4.1	Ekológia u technológie WJM	33
4.2	Environmentálna náročnosť u EDM	34
4.3	Ekologická náročnosť u LBM	35
4.4	Ekologická náročnosť u PBM	35
4.5	Ekológia chemického obrábania	36
4.6	Ekológia obrábania ultrazvukom	36
	Záver	37
	Zoznam použitých zdrojov	38
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	41

ÚVOD

V priebehu evolúcie ľudstva boli častokrát vynájdené nové druhy materiálov, ktoré vďaka svojim vlastnostiam umožňovali napredovanie vývinu technológií. Tieto materiály však boli často ťažko hospodárne obrobiteľné, čo viedlo k vzniku nových nekonvenčných výrobných procesov. Ubrať materiál je dnes možné pomocou elektrochemickej reakcie, kvapaliny, plazmy, laseru a ďalších fyzikálnych činiteľov, ktoré nepôsobia na materiál silou a obrábajú ho bez vzniku triesok. Technologické možnosti nekonvenčných metód sú veľmi široké pretože nie sú ovplyvnené tvrdosťou, húževnatosťou alebo krehkosťou materiálu a umožňujú produkovať akýkoľvek zložitý tvar obrobku.

Tieto metódy sú čoraz častejšie využívané v priemyselnej výrobe vďaka možnosti zavedenia plnej automatizácie a mechanizácie, vďaka možnosti výroby zložitých tvarov, miniaturizácie, vysokej presnosti pri výrobe ktoré nieje ľahké doceliť konvenčnými technológiami. Mnohokrát je táto výroba pre svoju vyššiu produktivitu ekonomickejšia pri porovnaní s použitím konvenčných technológií výroby, aj napriek značne zvýšeným energetickým nákladom. Veľmi často sa v súčasnosti využívajú na delenie materiálu.

Pri prevádzke sú však nekonvenčné metódy enviromentálne náročnejšie, vznikajú nečistoty a zlúčeniny ako aerosoly, rôzne prachy, UV žiarenie a neprimeraný hluk. Preto sa snažíme tieto aspekty minimalizovať na primeranú hodnotu a musíme poznať ich presný účinok na prírodu a ľudský organizmus.

Táto práca sa zaoberá prieskumom súčasných technologických možností jednotlivých nekonvenčných technológií, ich prevádzkovou náročnosťou a enviromentálno- ekologickým aspektom

1 PREHL'AD PARAMETROV A ROZDELENIE METÓD

Nekonvenčné metódy sú charakterizované širokým rozsahom parametrov či už z hľadiska podmienok, tak i z hľadiska výstupu príslušných procesov. K týmto charakteristikám patrí:²

- rýchlosť, možnosti a výkonnosť obrábania nezávisí na mechanických vlastnostiach obrábaného materiálu,
- materiál nástroja nemusí byť tvrdší, než obrábaný materiál,
- možnosť vykonávať zložité technologické operácie, ako napríklad výroba dier so zarkivenou osou a tvarovými dutinami v materiáloch s vysokými hodnotami mechanických vlastností,
- možnosti zavedenia mechanizácie a automatizácie,
- zvýšenie technologickosti výroby so súčasným obmedzením výroby zmätkov,
- súčasne s použitím niektorých metód dochádza k zmene mechanických vlastností ovplyvnenej vrstvy, zvýšenie únavovej pevnosti, odolnosti proti korózzii,
- zvýšenie produktivity.

Základné rozdelenie nekonvenčných metód podľa prevládajúcich účinkov odoberania materiálu:

a) obrábanie na tepelnom princípe

- obrábanie lúčom laseru (Laser Beam Machining) – **LBM**,
- obrábanie lúčom plazmy (Plasma Beam Machining)- **PBM**,
- elektroerozívne obrábanie (Electro Discharge Machining)- **EDM**,

b) obrábanie na princípe elektrochemickej alebo chemickej reakcie

- elektrochemické obrábanie (Electro Chemical Machining) - **ECM**

- chemické obrábanie (Chemical Machining) - **CHM**
- fotochemické obrábanie (Photo Chemical Machining) - **PCM**

c) obrábanie na princípe mechanickej energie

- ultrazvukové obrábanie (Ultrasonic Machining) - **USM**
- obrábanie paprskom vody (Water Jet Machining) - **WJM**
- obrábanie abrazívnym vodným paprskom (Abrasive Waterjet) - **AWJ**

Medzi nekonvenčné metódy sa niekedy zaradujú aj inovačné technológie napriek vzniku triesky, ako Hard Machining, ktorá sa zaoberá obrábaním tvrdých materiálov až do tvrdosti 62 HRC, NC dierovanie alebo rezanie závitov diamantovým nástrojom.²

V tabuľke 1.1 je uvedená použiteľnosť jednotlivých technológií u rôznych druhov materiálov.

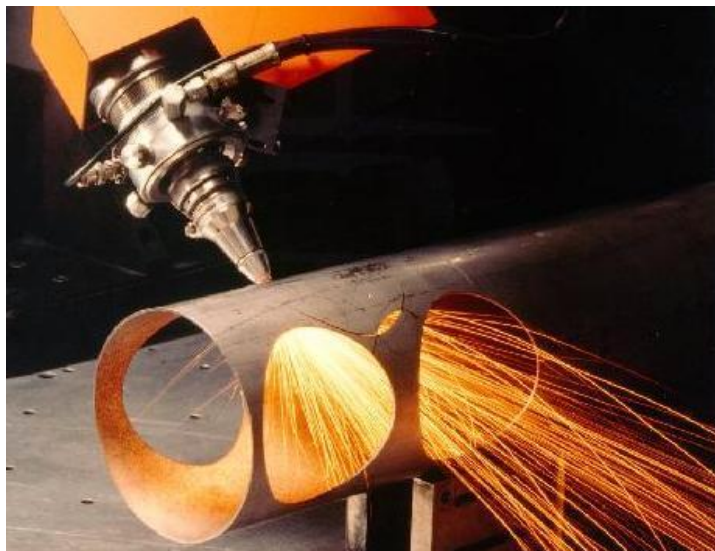
Tabuľka 1¹

Materiály					
<i>Proces</i>	<i>Hliník</i>	<i>Oceľ</i>	<i>Super zliatiny</i>	<i>Titan</i>	<i>Žiaruvzdorné materiály</i>
USM	obtiazne	vhodné	obtiazne	vhodné	výborné
AJM	vhodné	vhodné	výborné	vhodné	výborné
ECM	vhodné	výborné	výborné	vhodné	vhodné
CHM	výborné	výborné	vhodné	vhodné	obtiazne
EDM	vhodné	výborné	výborné	výborné	výborné
LBM	vhodné	vhodné	vhodné	vhodné	obtiazne
PBM	výborné	výborné	výborné	vhodné	obtiazne

1.1 Princíp obrábania lúčom laseru

Názov LASER je skratka pre anglické pomenovanie **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, čo znamená zosilnenie svetla pomocou vybudenej emisie žiarenia. Mechanizmus odstraňovania materiálu pomocou LBM zahŕňa rôzne fázy: ako tavenie, odparovanie a chemickú degradáciu (chemické väzby sú narušené, čo sôsobuje rozkladanie materiálu).¹ Nakoľko je LBM tepelný proces, jeho účinnosť závisí viac na tepelných, ako na mechanických vlastnostiach materiálu. Preto sú materiály, ktoré vykazujú vysoký stupeň krehkosti alebo tvrdosti a majú nízku tepelnú vodivosť, vhodné pre obrábanie laserom.

LBM je založené na princípe, kde sa pri prechode elektrónov z vyššej valenčnej vrstvy do nižšej uvoľňuje energia vo forme elektromagnetického žiarenia, ktoré má jednu vlnovú dĺžku. Toto žiarenie je koherentné. Zväzok elektrónov je usmerňovaný pomocou optických šošoviek a zrkadiel, kde sa pri dopade usmerneného lúča mení elektromagnetická energia na tepelnú, vďaka čomu dochádza k nataveniu a odpareniu obrábaného materiálu.¹



Obr.1 *Obrábanie laserom*³

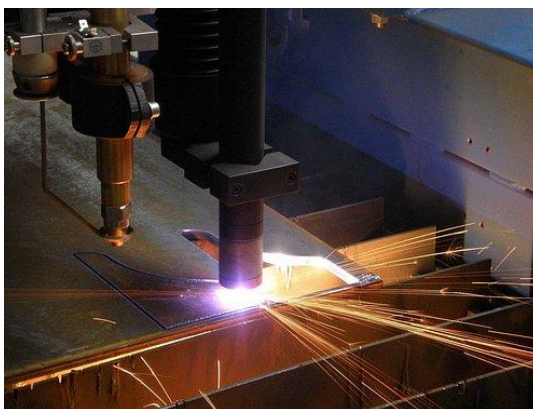
Lasery sa podľa použitia aktívnej látky(laserového média-materiál ktorý sa používa na generovanie žiarenia) delia na:

- a) pevné: *rubínové*(Al_2O_3), *Nd-YAG*(ytrium aluminium granát $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$),
- b) plynné: CO_2 , He-Ne, Ar
- c) kvapalinové: roztok určitého organického farbiva vo vode, metanole alebo etanole
- d) polovodičové: GaAsAl

1.2 Princíp a charakteristika obrábania lúčom plazmy

Plazmou sa nazýva špecifický stav plynu, pri ktorom sa stáva elektricky vodivý ionizáciou atómov a má vysokú teplotu až do 30 000 °C. Plazma sa považuje za štvrté skupenstvo hmoty. V prírode sa s ňou môžeme stretnúť v podobe blesku a hviezd. Plazma tvorí 99% pozorovateľnej hmoty vesmíru.

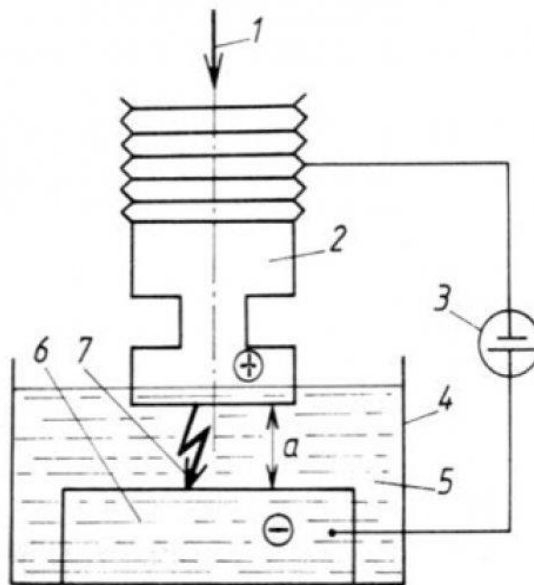
Princíp obrábania plazmou spočíva v ohreve plynu na vysokú teplotu elektrickým oblúkovým výbojom za pomoci elektród, kde je katódou wolframová elektróda a anódou obrábaný materiál. Plyny používané pri LBM sa podľa funkcie delia na: *plazmové*, ktoré sú privádzané priamo do oblúkového výboja a vytvárajú lúč plazmy, *fokusačné* ktoré zužujú lúč pri výstupe z horáku a *ochranné*, ktoré ochraňujú lúč pred atmosférou.⁴ Tieto plyny môžu byť Ar, N, N_2 , O_2 , O, H alebo zmes Ar a H. Zakladný prvok pre PBM je plazmový horák. Úbytok materiálu nastáva vďaka odparovaniu materiálu, ku ktorému dochádza pri zmene tepelnej energie na mechanickú. Pri tejto premene vzniká ovplyvnená vrstva materiálu až do hĺbky 1mm.



Obr.2 *PJM v praxi*³

1.3 Princíp a charakteristika elektroerozívneho obrábania

Elektroerozívnym obrábaním sa obrábajú elektricky vodivé materiály, kde k úbytku materiálu dochádza striedajúcim impulzným elektrickým výbojom medzi pracovnou elektródou a obrábaným materiálom, ktoré sú ponorené do tekutého dielektrika. Vplyvom vysokej tepelnej energie vznikajú na obrobku kvapky roztaveného kovu, ktoré sa následne odparia. Ako dielektriká sa používajú napríklad strojný olej, petrolej, destilovaná voda a deionizovaná voda, ktoré majú požadované vlastnosti, ako nízka viskozita, chemická neutralita, vysoká teplota horenia.⁶



Obr. 3. Princíp zariadenia pre EDM

1-smer posuvu nástrojovej elektródy, 2-
nástrojová elektroda, 3-generátor, 4-pracovná
vaňa, 5-tekuté dielektrikum, 6-obrobok,
7-elektrický výboj⁶

Špeciálnym prípadom elektroerozívneho obrábania je *elektrokontaktné*, kde dochádza k úbytku materiálu elektrickými nestacionárnymi oblúkovými výbojmi. Nástrojová elektroda vykonáva otáčavý pohyb čím sa dosahuje

mechanického budenia kmitu a zabraňuje reakcii medzi nástrojom a obrobkom.

Ďalším prípadom elektroerozívneho obrábania je *elektroiskrové*, kde sa nástrojová elektróda automaticky posúva proti obrobku, pričom musí riadiaci systém udržiavať konštantnú veľkosť iskrovej medzery. Elektroiskrové obrábanie sa ďalej delí na hĺbenie a rezanie.

Medzi elektroerozívne obrábanie sa zaraďuje aj *anodomechanické*, ktoré sa však môže zaradiť aj medzi elektrochemické. K ododberaniu materiálu dochádza elektrotermickým účinkom, pri použití nižších hodnôt k ododberaniu dochádza elektrochemickým účinkom. Proces odoberania materiálu prebieha za vysokých teplôt, pričom je obrobený materiál odstraňovaný pomocou otáčajúceho nástroja. V miestach, kde nástroj naruší otáčavým pohybom izolačnú vrstvu, nastáva výboj.⁶

1.4 Princíp a charakteristika elektrochemického obrábania

Základným princípom elektrochemického obrábania je fyzikálny jav zvaný elektrolýza, obrábať je možné iba elektricky vodivé materiály. Obrobok ako anóda je ponorený do elektricky vodivej tekutiny zvanej elektrolyt, pričom dochádza k reakcii a následnému rozpusteniu obrábaného materiálu na základe zlučovania katiónov elektrolytu s aniónmi obrábaného kovu. Ako tekutina *elektrolyt* sa používajú chemické zlúčeniny ako NaCl, NaClO₃, NaNO₃, HCl, NaOH. Nástroj je umiestnený v blízkosti obrobku a v medzere medzi nástrojom a obrobkom je elektrolyt ktorý slúži ako elektrický vodič ktorý pomáha odstraňovať vedľajšie reakčné produkty ako kovové hydroxidy, plyny a teplo. Ostatné nežiadúce účinky môžu byť napríklad oxidácia vody ktorá je spôsobená nesprávnym zložením elektrolytu. Ako materiál nástroja sa používa napríklad meď, mosadz, bronz, titan, korozivzdorná oceľ alebo titan.⁷

1.5 Princíp a charakteristika chemického obrábania

Princíp chemického obrábania je založený na naleptávaní materiálu kde je pomocou chemických reakcií s kyselinami alebo hydroxidmi uberaný materiál. Jedná sa o riadené odleptávanie jednotlivých vrstiev materiálu. Miesta ktoré sa neobrábajú sa zakrývajú maskou. Každý materiál má svoju typickú pracovnú kvapalinu, viď tab. 2.

Tabuľka pracovných kvapalín ²⁴

Materiál	Pracovná kvapalina	Rýchlosť leptania [mm·min ⁻¹]
Al	FeCl ₃ (120÷180 g·l ⁻¹)	nízka
Si	HNO ₃ + HF + H ₂ O	0,020
Zliatiny Al	NaOH (160÷180 g·l ⁻¹)	0,025
Zliatiny Ti	HF (10÷50 %), HF +HNO ₃	0,025
Cu	(NH ₄) ₂ SO ₈ (120÷240 g·l ⁻¹)	-
Mg	H ₂ SO ₄	0,038
Nízkouhlíkové oceli	FeCl ₃ (600 g·l ⁻¹),	0,025
Korozivzdorné oceli	HCl (50 %) + HNO ₃ + H ₂ PO ₄ (2,5 %)	-

Postup pri chemickom obrábaní:⁸

1. *Príprava obrobku* (odstránenie oleja, prachu a akýchkoľvek nečistôt z povrchu materiálu), chemicky alebo mechanicky,
2. *Nanesenie maskovacieho materiálu na obrobok* (materiál masky by mal byť ľahko odstrániteľný a odolný voči pracovnej kvapaline),
3. *Orysovanie masky* (podľa šablón sa odkryjú miesta určené na obrábanie),
4. *Leptanie* (materiál je ponorený do leptadla pričom sú obrobené odkryté plochy),
5. *Čistenie* (obrobok je očistený od leptadla, následne je očistený od masky)

1.6 Princíp a charakteristika fotochemického obrábania

Fotochemické obrábanie pracuje na princípe chemického leptania tenkého plechu cez fotocitlivú šablónu. Šablóna pozostáva z dvoch vrstiev filmu ktoré sú dokonale prilínuté k obrábanemu materiálu. Následne je vystavená UV žiareniu.

Po expozícii je pás plechu vystavený leptadlu (vodný roztok kyseliny chloridu železitého), pričom nechránené časti reagujúce s leptadlom sú následne odstránené. Nakoniec sa materiál zneutralizuje, vysuší a vyčistí.

1.7 Princíp a charakteristika obrábania ultrazvukom

Podstatou ultrazvukového obrábania je mechanický účinok abrazíva, ktoré medzi nástrojom a obrobkom kmitá ultrazvukovou frekvenciou 20 000 až 30 000 Hz a zároveň kavitačné a chemické pôsobenie kvapaliny, pomocou ktorej sú k obrobku privádzané brúsne zrná. Nástroj, inak nazývaný trň (viď Obr.4) udáva kmitaním zrnám veľkú kinetickú energiu, ktorá sa mení na mechanickú, čo spôsobuje uberanie materiálu. Kavitácia vzniká pri prudkom poklese tlaku, pričom vákuové bubliny implodujú za vzniku rázových vln. Kavitačné pôsobenie kvapaliny má vplyv na rýchlosť obrábania a je ovplyvnené frekvenciou ultrazvukových vln. Ako abrazívny materiál sa používajú zrná B_4C , SiC , alebo Al_2O_3 . Stroj, ktorý dáva zrnám kmitavú energiu, sa skladá z generátora, meniča a koncentrátora amplitúdy. Magnetostrikčný, prípadne piezoelektrický efekt, ktorý sa vytvára v meniči, mení elektrickú energiu na mechanickú.⁹



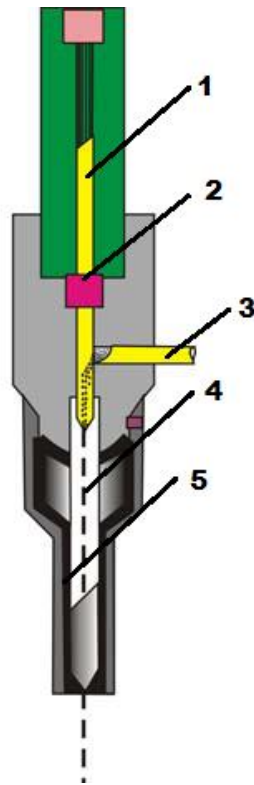
Obr.4 Nástroj pre obrábanie ultrazvukom⁹

1.8 Princíp a charakteristika obrábania vodným paprskom

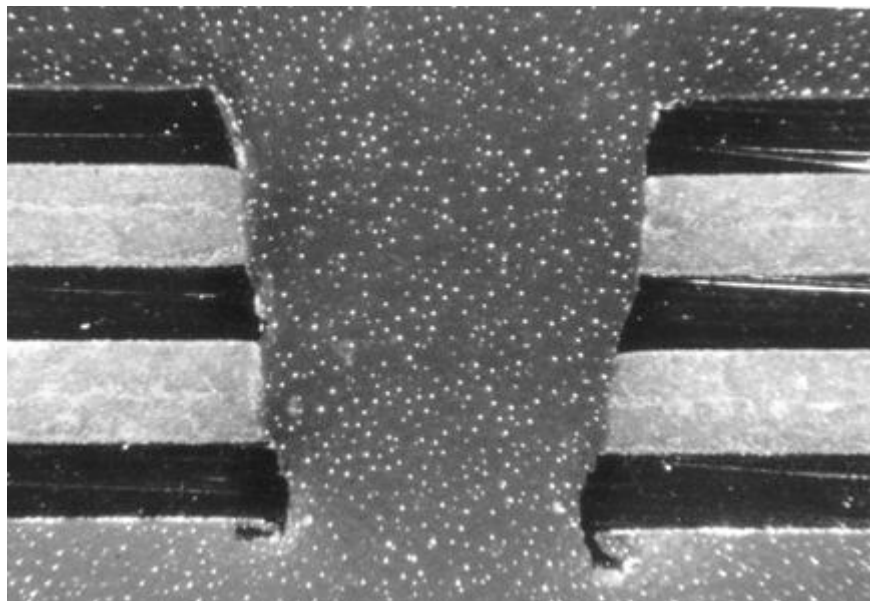
Obrábanie vodným paprskom alebo hydrodynamické obrábanie pracuje na princípe odoberania materiálu pomocou mechanickej energie lúča vody bez abrazíva, ktorý pri prietoku cez trysku s malým priemerom získava vysokú kinetickú energiu. Získaná rýchlosť dosahuje až 3 násobok rýchlosti zvuku. Voda je čerpaná vysokotlakovým čerpadlom s prietokom až $12,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Vysoký tlak do 700Mpa sa následne získava v multiplikátore čo je zariadenie určené k zvýšeniu tlaku vody. Akumulátor tlmí vzniknuté pulzy ktoré vznikajú prechodom vody cez multiplikátor.¹¹ Vysokú kinetickú vodu zabezpečuje tryska rezacej hlavice (viď Obr.5) o priemere 0,075 až 1,7mm, vzniknutý lúč ktorý prichádza do kontaktu s obrobkom má priemer 0,2 až 0,4 mm.¹⁰

1.9 Princíp a charakteristika obrábania abrazívnym vodným paprskom

Na rozdiel od AWJ sa u obrábania abrazívnym vodným lúčom používa abrazívne brusivo, ktoré znásobuje účinok vodného paprsku. Voda sa obaluje abrazívom v zmesovacej komôrke, ktoré je nasávané podtlakom vody pričom po prejení tryskou dosahuje vysokú kinetickú energiu. V súčasnosti sa ako abrazívne brúsivá používajú granát, oxid hlinitý, olivín, kremičitý piesok, alebo oceľová drť. Samotný proces rezania prebieha v dvoch etapách. V prvej etape vzniká pôsobením tlaku kvapaliny prehĺbenie, ktoré sa mení na otvor. V druhej etape dochádza k vytváraniu reznej škáry. Pri náraze kvapaliny s abrazívom na obrobok dochádza k akumulácii vysokého tlaku na veľmi malej ploche a v rezanom materiále vznikajú rázové vlny. Dochádza tak k rýchlej deštrukcii materiálu.(viď Obr. 6) K deštrukcii materiálu dochádza aj turbulentným prúdením s kavitačným účinkom bublín. Hlavný je však abrazívny účinok brúsiacich zrn.¹¹ K zachyteniu abrazívneho paprsku sa používa vodná nádrž, následne sa v odkaľovacom zariadení oddeľuje voda od zrn. K riadeniu celého procesu AWJ sa používa NC alebo CNC technológia.



Obr. 5. Schéma rezacej hlavy¹²
1.prívod kvapaliny 2.vysokotlaká vodná
tryska 3.prívod abraziva 4.miešacia tryska
5.výstupná tryska



Obr. 6. Detailný pohľad na rez¹²

2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI JEDNOTLIVÝCH METÓD A ICH SÚČASNÉ VYUŽITIE V PRIEMYSLE

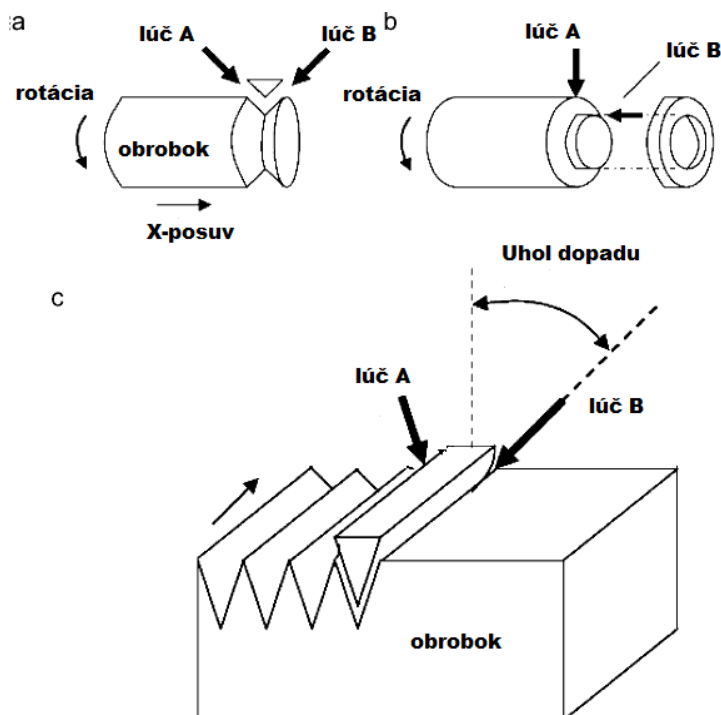
V súčasnosti sa celosvetovo vďaka svojim prednostiam a efektívnosti čoraz viac využívajú nekonvenčné metódy obrábania. Ich široké využitie z hľadiska materiálov sa uplatňuje vo všetkých priemyselných odvetvách, či už v delení materiálov alebo obrábaní. Tieto metódy patria medzi najprogressívnejšie a neustále sa zdokonaľujú.

2.1 Možnosti a využitie obrábania LASERom

LBM patrí medzi veľmi presné druhy obrábania. Medzi prednosti patrí veľká rýchlosť rezania, výborná kvalita rezu a minimálna deformácia obrodku. Hlavné využitie nachádza LBM vo vŕtaní (1-D), delení, rezaní(2-D) a zapichovaní, sústružení a frézovaní (3-D) a mikroobrábaní rôznych materiálov. Medzi limitujúce hodnoty u LBM patrí hrúbka rezaného materiálu a to 20 mm u konštrukčných ocelí, 10 mm u nerezových ocelí, alebo 5 mm pre hliník.

LBM sa najviac využíva pri rezaní plynovými kontinuálnymi lasermi na báze CO₂ a lasermi na báze ytriovo-hlinitého granátu (Nd:YAG lasery).¹⁴ LBM dokáže obrábať široké spektrum ťažkoobrobiteľných materiálov ako sú: titanové zliatiny, superzliatiny, spekané karbidy, monokryštály a mnoho ďalších. Obrobiteľnosť materiálov rastie s menšou tepelnou vodivosťou a odrazivosťou materiálu. LBM sa využíva v automobilovom, leteckom, elektronickom, medicínskom, chemickom alebo energetickom priemysle.

Sústruženie a frézovanie pomocou LBM (viď Obr.7) využíva dva simultálne laserové lúče s ohľadom na požadovaný profil obrodku. Laserové frézovanie umožňuje výrobu výrobu dielov zložitých tvarov bez nutnosti drahých nástrojov. LBM je najvýhodnejšie pri obrábaní súčastí s jednostrannou geometriou alebo k čiastočnému obrábaniu. Kompletné frézovanie je tiež možné, ale veľmi obtiažne.

Obr. 7. 3D obrábanie laserom⁵

a) sústruženie špirálové, b) sústruženie prstencové), c) laserové frézovanie

LBM nachádza využitie aj v mikroobrábaní u súčiastok, ktoré majú rozmery menšie ako 1mm. U mikroobrábania sa používajú lasery s krátkymi impulzmi (v mikrosekundách) a veľmi vysokými frekvenciami (v rozmedzi Khz). Obrábanie pomocou laseru sa používa aj v dierovaní a označovaní keramiky a plastov.

Ďalšia aplikácia LBM je leštenie povrchu, kde za pôsobenia povrchového pnutia dochádza k pretaveniu tenkej vrstvy materiálu a odpareniu nerovností povrchu. Touto technológiou sa dosahujú drsnosti R_a až $0,1 \mu\text{m}$. Okrem kovových materiálov nachádza leštenie laserom využitie aj u skla pri dieloch optických systémov. K zabráneniu poškodenia geometrie šošovky sa vysokofrekvenčným mikrovlnným žiaričom šošovka predhrieva, čím sa pri následnom pôsobení laseru a chladnutí znižujú teplotné gradienty. Postup prebieha automaticky, s riadením cez pyrometer.²⁷

Výhodou obábania lúčom laseru je široká možnosť automatizácie procesu pomocou CAD/CAM systémov. Medzi nevýhody patrí obmedzená hrúbka materiálu, vysoká odrazivosť laserového lúču od lesklých povrchov a relatívne vysoká cena laserového zariadenia.¹⁴

Medzi najznámejších výrobcov laserových zariadení patria firmy: MAZAK, LVD, MITSUBISHI, TRUMPF a BYSTRONIC.

2.2 Vývoj LBM

V súčasnosti sa výrobcovia snažia vyvíjať vysokovýkonné laserové zariadenia ktoré obrábajú vysokými rýchlosťami pri dosahovaní požadovanej kvality a presnosti rezov. Medzi najnovšie patrí napríklad lúčová vychyľovacia jednotka vyvíjaná firmou JENOPTIK. Jedná sa o modul pre 3D obrábanie plastových častí. Vysoká hospodárnosť tejto technológie sa dosahuje pomocou scannerového riešenia na lúčové vychyľovanie. Touto technológiou je tiež možné dierovať, drážkovať, gravírovať a písať nadpisy. Rýchlosť obrábania dosahuje 120 m min^{-1} pri kruhoch, $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ pri obdĺžnikoch, čo je veľký nárast oproti laserovej rezacej hlave.¹⁵

Firma BYSTRONIC vyvinula vysokorýchlostnú technológiu rezania hrubých plechov a tvarových súčiastok. Vysoké rýchlosti obrábania zabezpečuje technológia DHM (direct helical motor drive) a pracuje na guľôčkovom skrutkovom prevode s priamou hnacou maticou vretena. Toto zariadenie je schopné rezať materiál rýchlosťou 15 m/min a vytvoriť až 600 dier za minútu.¹⁶



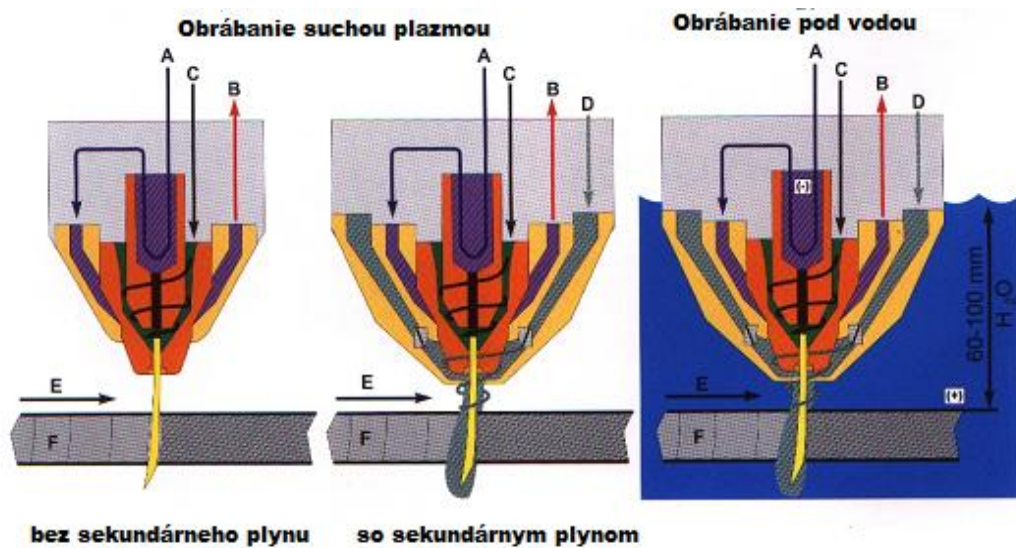
Obr.8 Vysokorýchlostné dierovanie laserom¹³

2.3 Možnosti a využitie obrábania plazmou

Plazmové obrábanie sa využíva u stredných hrúbok nelegovaných ocelí (15 až 50 mm), ale tiež je možné rezať vysokolegované oceli a zliatiny hliníka. Rezanie plazmou sa najviac využíva pri rezaní plechov a trúbok, oproti LBM sa však dosahuje nižšia kvalita rezu (neplatí pri polotovarochoch s vysokou hrúbkou). Výhodou sú však kratšie časy rezania. Plazma nachádza využitie aj v plazmovom drážkovaní, napríklad pri odstraňovaní zvarov.

Medzi moderné techniky PBM patria:

- suchá plazma bez sekundárneho plynu,
- suchá plazma so sekundárnym ochranným plynom,
- rezanie plazmou pod vodou so sekundárnym ochranným plynom.¹⁷



Obr. 9. *Koncept moderných typov PBM*¹⁷
 A) Prívod vody, B) Odvod vody, C) Plyn,
 D) Ochranný plyn, E) Smer rezania,
 F) Hĺbka rezu

V súčasnosti patria medzi výhody PBM výborná možnosť automatizácie, pohyb horákov je CNC riadený. Pri rezaní pod vodou sa dosahuje veľmi malé teplelné ovplyvnenie materiálu s malou hladinou hluku v okolí pracoviska.

V posledných rokoch vyvinuli výrobcovia nové modely trysiek s tenším lúčom plazmy, čo umožňuje rezať s presnosťou blížiacou sa k laseru. Ide o presné rezanie plazmou. Pri tejto technológii je plazmový oblúk dokonale zovretý, čím narastá hustota energie rezania. Rýchlosť obrábania naopak klesá. Výrobcovia využívajú presné rezanie k výrobe dielov, ktoré po obrobení nepotrebujú ďalšie dokončovacie operácie.

2.4 Možnosti a využitie elektroerozívneho obrábania

Vďaka širokej možnosti elektroerozívneho obrábania nachádza elektroerozívne obrábanie priemyselné využitie hlavne v hĺbení dutín a otvorov, drátovom rezaní a mikrodierovaní v leteckom v automobilovom a elektronickom priemysle.

2.5 EDM hĺbenie dutín a tvarových otvorov

Táto technológia sa využíva hlavne vo výrobe nástrojov pre strihanie a lisovanie, pre zhotovenie tvarovo zložitých dutín a otvorov. Nástrojová elektróda sa automaticky posúva smerom k obrobku, vplyvom pôsobenia výbojov do obrobku vzniká výsledný tvar. U moderných CNC riadených strojov sa funkcie ako riadenie smerov a pohybov, poloha pracovného stola, parametre generátora, kontrola pracovnej medzery GAP, kontrola procesu elektroerózie sa riadi kompletne týmto systémom.¹⁹

Elektroerozívnym hĺbením je možné zhotoviť rôzne typy a tvary otvorov. Pomocou vychýlovača elektród sa zhotovujú zložité tvary pri dosiahnutí lepšej kvality povrchu. Vychýlenie elektródy zároveň znižuje spotrebu elektródy čo vedie k ekonomickejšiemu využitiu technológie.

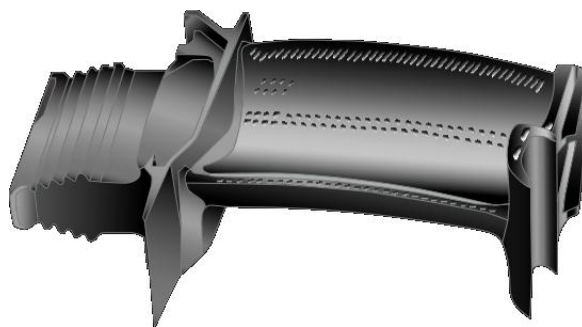
2.5.1 EDM drôtové rezanie

Pomocou drátového rezania sa v súčasnom priemysle vyrábajú nástroje určené pre strihanie a lisovanie. Ako elektróda sa používa tenký medený alebo mosadzný drôt od 0,03 mm až do 0,36 mm. Pre jemné a vysoko presné rezy sa využíva wolfrámový alebo molybdenový drôt.¹⁹

Keďže ide o vysoko-presné rezanie, presnosť môže dosiahnuť až 3 μm , k dosiahnutiu tejto hodnoty sa musí dodržať teplotná stabilizácia stroja do 1°C. Touto technológiou je možné po niekoľkých dokončovacích operáciách dosiahnuť drsnosť povrchu až 0,05 μm . K tejto technológii sa využívajú 5-osé riadiace systémy.¹⁹

2.5.2 EDM mikrodierovanie

Táto technológia nachádza využitie v jemnej mechanike, dokáže vytvoriť otvor od priemeru 0,02 do 3 mm a hĺbky 100mm. Elektródy sú vyrobené z wolfrámového drôtu a vykonávajú kmitavý pohyb. Mikrodierovanie sa v priemysle využíva hlavne na vytvorenie mikroskopických otvorov palivových systémov, k vŕtaniu radov dier odtokových hrán lopatiek používaných v prúdových motoroch.⁶



Obr. 10. Využitie EDM u mikrodierovania lopatky turbíny²⁰

2.6 Možnosti a využitie elektrochemického obrábania

ECM sa v súčasnom priemysle využíva hlavne na výrobu tvarovo zložitých súčastí, ako sú lopatky turbín, lisovacie nástroje a kovacie zápustky. Pomocou ECM sa obrábajú ťažko obrobitelné materiály s vysokou tvrdosťou a pevnosťou, ako kalené oceli, spekané karbidy a žiaroodolné zliatiny. Medzi ďalšie aplikácie ECM patrí: hĺbenie dier malých priemerov, delenie materiálu, brúsenie, lapovanie (akosť povrchu 0,2 až 0,5 μm), honovanie, leštenie, elektrochemické odstraňovanie ostrín značenie kovov.

Elektrochemické obrábanie rotujúcou elektródou je kombináciou elektrochemického účinku a brúsenia. Aplikuje sa u obrábania nástrojov vyrábaných zo spekaných karbidov, materiálov s vysokou tvrdosťou a u materiálov ktoré sú menej tepelne odolné a nie je možné ich brúsiť štandardnými metódami. Obrobok je upnutý ku kladnému pólu zdroja, ako anóda a brúsiaci kotúč k zápornému, ako katóda. Zrná brusiva, ktoré odstraňujú oxidovú vrstvu, tvoria pracovnú medzeru. Ako brúsivo sa používa buď diamant alebo oxid hlinitý. Na podobnom princípe pracuje aj elektrochemické honovanie, ktoré môže byť až 6-krát produktívnejšie, ako klasické konvenčné honovanie.⁴

Elektrolycké vŕtanie tvarovou trúbkou STEM (Shaped Tube Electrolic Machining) sa využíva na vŕtanie hlbokých dier s malým priemerom. Táto technológia využíva titanovú trúbku obalenú elektricky izolačnou, chemicky odolnou živcou. STEM umožňuje vŕtať diery od 0,5 do 3mm a pomerom priemeru a hĺbky 1:300.⁶ STEM nachádza uplatnenie vo výrobe chladiacich otvorov lopatiek turbín, v automobilovom, lekárskom, vojenskom priemysle.

ECM umožňuje značenie kovových materiálov s hĺbkou vytvoreného znaku iba 0,03 mm. Jedná sa o usmernené anodické rozpúšťanie povrchu obrábanej súčasti ponorenej do elektrolytu. Výsledná značka je reprodukciou šablony (vyrobenej z plastu), alebo odtlačku nosiča pracovnej kvapaliny.

2.7 Možnosti a využitie fotochemického a chemického obrábania

Fotochemické obrábanie nachádza uplatnenie vo výrobe tenkých a tvarovo zložitých výliskov z tenkého plechu, pri tomto druhu obrábania nevznikajú otrepy. Pomocou PCM sa vyrábajú napríklad: elektroplechy pre elektrické motory, kontakty a svorky, šablóny alebo clony.

Chemické frézovanie sa aplikuje u obrábania súčastí u ktorých sa nevyžadujú ostré hrany, hlboké tvary, nie je možné obrábať polotovary s rôznorodou štruktúrou ako sú zvary a odliatky. CHM sa naopak využíva vďaka širokej možnosti obrábania kovových zliatin, pri ktorom nevznikajú zbytkové napätia.² Oproti iným nekonvenčným metódam sa dosahujú nízke prevádzkové náklady pri nízkej produkcii odpadu. Chemické leptanie sa využíva napríklad v leteckom priemysle pri obrábaní zložitých tvarov do malých hrúbok (nosníky leteckých konštrukcií), pri obrábaní tenkostenných súčastí, nakoľko nehrozí deformácia vzniknutá zbytkovými napätiami.

Termické odstraňovanie otrepov tiež patrí medzi chemické obrábanie a využíva sa k odstraňovaniu nežiadúcich otrepov. Pomocou tepelno-chemického procesu sa elektrickou iskrou v uzatvorenej pracovnej komore zapáli zmes vodíka a kyslíka a za teploty 3500 °C otrepy zhoria.²¹



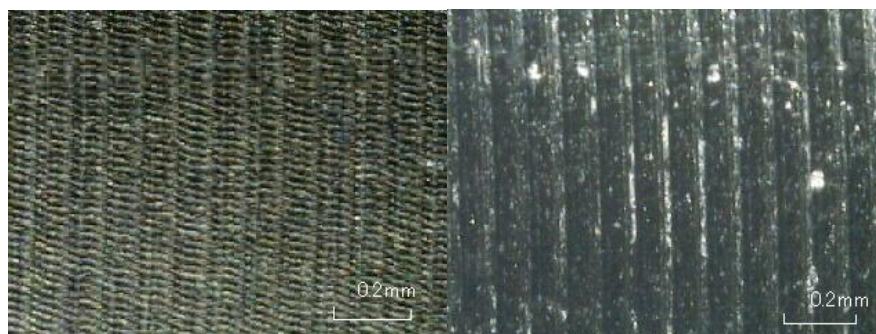
Obr. 11. Príklady výrobkov fotochemickým obrábaním firmy MASTERCUT²²

2.8 Možnosti a využitie obrábania ultrazvukom

V súčasnom priemysle je USM charakterizované širokou paletou aplikácií. Medzi najčastejšie patrí delenie materiálu, brúsenie, lapovanie, leštenie keramických materiálov a skla, dierovanie, výroba elektród pre elektroiskrové obrábanie, výroba nástrojov určených na tvárnenie, výroba kruhových a nepravidelných zahĺbení s minimálnym rozmerom až do 0,003 mm. Medzi najmodernejšie aplikácie patrí obrábanie drahých kameňov ako sú diamanty.

Pri obrábaní ultrazvukom s podporou chemického obrábania (CUSM) sa pri výrobe optických šošoviek zamedzuje vzniku lokálnych deformácií a prasklín, väzbové sily medzi molekulami sú oslabené a tak nedochádza k šíreniu energie v nežiadúcich smeroch. Ako pracovná kyselina sa používa kyselina fluorovodíková (HF) ktorá reaguje so sklom, čím sa oslabujú väzbové sily medzi molekulami Si, čo zvyšuje účinok USM.³⁰

USM sa v súčasnosti často využíva aj ako sekundárny podporný prostriedok u frézovania alebo vŕtania. Pri tomto obrábaní sa však do miesta rezu neprivádza abrazívum ako u ostatných USM metód, ale rozkmitaný je nástroj (napr. vrták). Frekvencia rozkmitaného vrtáku sa pohybuje do 20 kHz. Rozkmitanie má za úlohu znížiť trenie medzi nástrojom (až do 60%) a obrobkom, skracuje strojné časy, odstraňuje otrepy, u sústruženia výrazne znižuje drsnosť povrchu (Obr. 2.6.2). Týmto spôsobom sa obrábajú hlavne krehké materiály.



Obr.12. Porovnanie drsnosti povrchu konvenčného sústruženia (vpravo) a sústruženia za asistencie ultrazvuku (vľavo)²³

2.9 Možnosti a využitie obrábania abrazívnym lúčom vody

Využitie obrábania vodným lúčom je veľmi široké a používa sa vo veľa odvetviach priemyslu. Medzi technologické možnosti AJM patrí rezanie, vŕtanie, sústruženie, frézovanie, gravírovanie ale aj leštenie alebo zdršňovanie povrchov, ako aj obnažovanie železobetónových stavebných konštrukcií. Do širokého spektra obrábaných materiálov patria okrem legovaných, nástrojových, kalených ocelí aj plasty, guma, kompozity, sklolamináty, mramor, žula, zliatiny hliníku, titanu, medi a mnoho ďalších. V súčasnosti sa rezanie vodným paprskom využíva aj k delaborovaniu použitej munície alebo kontaminovaných látok. WJM sa aplikuje aj pri odstraňovaní okují počas valcovania plechu.

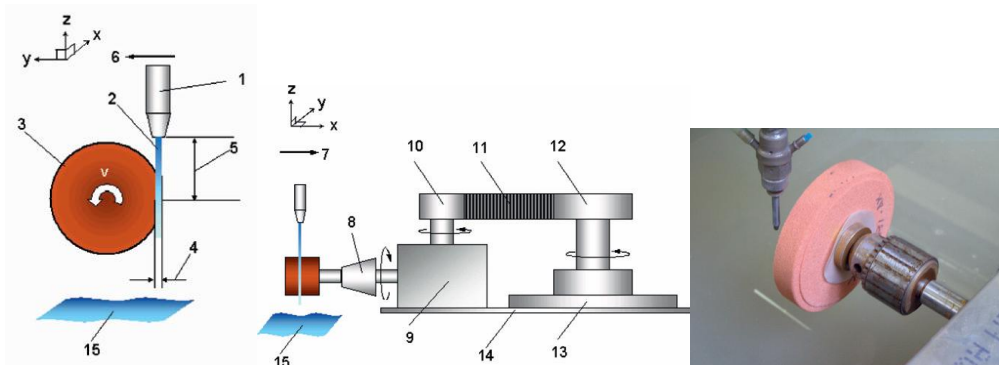
Efektivita WJM sa v súčasnosti zvyšuje spojením s CNC viacosými stolmi, ktoré sú vybavené supportami pre šikmé rezanie ktoré umožňujú rotáciu a náklon rezacej hlavy.



Obr. 13. Aplikácia 5-osého AJM obrábania²⁴

2.9.1 Sústruženie pomocou vodného lúča

Podstatou sústruženia vodným lúčom je rotovanie obrobku a posúvanie paprsku v axiálnom smere vzhľadom k ose obrobku. Radiálnym posuvom sa zabezpečuje úber materiálu. Týmto spôsobom možno opracovávať ťažko obrobiteľné materiály ako sú lamináty, keramika, kompozity, pieskovec a ďalšie. AWJ sústružením sa vyrábajú napríklad brúsne kotúče.



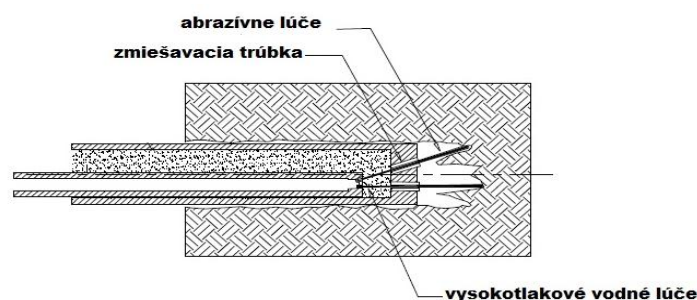
Obr. 14. Schéma WJM sústruhu pri výrobe brúsneho kotúča

1. Tryska, 2. Vysokorychlostný prúd vody, 3. Obrobok, 4. Hĺbka rezu, 5. Udržovaná vzdialenosť, 6. Smer pohybu trysky, 7. Priečný smer prúdu, 8. Sklúčovadlo, 9. Prevodovka, 10. Poháňaný prevod, 11. Prevodový remeň, 12. Riadiace prevody, 13. Otočný stôl, 14. Platforma, 15. Hladina vody²⁵

2.9.2 Frézovanie a vrtanie pomocou vodného lúča

Frézovanie sa využíva vo výrobe zložito tvarovaných súčastí ako sú formy odliatkov a rôznych nástrojov na tvárnenie ale aj výrobky zo skla. Nejedná sa však o delenie materiálu, pri frézovaní prechádza opakované lúče po obrábanej ploche. Jedná sa o progresívnu metódu u výroby nástrojov na tvárnenie. Frézovanie úzko naväzuje na techniky gravírovania využívané väčšinou v umeleckej oblasti.²⁶

Pomocou vrtania vodným lúčom sa obrábajú ťažko obrobiteľné materiály, vrtá sa viacerými spôsobmi a to stacionárnym, rotujúcim paprskom alebo vyrezávanie stredú otvoru. V súčasnom priemysle sa najčastejšie využíva vrtanie so stacionárnym lúčom a obrobkom (Obr 2.7.2).



Obr. 15 AWJ vrtanie²⁴

3 PREVÁZKOVÁ NÁROČNOSŤ NEKONVENČNÝCH METÓD

Vhodnosť aplikácie jednotlivých metód závisí hlavne na faktoroch ako sú investičné náklady, cena nástrojov, cena spotreby energií, efektívnosť uberania materiálu ale aj náklady spojené s prevádzkou. Napriek vyšším prevádzkovým nákladom a vyšším a investičným nákladom sú častokrát prevádzkové náklady u najnáročnejších metód vďaka rádovo rýchlejšiemu dosiahnutelným rezným parametrom a tým pádom kratším strojným časom ekonomickejšie práve nekonvenčné metódy.

3.1 Prevádzková náročnosť LBM

Medzi hlavné prevádzkové náklady u LBM patrí²⁸:

- spotreba laserového a rezného plynu (spotreba rezného plynu sa líši v závislosti na rezanej hrúbke materiálu a na druhu materiálu),
- spotreba elektrickej energie (spotreba je spravidla vyššia ako pri obrábaní plazmou alebo vodným paprskom, (požadovaný príkon sa pohybuje cca 60 kW),
- výmena poškodených alebo opotrebovaných zrkadiel a šošoviek,
- výmena poškodených alebo opotrebovaných trysiek,
- prevádzka odsávacích filtračných zariadení,
- výmena filtrov a podperných lamiel pracovného stola.

3.2 Prevádzková náročnosť AWJ

Medzi hlavné náklady na prevádzku u AWJ patria:

- náklady na abrazívo (napr. cena abrazíva granát stojí v priemere 15 kč/kg²⁹, korund v priemere 40 kč/kg²⁹, korund má oproti granátu vyšší rezný účinok) náklady na abrazívo sú aj pri ultrazvukovom obrábaní,
- spotreba elektrickej energie,

- náklady na výmenu poškodenej alebo opotrebovanej trysky (životnosť závisí na materiále trysky, kvalite vody, druhu abrazíva),
- náklady na výmenu vody (vodu treba filtrovať, deionizovať a zmäkčovať, od kvality vody závisí životnosť trysiek a preto je dôležité aby bola kvalitná, voda musí mať nízku viskozitu k minimalizovaniu straty výkonu pri toku potrubím),
- náklady na výmenu tesnení,
- náklady na prevádzku vysokotlakovej vodnej pumpy.

3.3 Prevádzková náročnosť EDM

Medzi hlavné náklady na prevádzku pri EDM patria:

- náklady na obnovu nástrojových elektród (navrhuje sa pre každý prípad samostatne, výroba elektródy činí cca polovicu z výrobných nákladov, je dôležité zvoliť správny materiál elektródy a zhodnotiť možnosti a cenu výroby, rýchlosť opotrebenia závisí od teploty tavenia materiálu, stupeň opotrebenia sa hodnotí podľa opotrebenia rohov elektródy),⁶
- náklady na dielektrikum (používa sa buď destilovaná voda alebo petrolej),
- u elektrodrôtového rezania náklady na drôt (odvíja sa pomocou napínacieho mechanizmu).

3.4 Prevádzková náročnosť CHM

Hlavné prevádzkové náklady sú:

- náklady na výmenu pracovnej chemikálie,
- náklady na likvidáciu použitej pracovnej chemikálie,
- energetické náklady na prevádzku stroja,
- náklady na odmasťovanie obrobku, masky.

4 EKOLOGICKÉ POSÚDENIE NEKONVENČNÝCH METÓD

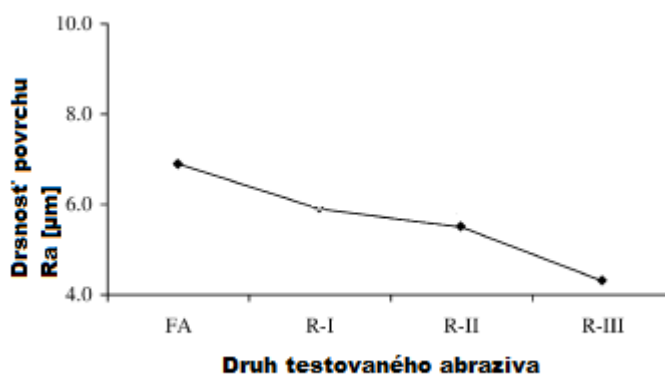
Netradičné metódy sa oproti konvenčným metódam obrábania vyznačujú značnou environmentálnou náročnosťou, pri prevádzke vznikajú rôzne aerosoly, chemické zlúčeniny, UV žiarenie, je potreba likvidovať elektrolyty, kyseliny, abrazíva a mnoho ďalších negatívnych aspektov. Ekologická problematika v priemyselnej výrobe je v súčasnej dobe čoraz prísnejšie riešená. Táto časť sa zaoberá posúdením jednotlivých metód z environmentálnej stránky.

4.1 Ekológia u technológie WJM

Táto metóda je zo všetkých metód najmenej environmentálne náročná. Okrem použitého abrazíva a odobraného materiálu vo vode pri obrábaní nevznikajú škodlivé zlúčeniny. Použité abrazívo je v v niektorých prípadoch výhodné recyklovať a znížiť tak celkové náklady výroby. Použité abrazívo je po procese rezania nepoužiteľné (rezné vlastnosti sa zachovávajú) a preto musí byť zbavené nečistôt.

Firma AQUArec PRO vyvinula zariadenie pre recykláciu abrazíva, kde je použitá voda s abrazívom čerpaná do vibračného separátora kde sa abrazívo oddeľuje od vody, voda je po prefiltrovaní znovu použiteľná a abrazívo po usušení putuje do separátora, kde sa oddelí od nečistôt a je pripravené k opätovnému použitiu. Zariadenie je možné namontovať do systému odkalovania rezacieho stola.³¹

Ako uvádza štúdia Richarda Warda³², použitie zariadenia pre recykláciu je veľmi výhodné, ako aj z environmentálnej stránky, tak aj z ekonomickej. Pri 45 tonách použitého abrazíva sa za rok podarilo zrecyklovať 30 t. Navyše rezné vlastnosti recyklovaného abrazíva sa vďaka odlamovaniu kúskov častíc namiesto otupovania zvýšili až o 15 až 20% ako uvádza graf 4.1 čo vedie k zvýšeniu produktivity.



Graf 1. Porovnanie recyklovaných abrazív
vzhľadom na drsnosť povrchu³³

FA: nové abrazívo, R-1: 1-krát recyklované, R-II 2-
krát recyklované, R-III: 3 krát recyklované

4.2 Environmentálna náročnosť u EDM

Jednými z najdôležitejších elementov u EDM sú dielektrické tekutiny ktoré sú environmentálne škodlivé. Výkon rezania je pri použití olejov značne vyšší ako u použitia destilovanej alebo deionizovanej vody, pri použití oleja však okrem potreby likvidácie vznikajú aj nebezpečné výpary ako sú uhľovodíky, nitroaromatické zlúčeniny, acetylén, etylén a ďalšie. Ionizovaná voda produkuje najmenej škodlivých látok zo všetkých dielektrík. Na konci operácie vznikajú odpadové látky (odobraný materiál z nástroja a obrobku, dielektrická kvapalina, použité filtre). Zostatkový dielektrický olej je vysoko toxický, nie je recyklovateľný a je potreba sa ho zbaviť podľa environmentálnych noriem, čo prináša ďalšie náklady. Výrobcovia musia preto zvážiť použitie konkrétnej tekutiny pri EDM či už deionizovanej vody, strojného oleja, petroleja a ďalších používaných dielektrík.³⁴

Okrem dielektrických tekutín sú environmentálnou záťažou aj prachy ktoré vznikajú pri výrobe nástrojových elektród z grafitu a medi. Prachové častice sa odstraňujú pomocou filtračných zariadení.

4.3 Ekologická náročnosť u LBM

Pri obrábaní laserom dochádza k taveniu materiálu pričom vznikajú plynné spaliny (uhl'ovodíky, aldehydy atď), aerosoly a prachy ktoré negatívne vplyvajú na pracovné prostredie, laserové stroje sú vybavené odsávacími zariadeniami a filtrami ktoré minimalizujú znečistenie pracoviska týmito látkami. Ďalšie nebezpečné látky vznikajú pri tepelnom rozklade šošoviek laseru, pri poškodení treba šošovku okamžite vymeniť.

4.4 Ekologická náročnosť u PBM

Podobne ako u LBM vznikajú pri horení plynné spaliny, aerosoly a prachové častice, okrem tých však vzniká aj škodlivé UV žiarenie.

K odlúčeniu tuhých emisií zo vzduchu vzniknutých pri delení materiálu slúžia odsávacie filtre, ktoré sú uložené v blízkosti stroja a filtrujú častice do veľkosti 1 μ m.



Donaldson DFPRO-odsávacie filtre sú perfektne konštruované pre odsávanie prachu a dymu pre najrozličnejšie použitie ako rezanie plazmou, autogénom alebo laserom. Oválne filtračné médiá v DFPRO-odsávacích filtroch zabezpečujú efektívnu, kompaktnú a hospodárnu filtráciu.

Technická špecifikácia

max. výkon	m ³ / h	max. 12000
napájacie napätie/menovitý výkon V(AC)		400-3Ph-50Hz / 15 KW
hlučnosť	dB(A)	82 in 1m od miesta výfuku
max. prevádzková teplota	°C	65
emisie	mg / m ³	<< 1
hlučnosť odsávania	dB(A)	< 75 + 10 prídavok impulzov
prevádzkový tlak	Pa	+/- 5000
váha	>(kg)	Ca. 2200
ochranné prevedenie		voliteľne
lakovanie		RAL 5019 polomatný
umiestnenie vonku		voliteľne

Obr. 16. Príklad filtračného odsávacieho zariadenia výrobcu Microstep³⁵

4.5 Ekológia chemického obrábania

Chemické a fotochemické obrábanie je kvôli použitiu pracovných pracovných kyselín a hydroxidov ako sú HNO_3 , HF, NaOH, H_2SO_4 enviromentálne najnáročnejšie. Po použití sa musia kyseliny zlikvidovať.

Chemikálie sa môžu uskladňovať do uzatvorených kontajnerov, prípadne sa riedia a neutralizujú protolytickými reakciami pričom kyselina reaguje so silnou zásadou alebo vodou. Jednou z možností neutralizovania kyseliny H_2SO_4 je napríklad protolytické neutralizovanie pomocou hydroxidu sodného (NaOH) ktorý je zmiešaný s vodou pričom sa pomaly pridáva do kyseliny až kým sa dosiahne neutrálne pH. Medzi ďalšie protolytické reakcie patrí disociácia a autoprotolýza. Manipulácia s kyselinami si vyžaduje použitie ochranných prostriedkov, pri kontakte obsluhy s kyselinou dochádza k popáleniu, súčasne dochádza k vylučovaniu aerosolov

4.6 Ekológia obrábania ultrazvukom

Obrábanie ultrazvukom nepatrí medzi environmentálne náročné technológie, použité abrazívo je možné recyklovať ako bolo popísané v kapitole 4.1.

ZÁVER

Úlohou bakalárskej práce bolo zo všetkých aspektov posúdiť, zhrnúť a opísať netradičné metódy obrábania materiálov.

V úvodnej časti sú popísané základné fyzikálne princípy každej z metód obrábania materiálov. Práca vychádzala z preskúmania dostupnej literatúry s problematikou zameranou na moderné metódy, ich súčasné využitie a technologické možnosti, vďaka ktorým získali dnes už nezastupiteľné miesto v strojárскеj výrobe. Nekonenčné metódy patria medzi najprogressívnejšie a ich podiel vo výrobe bude ďalej narastať. V kombinácii s CNC a riadiacimi systémami sú napríklad pri vysokorýchlostnom laserovom dierovaní strojné časy neporovnateľne kratšie ako pri konvenčných metódach. V súčasnosti sa zvyšujú možnosti aplikácie využitím viac, až 6-osých systémov. Ďalšia z výhod je možnosť obrábania širokého spektra materiálov ktoré nie sú konvenčnými metódami hospodárne obrobiteľné v kratších časoch a pri nižších nákladoch. Každá firma, ktorá chce aplikovať jednu z netradičných metód musí zväžiť jednotlivé ekonomické faktory, ako sú cena stroja, alebo prevádzkové náklady, čím sa zaoberá tretia časť práce. V poslednej časti sa zaoberáme ekologickým posúdením jednotlivých metód. V súčasnosti sa vo svete neustále sprísňujú normy, pričom sa štátne orgány snažia zmierniť negatívny vplyv technológii na životné prostredie. Odstraňovanie, recyklácia a uskladňovanie nebezpečných látok je pomerne finančne náročný proces a preto je v súčasnej dobe veľmi dôležité aby bola pozornosť venovaná aj tejto problematike.

Z prieskumu bolo zistené že medzi environmentálne najnáročnejšie technológie patria chemické, laserové, elektroerozívne alebo plazmové, naopak medzi najčistejšie technológie patria tie, ktoré využívajú k obrábaniu vodný papyrus pričom je výhodné recyklovať použité abrazívum.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. Introduction of Unconventional Manufacturing Process. In *CLASSIFICATION OF UNCONVENTIONAL MANUFACTURING PROCESSES* [online]. [s.l.] : Newsagepublishers, 2004 [cit. 2011-04-05]. Dostupné z WWW: www.newagepublishers.com/.
2. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologic:Advanced methods of material removal*. 1.vyd. Košice: Viena, 2000 275 s. ISBN 80-7099-430-4
3. *CNC Machines* [online]. 2008 [cit. 2011-03-25]. Laser cutter. Dostupné z WWW: <<http://cnc-machine-center.blogspot.com/2008/09/laser-cutter.html>>.
4. Technologie I: *Technologie obrábění - 3.část* [online]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
5. Applications of LBM. In *Laser beam machining—A review* [online]. [s.l.] : [s.n.], 2007 [cit. 2011-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com/>>.
6. Nekonenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, MM 2007 / 10, [cit. 2011-03-26]. Dostupný z WWW: <. <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni>>.
7. General Description of Electrochemical Machining. In *Electrochemical Machining* [online, 2004 [cit. 2011-03-27]. Dostupné z WWW: http://www.home-machine-shop.com/Down-Load/Electrochemical_Machining.pdf
8. Archivesmse.org [online]. 2007 [cit. 2011-05-02]. *Chemical machining*. Dostupné z WWW: <http://www.archivesmse.org/vol28_8/28810.pdf>.
9. Nptel [online]. 2005 [cit. 2011-03-28]. Ultrasonic Machining (USM). Dostupné z WWW: <<http://nptel.iitm.ac.in/>>.
10. KRAJNÝ, Zdenko Vodný lúč v praxi- WJM. Bratislava : EPOS, 2001. 384 s. ISBN 80-8057-091-4
11. BRYM, Radek. TRENDY VÝVOJE OBRÁBENÍ VODNÍM PAPERKEM. Brno, 2008. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
12. Water jet cutting. India *Abrasive water jet* [online]., 2004 [cit. 2011-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://nptel.iitm.ac.in/courses/>>.
13. *Laser-cutting* [online]. 2003 [cit. 2011-04-02]. Precision laser cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.laser-cutting.djmetalrep.com/>>.

14. *Obrábanie materiálov*. Strojárstvo extra [online]. 2007, 2, [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.strojarstvo.sk/docwww/SK/265/265.pdf>>.
15. *Jenoptik* [online]. Nemecko 2009 [cit. 2011-04-06]. Processing-systems-lasermachines-automotive. Dostupné z WWW: <<http://www.jenoptik.com/en-laser-processing-systems-lasermachines-automotive>>.
16. ByStronic [online]. 2010 [cit. 2011-04-07]. *Innovative top technology, highest productivity*. Dostupné z WWW: <<http://www.bystronic.com/com/>>.
17. POSSIBILITIES OF COST EFFECTIVE PLASMA CUTTING APPLICATION. In 16. *Advanced Technologies for Developing Countries* [online]. Chorvátsko : [s.n.], 2007 [cit. 2011-04-08]. Dostupné z WWW: <<http://bib.irb.hr/datoteka/203766.307-312.pdf>>.
18. JAKEŠ, JAN. *TRENDY POUŽITÍ ELEKTROEROZIVNÍCH TECHNOLOGIÍ* [online]. Brno, 2008. 54 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické Brno.
19. BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 1989. 122s. Číslo publikace: 6523
20. Wikipedia [online]. 2003 [cit. 2011-04-11]. *Turbine blade*. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:GaTurbineBlade.svg>>.
21. *Odstraňování otřepů*. MM Spektrum [online]. 2007, 10, [cit. 2011-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2>>.
22. Mastercut [online]. 2006 [cit. 2011-05-02]. *Electrochemical machining*. Dostupné z WWW: <http://www.mastercut.com.au/images/IMG_2097.JPG>.
23. Properties of Cutting Surface. In *Ultrasonic Vibration-Assisted Cutting of Titanium Alloy* [online]. Japonsko : Shizuoka Institute of Science and Technology, 2007 [cit. 2011-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.aspe.net/publications/Spring_2007/Spr07Ab/2082-Koshimizu.pdf>.
24. Abrasive water jet (AWJ) drill. In *A COMPARISON OF WATER JET, ABRASIVE JET AND ROTARY DIAMOND DRILLING* [online]. [s.l.] : [s.n.], 1999 [cit. 2011-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.tempresstech.com/book_shelf/3.pdf>.
25. An efficient method to profile and dress grinding wheels. In *Abrasive water jet turning* [online]. UK : Faculty of Engineering ,University of Nottingham, 2008 [cit. 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.

26. *Frézování a gravírování nekonvenční technologií* AWJ. *MM Spektrum* [online]. 2007, 4, [cit. 2011-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>>.
27. Leštění povrchu laserem. *MM Spektrum* [online]. 2009, 4/2009, [cit. 2011-05-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lesteni-povrchu-laserem>>.
28. Media.thefabricator.com [online]. 2007 [cit. 2011-05-08]. *Laser maintenance*. Dostupné z WWW: <<http://media.thefabricator.com/assets/pdf/Maintenance-NL.pdf>>.
29. Piskovacky.cz [online]. 2008 [cit. 2011-05-08]. *Syntetické Abrasiva*. Dostupné z WWW: <<http://www.piskovacky.cz/abrasiva-synteticka.php>>.
30. Mechanism of chemical-assisted ultrasonic machining. In *Chemical-assisted ultrasonic machining of glass* [online]. USA : [s.n.], 2007 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
31. Industry.net [online]. 2005 [cit. 2011-05-12]. *Zařízení pro recyklaci abrasiva AQUArec PRO*. Dostupné z WWW: <<http://www.industry.net.cz/ArticleDetail.asp?nBranchID=0&nArtID=85&nPage=46>>.
32. Proven Application. In *Waterjet abrasive recycling can slash operating costs* [online]. USA : [s.n.], 2007 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.thefreelibrary.com>>.
33. Effect of recycling of abrasives on AFS. In *A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining* [online]. India : [s.n.], 2004 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
34. EDM with gaseous dielectrics. In *A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining* [online]. Velká Británie : [s.n.], 2003 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <www.sciencedirect.com>.
35. Microstep-group.com [online]. 2008 [cit. 2011-05-12]. Donaldson DFPRO. Dostupné z WWW: <<http://www.microstep-cdm.sk/sk/produkty/filtracna-technika/stacionarne-filtre.aspx?Page=3>>.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

Skratka/Symbol	Jednotka	Popis
AWJ	-	obrábanie vodným lúčom
EDM	-	elektroerozívne obrábanie
ECM	-	elektrochemické obrábanie
LBM	-	obrábanie lúčom laseru
CHM	-	chemické obrábanie
USM	-	ultrazvukové obrábanie
WJM	-	obrábanie paprskom vody
PBM	-	obrábanie lúčom plazmy
PCM	-	fotchemické obrábanie
R _a	µm	stredná aritmetická hodnota drsnosti