

Možnosti dělení materiálů plazmovým obloukem

Jakub Měrka

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub MĚRKA**
Osobní číslo: **T08565**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Možnosti dělení materiálů plazmovým obloukem**

Zásady pro vypracování:

- 1. Uvedte teorii a technologii nekonvenčních metod obrábění**
- 2. Popište metody hodnocení jakosti povrchů**
- 3. Provedte experimentálně řezání různých materiálů**
- 4. Vyhodnoťte vliv technologických podmínek na jakost**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Bumbálek, L. aj.: **Kontrola a měření. Informatika Praha, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9**
2. Lukovics, I.: **Konstrukční materiály a technologie. NVUT Brno, 1991. ISBN 80-214-0399-3**
3. Maňková, I.: **Progresivné technologie. Viena Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4**
4. Neslušan, M. aj.: **Exmerimentálne metódy v trieskovom obrábání. ŽU Žilina, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8**
5. Ptáček, L. aj.: **Nauka o materiálu. CERM Brno, 2009. ISBN 80-7204-193-2**

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**

Ve Zlíně dne 10. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Měrka Jakob.....

Obor: TZ.....

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 2. 8. 2012.....


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací;

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá obráběním nekonvenčními technologiemi a vlivem technologických parametrů na obráběné plochy. Zkoumá vliv řezné rychlosti na přesnost obrobeného dílce a jakost jeho povrchu. V práci jsou zpracovány obecné teoretické poznatky o nekonvenčních metodách obrábění, dále se pak podrobněji zaměřuje na obrábění pomocí plazmového paprsku.

Klíčová slova:

Nekonvenční technologie, plazmové obrábění, plazma

ABSTRACT

This work is concerned with unconventional technologies and the influence of technological parameters on the machined surface. It examines the influence of cuttingspeed on precision machined parts and the quality of its surface. In this thesis a general theoretical understanding of unconventional machining methods, further detail is then focused on working with the plasma beam.

Keywords:

Unconventional technologies, plasma cutting, plasma

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady, ochotu a vynaložený čas v průběhu vedení této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Ovsíkovi za jeho volný čas při asistenci u manipulace s měřicím zařízením.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	12
1.1 ODLIŠNOSTI V POROVNÁNÍ S KLASICKÝMI TECHNOLOGIEMI.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ	14
1.3 SMĚRY VYUŽÍVÁNÍ NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	14
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ	16
2.2 ROZDĚLENÍ ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ.....	19
2.2.1 Elektrojskrové obrábění	19
2.2.2 Elektrokotní obrábění.....	20
2.2.3 Anodomechanické obrábění	21
3 CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ	22
3.1 ECM - ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (ELECTROCHEMICAL MACHINING)	22
3.2 CM - CHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ (CHEMICAL MACHINING)	22
4 USM-ULTRAZVUKOVÉ OBRÁBĚNÍ (ULTRASONIC MACHINING)	24
4.1 PRINCIP METODY	24
4.2 NÁSTROJE	26
4.3 POUŽITÍ METODY	27
4.4 DOSAHOVANÉ PARAMETRY	28
5 PAPRSKOVÉ METODY OBRÁBĚNÍ	30
5.1 LBM-OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM FOTONŮ-LASEREM (LASER BEAM MACHINING).....	30
5.1.1 Rozdělení laserů.....	31
5.1.2 Použití laserů	32
5.2 EBM-OBRÁBĚNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ (ELECTRON BEAM MACHINING)	34
5.3 WJM-OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM (WATER JET MACHINING).....	35
5.4 AJM-OBRÁBĚNÍ ABRAZIVNÍM PAPRSKEM (ABRASIVE JET MACHINING)	36
5.5 PAM-OBRÁBĚNÍ PLAZMOVÝM PAPRSKEM (PLASMA ARC MACHINING).....	37
5.5.1 Plazma a princip metody	37
5.5.2 Zařízení pro obrábění materiálu plazmatem.....	38
5.5.3 Používané plyny	39
5.5.4 Řezání plazmatem	40
5.5.5 Svařování plazmatem	42
6 JAKOST POVRCHU	45
6.1 HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU.....	45
6.2 DRSNOST POVRCHU	46
6.2.1 Posuzování drsnosti povrchu	47

6.2.2	Metody měření drsnosti povrchu	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
7	CHARAKTERISTIKA VZORKŮ A POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ.....	52
7.1	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL A JEHO CHARAKTERISTIKA	52
7.2	ZAŘÍZENÍ PRO PLAZMOVÉ OBRÁBĚNÍ.....	53
7.3	ZAŘÍZENÍ PRO VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	54
8	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ PLAZMOVÝM PAPRSKEM.....	56
8.1	VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI U OCELI 11 375.....	56
8.2	VYHODNOCENÍ STRUKTURY A TVRDOSTI U OCELI 11 375.....	67
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM TABULEK	75

ÚVOD

Nekonvenční metody nám umožňují využití tam, kde při výrobě některých druhů součástí, především tvarově složitých z těžko obrobitelných materiálů. Proto je tento postup výroby nejvhodnější, protože klasickými technologiemi bychom tyto materiály těžko obráběli a některé tvary ani nevyrobili. Nekonvenční metody umožňují provádět složité technologické operace s využitím mechanizace a automatizace výrobních pochodů. Umožňují zvýšení technologičnosti konstrukce, sériovosti výroby, omezení počtu zmetků a snížení pracnosti daných operací.

Mezi tyto progresivní technologie se také řadí obrábění paprskem plazmy. Plazmové způsoby řezání se začaly používat začátkem 50. let jako alternativní způsoby řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů místo řezání kyslíkovým plamenem. V dnešní době patří mezi nepostradatelné technologie v nejrůznějších oblastech zpracování materiálů, jako je např. nanášení povlaků, svařování, řezání kovových i nekovových materiálů a v neposlední řadě obrábění pomocí plazmového paprsku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Vývojové trendy ve světové technice nutí k účinnému využívání základních poznatků přírodních věd k vytváření interdisciplín vznikajících osamostatňováním nebo slučováním různých vědních oborů. Tyto nové poznatky většinou vyžadují využití nových materiálů se zvýšenými fyzikálně mechanickými vlastnostmi (zvláště pevností a tvrdosti). Obrábění těchto materiálů běžnými (konvenčními) technologiemi je neproduktivní a většinou také prakticky nemožné. Takové materiály obrábíme tzv. nekonvenčními technologiemi, metodami založenými na jiném než mechanickém způsobu oddělování třísky. [1]

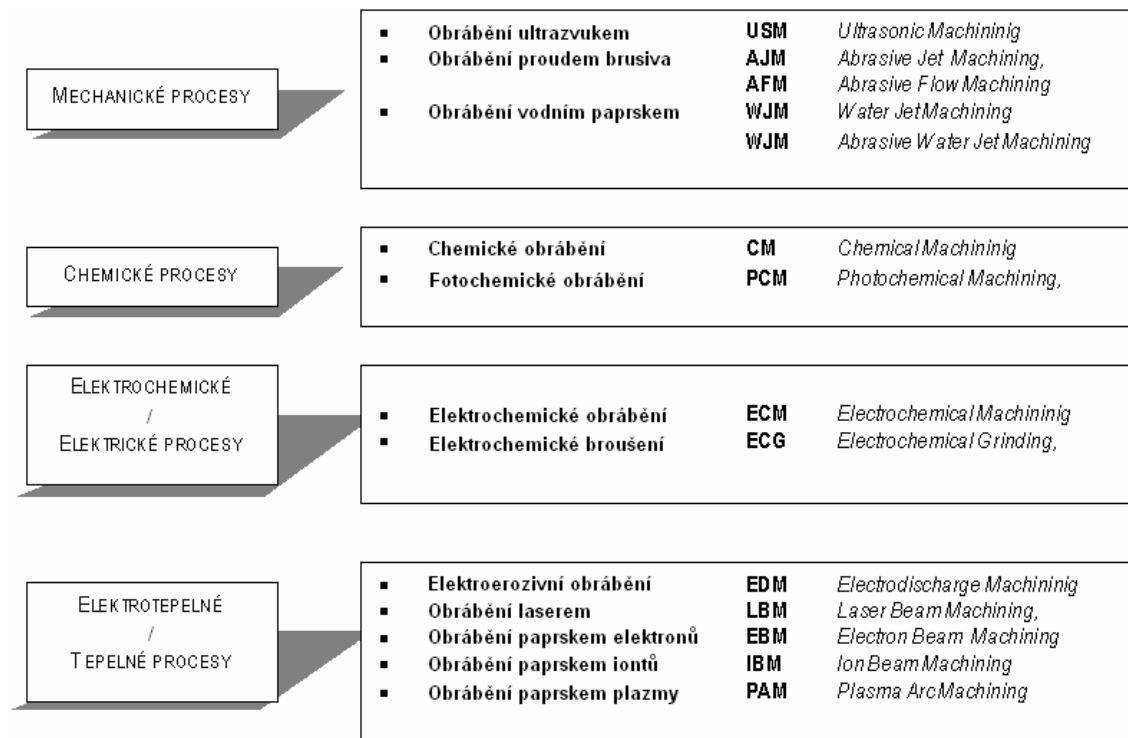
- Výrobní technologie, které využívají známé fyzikální a chemické jevy na úběr materiálu (akustické vlnění, vysokotlakový vodní paprsek, plazmu, tok fotonů – laser, elektrický výboj, elektrolýzu, tok elektronů a iontů. [3]
- Název progresivní způsoby úběru materiálu nebo progresivní způsoby obrábění se používá pro širokou škálu mechanických, elektrických, tepelných a chemických procesů při úběru (odstraňování) materiálu, které byly vyvinuté převážně po roce 1940. [3]
- Stručnou definici progresivních (netradičních, nekonvenčních) technologií je těžké zavést, kvůli široce rozdílným procesům, které do této kategorie patří. V odborné literatuře panuje shoda v tom, že do této skupiny patří procesy zavedené za posledních 60 let 20. století, které používají běžné formy energie novým způsobem nebo používají energii, která nebyla nikdy předtím použita. [3]
- Původně byly tyto způsoby úběr určeny pro zvláštní použití, které nebylo extenzivně šířené. V současnosti je však toto konstatování zavádějící. I když většina těchto metod byla vyvinuta pro řešení speciálních úkolů v leteckém a kosmonautickém průmyslu v letech 1950 a 1960, dnes většina z nich nachází uplatnění v rozličných průmyslových odvětvích. [3]

1.1 Odlišnosti v porovnání s klasickými technologiemi

- V místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor, řezná síla, obrobky se nedeformují vlivem mechanického zatížení. [3]

- Úběr materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech materiálů jako je třeba tvrdost, pevnost, houževnatost a klasický pojem obrobitelnost ztrácí svůj význam. [3]
- Úběr materiálu – oddělování částic je po čas jednoho cyklu (např. jeden cyklus výboje při elektrojiskrovém opracování) a dochází k němu na velkém počtu lokalit současně. V závislosti na rozměrech odebíraných částic může být úběr materiálu vyjádřen jedno, dvoj nebo trojrozměrnými hodnotami tj. délkou, plochou, průřezem nebo objemem. [3]
- Opracovává se celý povrch obrobku naráz.
- Maximální velikost obrobku je limitovaná energetickou základnou zařízení (10^2 - 10^3 kW)
- Možnost mikroobrábění a dosahování „nano“ 10^{-9} mm rozměrů.
- Z místa úběru materiálu přechází méně tepla do hmoty obrobku, protože:
 - oddělování částic je mikrorozměrové a dochází k němu na velkém počtu lokalit
 - frekvence elementárních úběrů je vysoká
- Řeší problémy spojené s opotřebením nástroje při řezání a broušení.
- V porovnání s klasickými procesy vykazují vyšší spotřebu energie při úběru materiálu a o hodně nižší poměrný úběr.

1.2 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění



Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění [3]

1.3 Směry využívání nekonvenčních technologií

- Využívání elektrické, tepelné, chemické a elektrochemické energie na podporu klasických procesů opracování s nástroji jako geometrickým tělesem, které snižují intenzitu jeho opotřebení. [3]
- Využívání mechanické, elektrické, tepelné, chemické a elektrochemické energie v soustředěném energetickém svazku na opracování materiálů bez použití nástroje jako geometrického tělesa, nebo s podporou nástroje jako geometrického tělesa bez jeho aktivní účasti na procesu úběru materiálu. [3]
- Využívání progresivních technologií řeší požadavky na zpracování těžkoobrobitelných konstrukčních materiálů, kde jsou kladeny nároky na:
 - vysokou pevnost a tvrdost materiálů, obvykle nad 400HB.

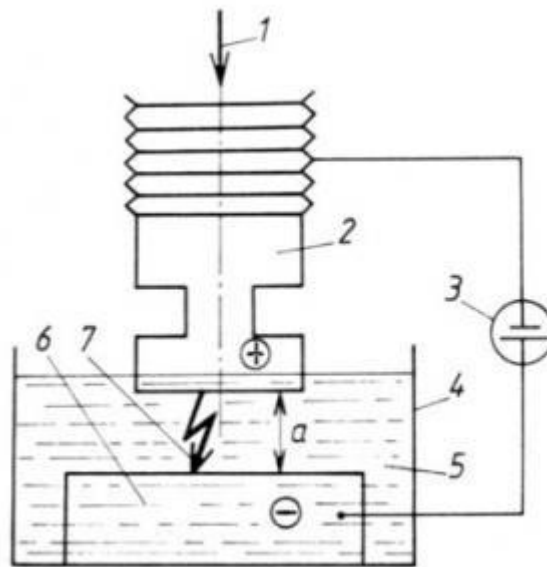
- opracování tenkostěnných a poddajných materiálů, kde působí řezné síly při mechanickém opracování (broušení, řezání, tváření) může mít za následek jejich deformaci.
- složitost tvaru dílců, která způsobuje problémy při jejich upínání
- přesnost a tolerance rozměrů, na drsnost dokončovaných povrchů (požadavek zrcadlově lesklých povrchů s optickou přesností).
- integrita povrchů s cílem vyloučit nežádoucí tepelné ovlivnění povrchových vrstev a vznik zbytkových napětí pod povrchem.

2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

2.1 Princip metody a použití

Elektroerozivní obrábění je proces, u kterého se dosahuje úběru materiálu elektrickými výboji mezi anodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a katodou (nejčastěji ji tvoří obrobek) ponořeného do tekutého dielektrika, což je většinou kapalina s vysoce elektrickým odporem. Elektroerozivním obráběním lze opracovávat pouze elektricky vodivé materiály. [4]

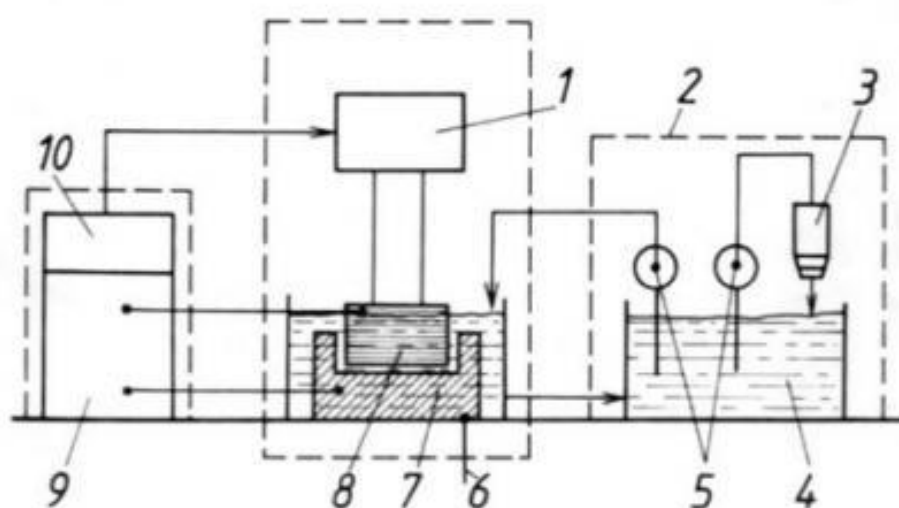
Elektrickou erozi nazýváme fyzikální jev, založený na odebrání částicek povrchových vrstev materiálů účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Doprava těchto částicek z místa řezu se děje prouděním elektrolytu. [1]



*Obr. 2 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění
1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor, 4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj [4]*

Jako dielektrikum se nejčastěji používají strojní oleje, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda nebo speciální dielektrika dodávaná výrobcem strojů.

Využití u hloubení dutin záпустek a forem. Moderní stroje mají všechny činnosti řízeny CNC řídicím systémem. Konkrétně se jedná o řízení směru a rychlosti pohybů, polohy pracovního stolu, pracovních parametrů generátoru, přívodu dielektrika, automatické výměny elektrod v zásobníku, rychlosti přísuvu elektrody a kontrolu probíhající elektroeroze. Řídicí systémy umožňují snadné naprogramování stroje. Postup úběru materiálu lze simulovat na obrazovce. Elektroerozivní stroje pro hloubení dutin se vyrábějí také v provedení, které umožňuje bezobslužný provoz až po dobu 48 hodin. Jednotlivé technologické aplikace vyžadují různé formy elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu a na obrobek přiváděny z generátoru ve formě pulzů o určité frekvenci. Každý pulz je charakterizován napětím, proudem a tvarem. [4]



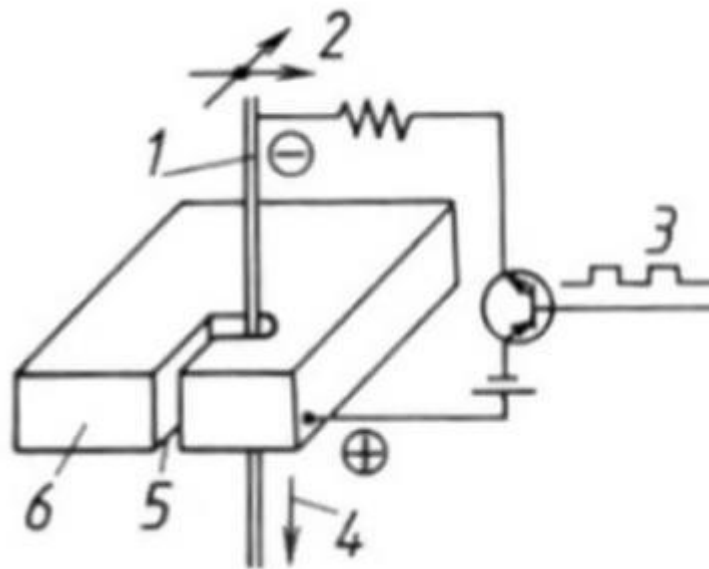
Obr. 3 Schéma elektroerozivního stroje

*1 – pracovní hlava, 2 – filtrační zařízení, 3 – filtr,
4 – dielektrikum, 5 – čerpadlo, 6 – pracovní stůl,
7 – obrobek, 8 – nástrojová elektroda, 9 – generátor,
10 – CNC řídicí systém [4]*

Jako nástroje se u elektroerozivního obrábění používají nástrojové elektrody, které jsou důležité z hlediska technického (určují přesnost rozměrů, jakost obrobené plochy a výkon obrábění) i ekonomického. Nástrojová elektroda se navrhuje a konstruuje pro každý případ obrábění samostatně. Náklady na její zhotovení činí až 50 % z celkových výrobních nákladů. Důležité je volit velmi pečlivě materiál, způsob výroby a také způsob upínání ve vřetenu podle použitého stroje, u strojů s automatickou výměnou elektrod také uložení a identifikaci elektrody v zásobníku nástrojů.

Kvalita povrchu opracované plochy je dána její drsností a také jejím stavem, tzn. složením. Dosahovaný úběr materiálu obrobku činí 8 až 10. Výroba složitých tvarových povrchů se od hloubení dutin zápusťek a forem technologicky liší v provedení nástrojové elektrody a ve tvaru obráběného povrchu. Obráběný povrch je tvořen vnějším tvarem, drážkou nebo průchozí dírou. Obrábění složitých tvarových povrchů je možné při použití stroje s CNC řídicím systémem s více řízenými souřadnými osami

U řezání drátovou elektrodou platí stejné fyzikální zákonitosti elektrické eroze jako u hloubení. Metoda umožňuje vyrábět plochy mající přímku jako tvořící křivku. Stroj pro elektroerozivní řezání drátovou elektrodou tvoří obdobné hlavní skupiny jako stroje pro hloubení. Rozdíl je v nástrojových elektrodách a v systému podávání a vedení drátové elektrody. Nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát. Aby se předešlo jeho nadměrnému opotřebení, odvíjí se pomocí speciálního napínacího mechanismu. Drát je většinou měděný, pro větší průměry se používá mosazný a na velmi jemné řezy molybdenový. Nástrojová elektroda tvořená drátem je nástroj, který může odebírat materiál v každém směru a ve spojení s vhodným řídicím systémem je možné přesně obrábět i velmi složité tvary. [4]

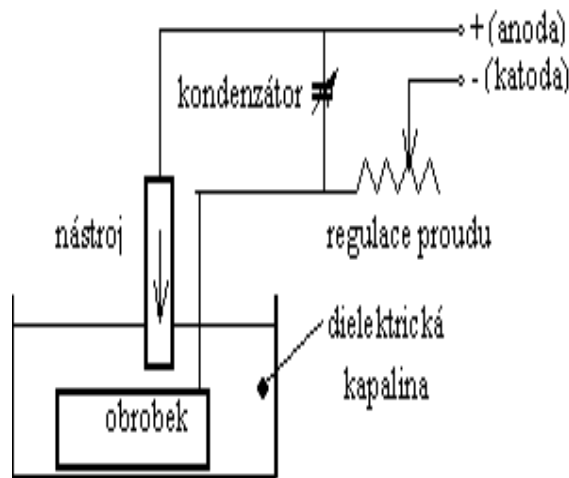


Obr. 4 Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou
 1-drátová elektroda, 2-CNC řídicí systém, 3-generátor,
 4-směr posuvu elektrody, 5- řez obrobkem [4]

2.2 Rozdělení elektroerozivního obrábění

2.2.1 Elektrojiskrové obrábění

Elektrojiskrové obrábění je založeno na plynulém oddělování miniaturní třísky v důsledku impulsního elektrického výboje mezi dvěma elektrodami. Nástroj je připojen ke katodě, obrobek k anodě. Elektrický výboj uvolní z obrobku částici materiálu, která se pohybuje k nástroji. Aby se na nástroj nepřivařila, probíhá výboj v dielektrické kapalině, která částici ochladí, případně odplaví. Jestliže se součásti přiblíží k sobě na určitou vzdálenost, napětí se vybije a přeskočí jiskra. V místě jiskry se kov zahřeje tak silně, že se roztaví. Nespočet jisker srší jedna za druhou (nikdy současně), a postupně tvarují požadovanou formu kovového obrobku. Pro účinné obrábění musí přeletět několik set tisíc takových jisker za sekundu. Pokud se provede série výbojů, vytvoří se několik kráterů, jeden vedle druhého, čímž se dosáhne neustálého odebrání materiálu na povrchu obráběné součásti.



Obr. 5 Schéma naznačení výroby díry v obrobku [4]

Metoda se užívá při výrobě zápusťkových dutin, průvleků, průstřížnic, trysek, při odstraňování nástrojů (vrtáků, závitníků) zlomených v dírách.

Tvar nástroje je negativem tvaru vytvářené dutiny. To znamená, že například při zhotovování válcové díry je nástrojem válcová tyčinka (drát). Také při vyjiskřování zlomených vrtáků a závitníků je nástrojem drát vhodného průměru.

Materiálem nástroje je nejčastěji měď, mosaz nebo grafit. Pracovní kapalinou je petrolej nebo transformátorový olej. Zdrojem impulsního výboje je kondenzátor nebo polovodiče.

Tato technologie umožňuje vyrábět:

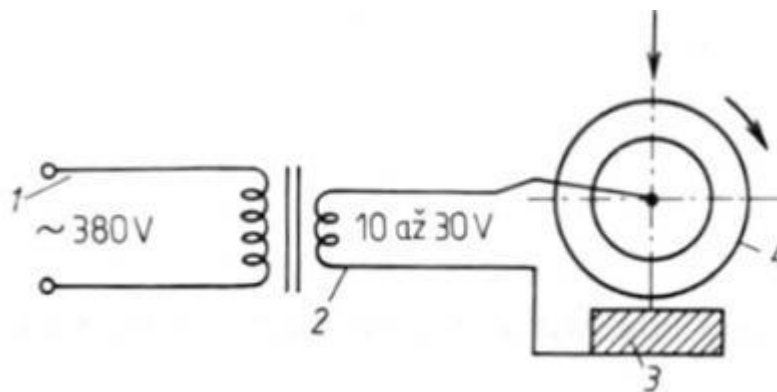
- průchozí díry (trysky, střížnice, úzké štěrby)
- tvarové otvory
- dutiny (kovací zápustky, formy, razidla atd.)
- řezat a vyřezávat tvary

2.2.2 Elektrokotaktní obrábění

Hlavním znakem této elektroerozivní metody obrábění je, že mezi elektrodou a obrobkem dochází při obrábění ke kontaktu. Bez dotyku elektrody (nástroje) a obrobku se proces elektrokotaktního obrábění neuskuteční.

Druhou odlišností od elektrojiskrové metody je, že se používá střídavého proudu. [1]

Nástrojová elektroda vykonává otáčivý pohyb, čímž se dosahuje mechanického buzení kmitů a zabraňuje se svaření nástroje a obrobku. Na nástrojové elektrodě jsou vytvořeny drážky, které zlepšují vyplachování dielektrika.



Obr. 6 Princip zařízení pro elektrokotaktní obrábění

1- napájecí zdroj, 2-transformátor, 3-obrobek, 4-nástroj (elektroda) [4]

Obvodová rychlost kotouče bývá 20 až 60 m.s⁻¹. Úbytek kotouče nastává hlavně na jeho okrajích, což ovlivňuje přesnost. Dosahuje se drsnosti povrchu $R_a=6,3\mu\text{m}$.

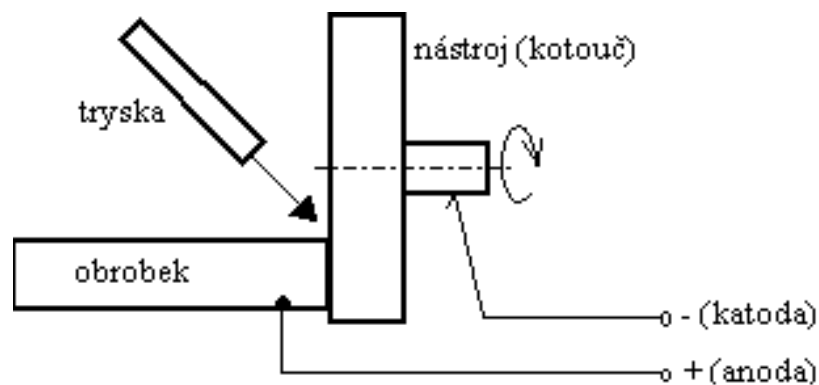
Použití elektrokotaktní metody je nejvýhodnější pro hrubovací práce a řezání na těžko obravitelných materiálech. Se zřetelem na uvolněné velké množství tepla je metoda vhodná pro obrobky větších rozměrů, aby nedocházelo k jejich přehřátí a tepelným deformacím. [1]

2.2.3 Anodomechanické obrábění

Princip metody spočívá v tom, že obrobek je zapojen na kladný pól (anoda) stejnosměrného proudu a malou silou přitlačován k hladkému povrchu rotujícího kotouče (záporné elektrody). Do místa styku obou elektrod se přivádí elektrolyt, který vytváří pasivační vrstvu, bránící, přímému kontaktu obrobku s nástrojem. Rotující kotouč stírá vytvořený anodový film pouze v místě obrábění. Na tomto místě dochází na mikrovývšeninách obrobku k jiskrovým výbojům a ke vzniku malých elektrických oblouků, které rozrušují obráběný materiál svým tepelným a tlakovým účinkem. Rozrušený materiál je z místa obrábění odváděn povrchem kotouče. Přiváděnou kapalinou se anodový film stále obnovuje a výboje opakují.

Čím je vyšší napětí, tím je výkon obrábění větší, ale současně se zvyšuje drsnost. Dosažovaná drsnost bývá $R_a=12,6\mu\text{m}$. [1]

Anodomechanické metody obrábění se používají k dělení materiálů, zejména houževnatých ocelí, cementovaných a kalených ocelí, žáruvzdorných a magnetických slitin v energetice, k čištění znečištěných ocelolitinových odlitků od nekovových částic.



Obr. 7 Schéma broušení kotouče

3 CHEMICKÉ A ELEKTROCHEMICKÉ OBRÁBĚNÍ

3.1 ECM - Elektrochemické obrábění (Electrochemical Machining)

Principem elektrochemického obrábění je rozpouštění materiálu obrobku v elektrolytu. Nejjednodušším způsobem je leštění povrchu obrobku. Obrobek je připojen na anodu, katoda je nerozpustná (například grafitová). Drobné výstupky na povrchu obrobku na sobě koncentrují elektrický náboj a proto se zde materiál rozpouští rychleji než v prohlubních.

Při řezání a broušení se jako nástroje užívá otáčející se kotoučové katody. Do místa jejího styku s obrokem je přiváděn elektrolyt, ve kterém je rozptýleno práškové brusivo. Nástroj tak stírá elektrochemicky narušenou vrstvu materiálu obrobku.

Při výrobě dutin v obrobku je nástrojem elektroda, jejíž tvar je negativem žádaného tvaru dutiny. Nástroj se plynule přibližuje k obrobku, do prostoru mezi nástroj a obrobek je přiváděn proud elektrolytu, který stírá elektrochemicky narušenou vrstvu na obrobku. [1]

3.2 CM - Chemické obrábění (Chemical Machining)

Podstatou tohoto způsobu úběru materiálu je odleptávání vrstev materiálu o tloušťce několika setin milimetrů z povrchu obrobku. Při chemickém procesu se leptá kyselinou nebo alkalií. Hliník a jeho slitiny, které se touto metodou nejčastěji obrábějí, odleptáváme v roztoku louhu hydroxidu sodného.

Obrobek se před vlastním rozměrovým leptáním očistí a odmastí v některém odmašťovacím prostředku. Na místa obrobku, která nemají být leptána, se nanáší ochranný nátěr z perchlorvinylovým pryskyřic, polyamidových pryskyřic a speciálních laků na bázi neoprenové pryskyřice. Nanáší se v několika vrstvách. Místo nátěru lze na chráněná místa také přilepit pryžovou masku speciálním tmelem.

Chemické obrábění je ekonomicky výhodné při úběru materiálu malých tlouštěk z obrobků velkých plošných rozměrů a složitých tvarů. Jsou to např. součásti letadel – odlehčené nosníky, odlehčené hliníkové potahy křídel. Je výhodné při obrábění tenkostěnných součástí z plechu, které by se při frézování deformovaly. Nejlépe se tímto způsobem obrábí

hliník, lze ho však také použít pro uhlíkové a nerezavějící oceli, nikl, mosaz, titan apod. U součástí členitých tvarů a větších ploch je rozměrové leptání 5 až 7krát hospodárnější než frézování.

Chemického rozpouštění se používá také pro chemické leštění. Jeho princip je stejný jako chemické obrábění. Využívá se zde intenzivnějšího odleptávání mikrovyvýšenin povrchu obrobene plochy než ostatních jejích částí. [1]

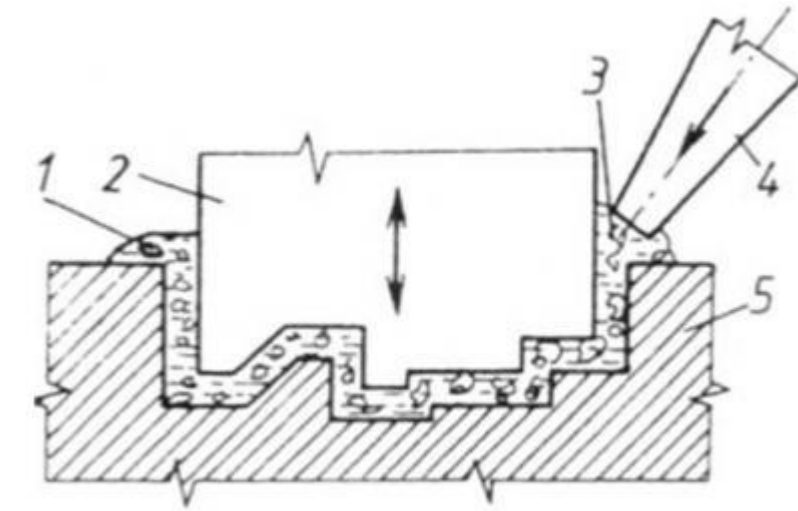
4 USM-ULTRAZVUKOVÉ OBRÁBĚNÍ (ULTRASONIC MACHINING)

4.1 Princip metody

Obrábění ultrazvukem představuje proces, který využívá ultrazvukové vlny s frekvencí okolo 20 kHz na úběr materiálu rozrušováním povrchu nárazovým účinkem rozkmitaného brusiva. [2]

Mezi nástroj a obrobek se přivádí emulze brusiva a vyplavovací kapaliny, čímž je zaručeno postupné odbrušování obrobku. [1]

Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna mezi obráběný povrch a nástroj, který kmitá kolmo k obráběnému povrchu. Zrna jsou nástrojem přitlačována řízenou stálou silou na obráběný povrch, čímž dochází k překopírování tvaru činné části nástroje do obrobku. Nástroj může vykonávat ještě přímočarý posuvný pohyb nebo kombinaci obou pohybů. [5]



Obr. 8 Princip metody pro obrábění ultrazvukem [5]

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

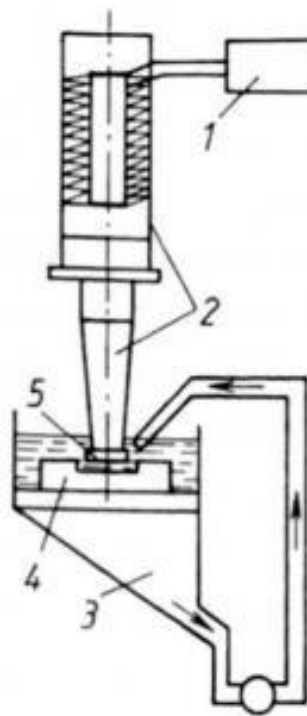
Úběr materiálu je ultrazvukovým kmitáním je vysvětlován dvěma účinky, působícími současně:

-mechanickým

-hydromechanickým

Mechanický účinek spočívá v tom, že brusná zrna přebírají od kmitajícího nástroje kmitavou kinetickou energii, která působí tím, že jejich rázy narušují povrchy jak obrobku, tak také nástroje.

Hydrodynamické účinky se projevují kavitací. Působením ultrazvukových kmitů vznikají krátkodobé impulsy vysokého tlaku kapaliny. Tyto vysokotlaké impulsy způsobují výbuchy drobných plynových bublin, výbuchy působí na brusná zrna, která pak narážejí na obráběný povrch a narušují jej. Kromě kavitačního účinku přítomnost kapaliny zrychluje výměnu opotřebovaných zrn a vyplavení obráběním vzniklých částeczek materiálu. Přítomnost kapaliny také zlepšuje pronikání ultrazvukové energie do místa obrábění. [1]



Obr. 9 Zařízení pro obrábění ultrazvukem [5]

1-generátor ultrazvukových kmitů, 2-systém pro vytvoření mechanických kmitů, 3-přívod brousících zrn a kapaliny, 4-obrobek, 5-nástroj

Generátor ultrazvukových kmitů (1), tj. elektronické zařízení, které mění střídavý elektrický proud o frekvenci 50 Hz na proud o frekvenci 18 až 25 kHz.

Systém pro vytvoření mechanických kmitů (2), který mění elektromagnetické kmitů na mechanické. Využívá se tzv. magnetostrikce, což je vlastnost feromagnetických materiálů měnit při vložení do magnetického pole své rozměry.

System pro přívod brousicích zrn, který řídí přívod brousicích zrn a kapaliny (3) do pracovní mezery, která je mezi nástrojem a obráběnou plochou. Jako kapalina se používá voda, petrolej, lín nebo strojní olej. System musí zaručit dokonalý přívod nových zrn a odvod opotřebených zrn do a z pracovní mezery. Svým kavitačním účinkem zvyšuje kapalina intenzitu úběru materiálu a podle své viskozity tlumí pohyb kmitajících zrn. Používají se brousicí zrna z diamantu, kubického nitridu boru (KBN), karbidu boru, karbidu křemíku (SiC) a kysličníku hlinitého (Al_2O_3). Zrna se při obrábění opotřebovávají, proto je nutné zajistit jejich dokonalou výměnu. [5]



Obr. 10 Stroj pro řezání ultrazvukem [5]

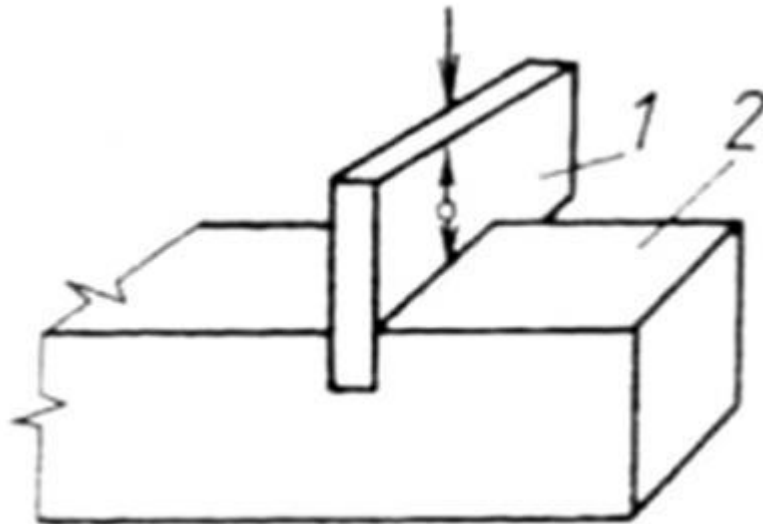
4.2 Nástroje

Nástroje se vyrábějí z konstrukční oceli, korozivzdorné oceli, mědi nebo mosazi. Jejich činná část má tvar obráběné plochy. Nástroje se během obrábění opotřebovávají v závislosti na materiálu obrobku, pracovních podmínkách a materiálu nástroje, proto je nutné kontrolovat provedení opracované části obrobků.

4.3 Použití metody

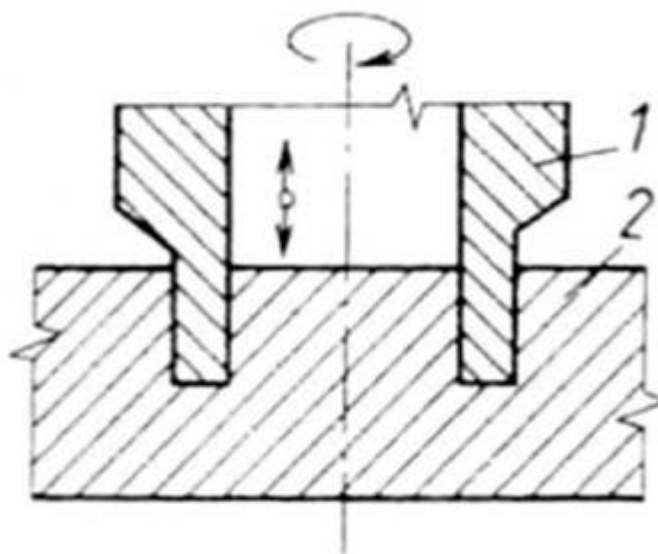
Technologie obrábění ultrazvukem je vhodná pro:

- řezání – používá se pro řezání tyčí křemene, rubínu a dalších tvrdých materiálů o tloušťce do 5 mm, tloušťka nástroje je 0,1 až 0,8 mm.



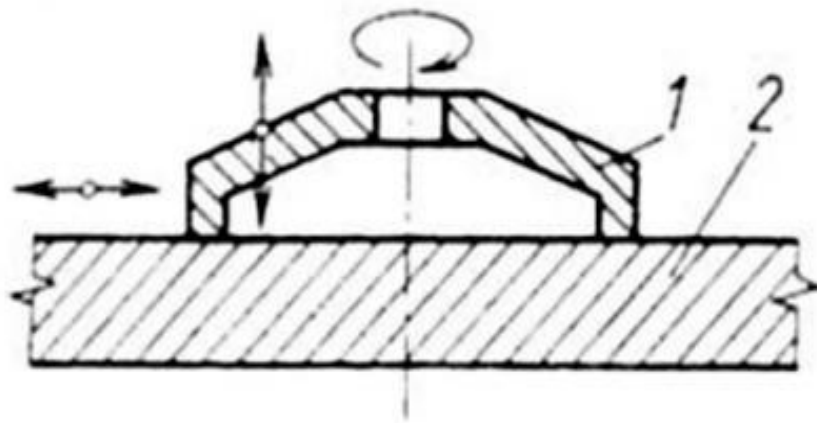
Obr. 11 Řezání ultrazvukovou metodou [5]

- hloubení průchozích otvorů – nástroj má tvar trubky, tloušťka obrobku je maximálně 8 až 10 mm.



Obr. 12 Hloubení průchozích otvorů [5]

- hloubení dutin – používá se zejména při obrábění skla a keramiky, probíhá při vertikálním posuvu nástroje, maximální průměr nástroje 120 mm, maximální hloubka dutiny 4 až 6 mm.
- broušení rovinných ploch – obvykle se realizuje na upravených rovinných bruskách. Broušící kotouč, který má kuželovitý tvar, vykonává rotační pohyb a je rozkmitáván ultrazvukovým generátorem. Úběr materiálu je realizován buď jako broušení s volným brusivem (nástroj z měkké konstrukční oceli) nebo broušení s vázaným brusivem (nástrojem je diamantový kotouč s kovovou vazbou). [5]



Obr. 13 Broušení rovinné plochy [5]

4.4 Dosahované parametry

Obrobitelnost:

- je úměrná tvrdosti a křehkosti obráběných materiálů;
- lze obrábět elektricky vodivé i nevodivé materiály (sklo, křemík, ferity, germanium, keramické materiály, grafit, kevlar, slinuté karbidy, kalené oceli, polodrahokamy, apod.);
- plastické materiály jsou touto technologií neobrobitelné.

Intenzita úběru:

- závisí na:
 - amplitudě kmitů nástroje (při frekvenci 18 až 25 kHz se amplituda pohybuje v rozsahu 30 až 80 μm);
 - velikosti přitlaku nástroje, volí se podle velikosti obráběné plochy, amplitudě kmitů nástroje a velikosti brusných zrn
 - koncentraci brusiva v kapalině
 - druhu brusiva
 - zrnitosti brusiva
 - maximální intenzita úběru materiálu je ve směru kmitání nástroje
 - na bočních plochách nástroje probíhá úběr materiálu s výrazně menší intenzitou
 - objem materiálu obráběného jedním zrnem odpovídá přibližně jeho velikosti
 - počet současně zabírajících zrn závisí na jejich velikosti a koncentraci v kapalině

Kvalita obrobeneé plochy je $R_a = 1,6$ až $0,4$.

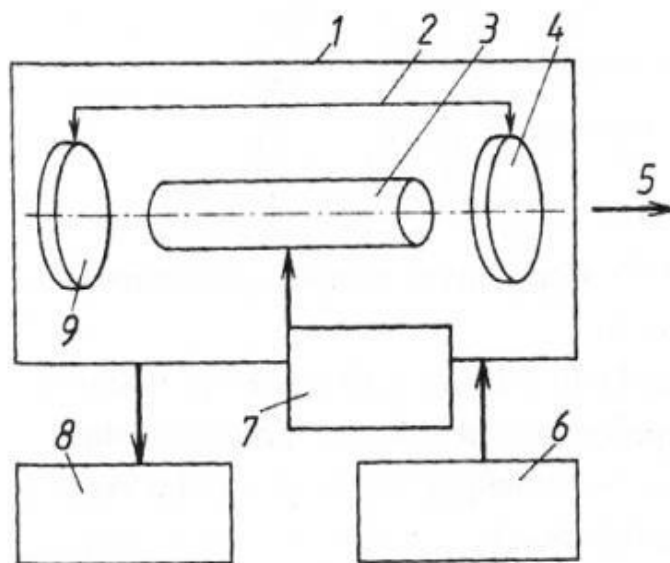
5 PAPRSKOVÉ METODY OBRÁBĚNÍ

5.1 LBM-Obrábění paprskem fotonů-laserem (Laser Beam Machining)

Podstatou tohoto způsobu je soustředění energie, elektromagnetického záření viditelného světla, na malou plošku obrobku. Přeměnou energie tohoto záření na energii tepelnou se místo dopadu zahřeje na teplotu, značně přesahující teplotu tavení obráběného materiálu. Materiál se v místě dopadu taví a vypařuje. Generátorem svazku paprsků světla o velmi vysoké intenzitě je takzvaný laser. [1]

Slovo laser je složené z počátečních písmen anglického názvu popisující jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což by se dalo přeložit jako zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření.

Laser pracuje na principu indukované emise, vynuceného záření. Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, při kterém záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Další příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii do prostoru. Vzniklé záření je monochromatické (tzn. má jednu, přesně definovanou vlnovou délku) a koherentní, což znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují jedním směrem a jsou v jeho průřezu buď stejnoměrně nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny. [6]



Obr. 14 Schéma zařízení pro obrábění laserem [6]

1-laserová hlavice, 2-rezonátor, 3-laserové médium, 4-polopropustné zrcadlo, 5-výstup paprsku, 6-zdroj energie buzení, 7-budící zařízení, 8-chladicí systém, 9-nepropustné zrcadlo

Laserová hlavice obsahuje laserové médium, které určuje délku vlny záření. Jedná se o směs několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je průhledný a má schopnost odvádět vzniklé teplo. Může být pevné, tekuté nebo plynné. Další částí laseru je rezonátor, optický systém, umožňující zformovat a zesílit záření, tj. elektromagnetickou vlnu z něj vycházející. Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti paprsku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky). Optický rezonátor tvoří nejméně dvě zrcadla. Nejčastěji se používají sférická zrcadla. Průměr a zakřivení zrcadel určují rozdělení intenzity záření a energetickou rozbíhavost laserového záření, tj. divergenci paprsku, která je dána rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se šíří. [6]

Budící zařízení, které ovlivňuje pracovní režim laseru. Způsob buzení je dán laserovým médiem. Plynné médium je buzeno téměř vždy elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami. Zdrojem energie buzení je speciální druh síťového napáječe. [6]

Chladicí systém, který odvádí nevyužitou energii, jež se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve, vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). Výrobci laserových zařízení dodávají také speciální chladicí zařízení, u kterých je vnitřní okruh chlazen vzduchem. [6]

5.1.1 Rozdělení laserů

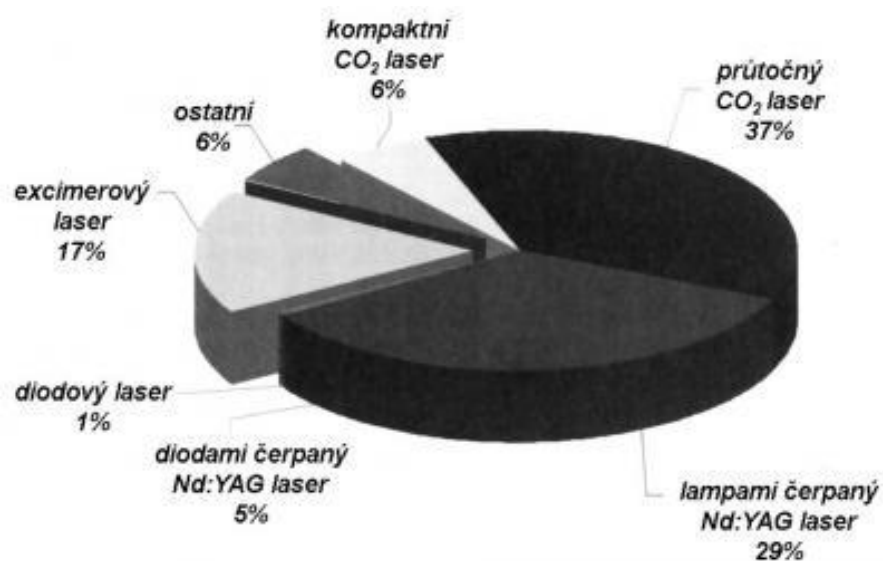
Lasery mohou být klasifikovány podle různých hledisek, např. dle:

- aktivního prostředí (je nejpoužívanější): pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové, plazmatické.
- vlnových délek optického záření, které vysílají: infračervené, viditelného pásma, ultrafialové, rentgenové.

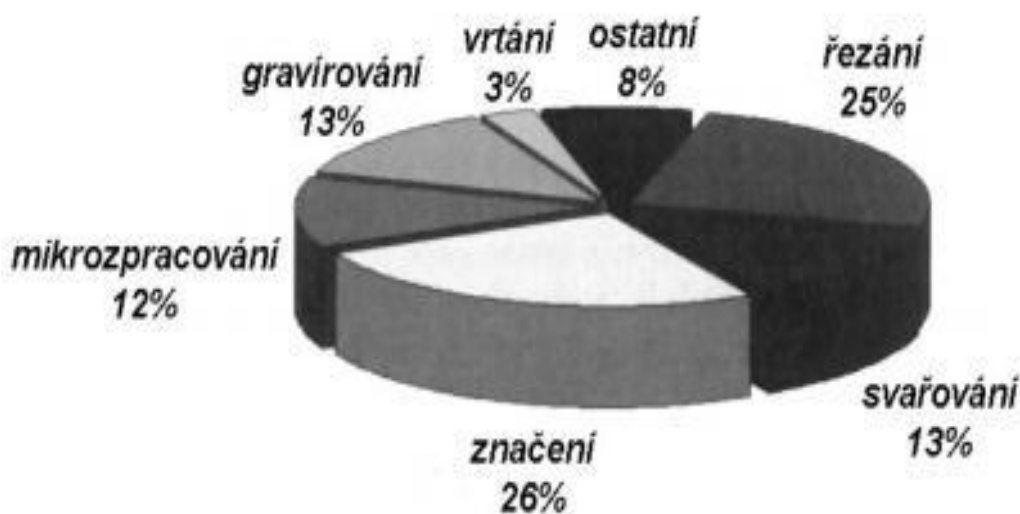
- typu kvantových přechodů (energetických hladin): molekulární (rotační, rotačně-vibrační, vibrační), elektronové, jaderné.
- typu buzení: optické, buzené elektrickým výbojem, buzené elektronovým svazkem, buzené tepelnými změnami, buzené chemicky, rekombinací nebo injekcí nosičů náboje.
- časového režimu provozu laseru: impulzní, kontinuální.
- délky generovaného pulzu: s dlouhými pulzy, s krátkými pulzy, s velmi krátkými pulzy (pikosekundové, nanosekundové).

5.1.2 Použití laserů

Laser se za dobu od svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, technologii, astronomii, geodézii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, energetice, ve výpočetní technice, v technice spojů, ve vojenské technice, v automatizaci a v dálkovém řízení.



Obr. 15 Podíl na trhu dle typu laserů [6]



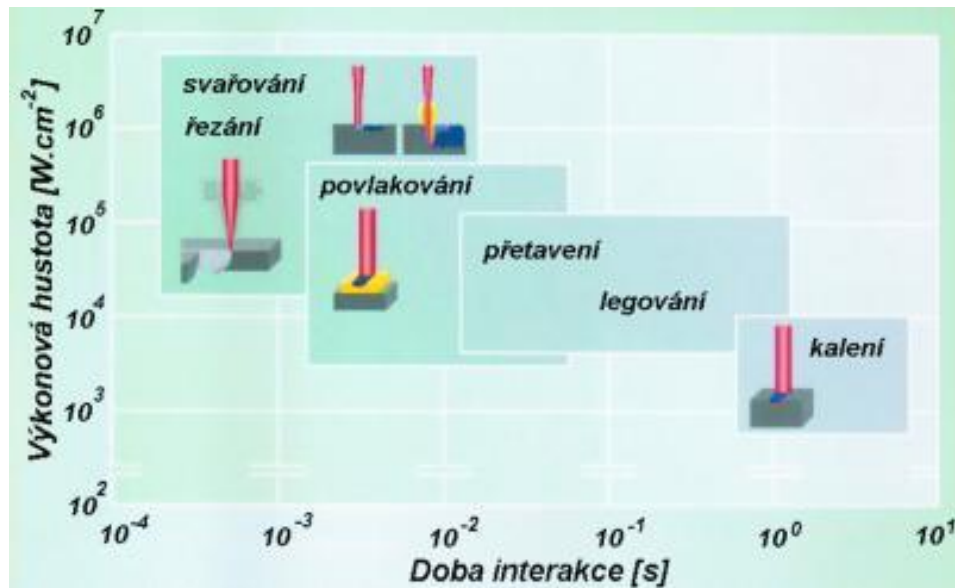
Obr. 16 Procento rozdělení jednotlivých technologií [6]

V technologii se laser začal používat od druhé poloviny 60. let. Vývoj laseru i jeho využití procházejí neustálou inovací. Sledují se jak nové technické možnosti, tak i příznivější ekonomie provozu. Laserovou technologii definujeme jako opracování materiálu založené na využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a spektrálním intervalu a také na interakci optického záření s látkou. [6]

Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. [6]

V technologii se laser používá pro svařování, vrtání, řezání, tepelné zpracování, značení a gravírování, povrchové úpravy, povlakování, metody tvorby modelů a prototypů a pro laserovou podporu konvenčního obrábění. Každá z těchto oblastí má svá specifika, pokud jde o typ laseru a způsoby jeho využití. [6]

Obrobitelnost materiálu laserem je dána zejména pohltivostí, schopností pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou energii neuspořádaného pohybu molekul nebo atomů absorbující látky, tzn. na tepelnou energii. Dále tepelnou vodivostí a odrazivostí, která je dána poměrem množství odražené energie k energii dopadající. [6]



Obr. 17 Oblasti pracovních parametrů laserů [6]

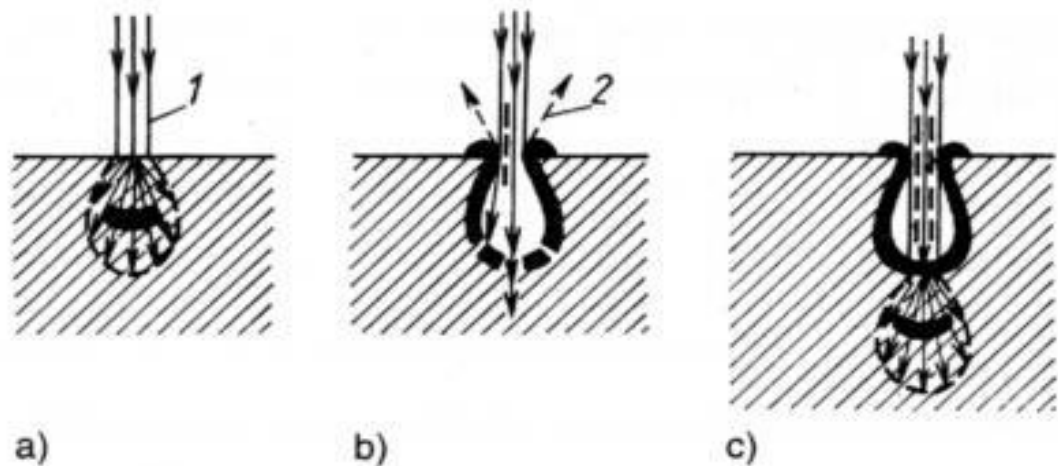
5.2 EBM-Obrábění paprskem elektronů (Electron Beam Machining)

Podstatou obrábění paprskem elektronů je využití energie paprsku elektronů soustředěného na velmi malou plošku obrobku. V místě dopadu se jejich kinetická energie přeměňuje v energii tepelnou, kterou materiál taví a vypařuje. [1]

Paprsek vniká do materiálu do určité hloubky, kde se pohyb elektronů zastaví. Vzniklá tepelná energie koncentrovaná pod povrchem způsobuje erupční odpařování materiálu. Částičky vypařujícího se materiálu se pohybují značnou rychlostí z otvoru. Vzniklé páry odpařeného materiálu jsou zionizovány a způsobí nové zaostření paprsku v pracovním místě. Opakováním tohoto procesu dojde k úběru materiálu.

Z technologického hlediska lze elektronový paprsek použít pro:

- termické procesy – svařování, pájení, vrtání dlouhých děr malých průměrů, řezání a tepelné zpracování materiálů
- netermické procesy – elektronový paprsek slouží k vyvolání chemické reakce. Týká se především oblasti litografických technologií, které se používají v elektrotechnice při výrobě čipů.



Obr. 18 Princip metody obrábění elektronovým paprskem

a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování materiálu, c) opětový vnik elektronů do materiálu, 1 – elektronový paprsek, 2 – páry odpařeného kovu [8]

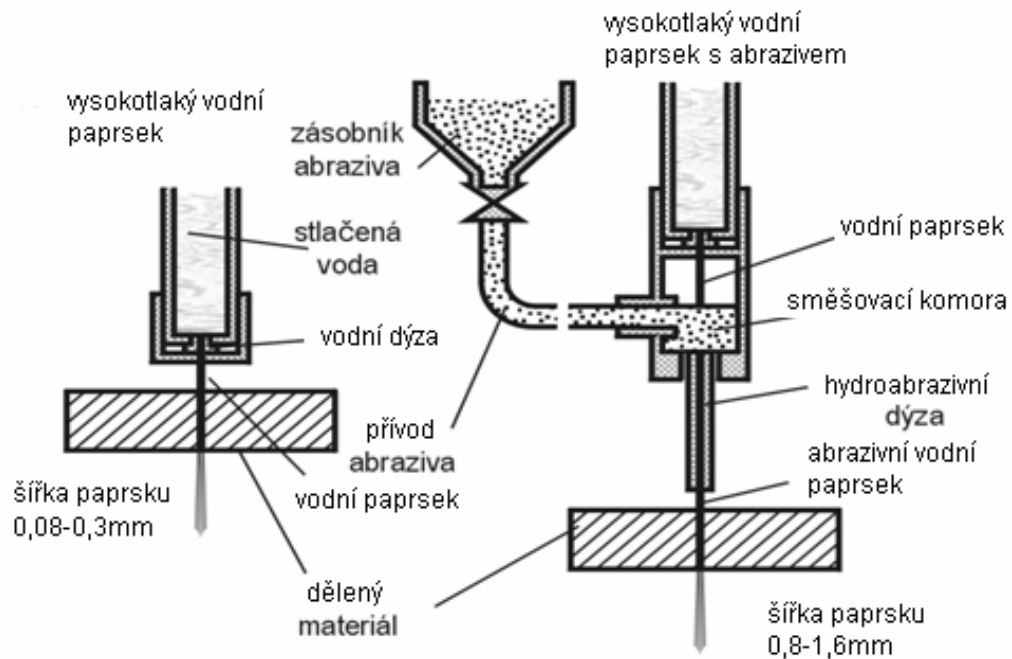
5.3 WJM-Obrábění vodním paprskem (Water Jet Machining)

Vysokorychlostní koherentní (spojitý) malopřůměrový vodní proud s tlakem technologické kapaliny nad 100 MPa nazýváme vodním paprskem. [1]

Technologie dělení materiálů vysokoenergetickým vodním paprskem je dvojího druhu:

- dělení materiálů čistým kapalinovým paprskem
- dělení materiálů kapalinovým paprskem s příměsí abrazivního materiálu

Rychlost paprsku je dvakrát vyšší než rychlost zvuku. Představuje to vysokou koncentraci vodního paprsku na velmi malé ploše.



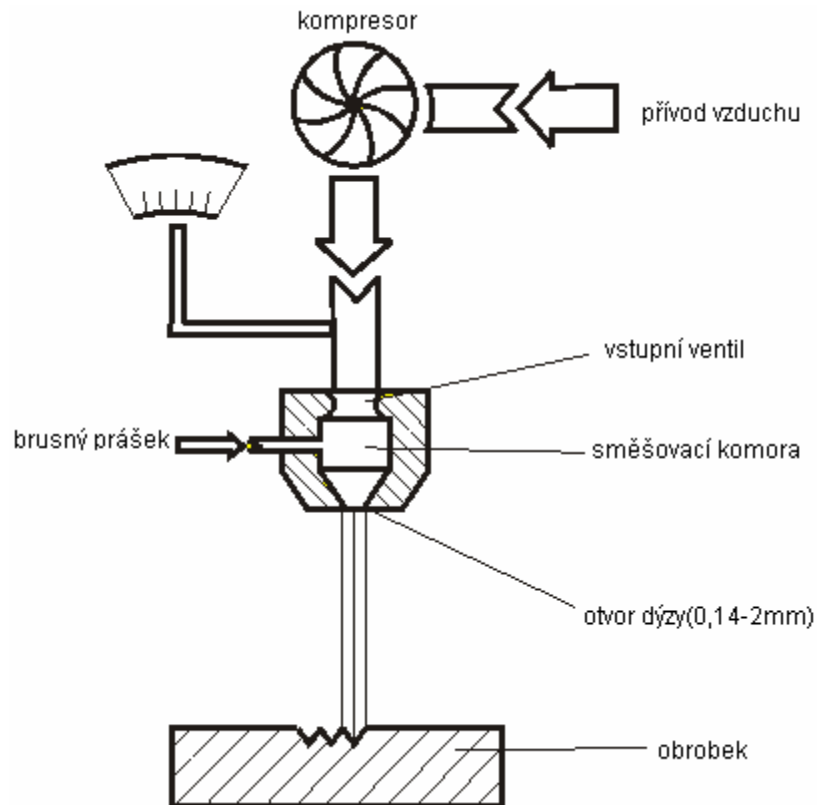
Obr. 19 Vysokotlaký vodní paprsek, vysokotlaký vodní paprsek s abrazivem [8]

Výhody metody:

- studený řez bez tepelného ovlivnění, možnost řezání těžko obrobitelných materiálů, vysoká přesnost, vysoká rychlost řezání, malé ztráty průřezu, řezání bez emisí, možnost řezat v různých směrech, možnost řízení pomocí počítače. [2]

5.4 AJM-Obrábění abrazivním paprskem (Abrasive Jet Machining)

AJM je opracování povrchu mechanickým nárazem částice, kde k úběru materiálu dochází po dopadu vysokorychlostního proudu abrazivních částic s vysokou kinetickou energií. Je to proces pomalého úběru materiálu, generuje méně tepla, protože se používá stlačený vzduch jako nosné médium pro brusný prášek a je to proces levnější. Materiál je při AJM odstraňován mechanickým působením směsi stlačeného vzduchu anebo jiného průmyslového plynu s velmi jemnými brusnými částicemi ve formě brusných prášků.



Obr. 20 Princip obrábění abrazivním paprskem [2]

5.5 PAM-Obrábění plazmovým paprskem (Plasma Arc Machining)

5.5.1 Plazma a princip metody

Plazma je pojem zavedený pro osobitý stav plynů, při kterém se stávají vodivými ionizací atomů. Je to směs elektronů a kladných iontů, která je většinou rozložená uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může být částečně nebo úplně ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy je 5000-15000° K, teplota úplně ionizované asi 100 000° K.

Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům magnetického a elektrického pole. Nejčastěji se plazma může tvořit ohřevem látky na vysokou teplotu nebo elektricky obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, případně mechanicky kompenzovaným iontovým svazkem. Jako zdroj tepla pro ionizaci plynů se v technické praxi nejvíc používá elektrický oblouk. [2]

Elektrický oblouk, potřebný k zahřátí plynu a k vytvoření plazmy, vzniká mezi anodou (obrobek) a katodou (elektroda v pistolí).

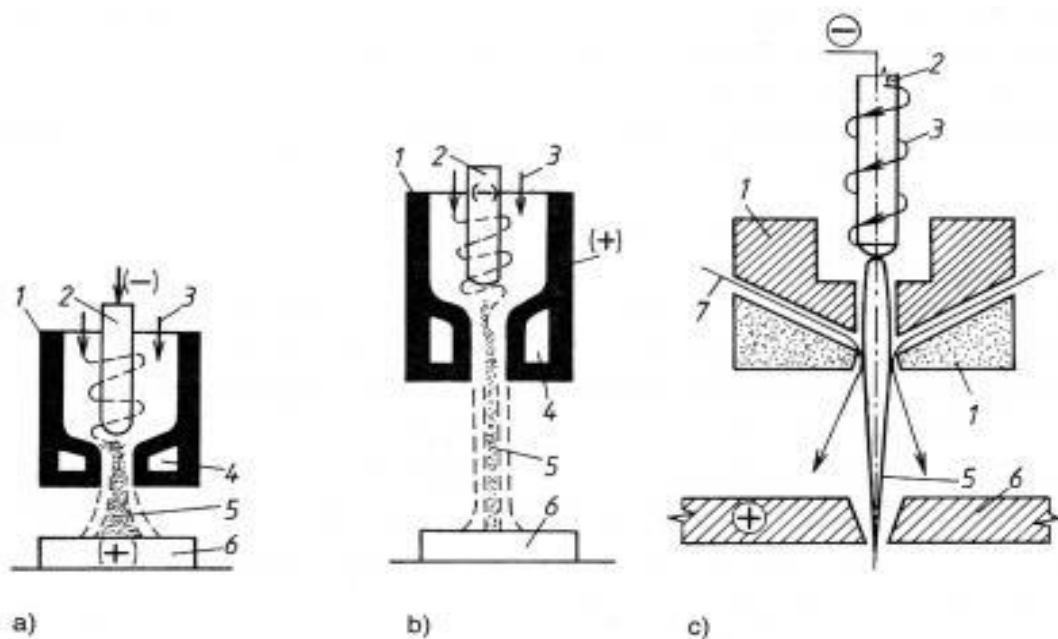
Výkon obráběný plazmou je značný. Ovlivňuje ho do určité míry teplota tavení a tepelná vodivost obráběného materiálu. Paprskem plazmy lze obrábět plochy rovinné i rotační. [1]

5.5.2 Zařízení pro obrábění materiálu plazmatem

Každé technologické zařízení pracující s plazmatem tvoří:

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

V plazmovém hořáku dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou energii usměrněného proudu plazmatu. Důležitým parametrem plazmového hořáku je stabilizace elektrického oblouku. Podle druhu použitého stabilizačního média se plazmové hořáky dělí na plazmové hořáky s plynovou stabilizací a plazmové hořáky s vodní stabilizací. [7]



Obr. 21 Plazmové hořáky s plynovou stabilizací: a) s transferovým obloukem, b) s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) s vodní stabilizací (1 – těleso hořáku, 2 – katoda, 3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku, 5 – paprsek plazmatu, 6 – obrobek, 7 – přívod vody) [7]

Plazmový hořák s plynovou stabilizací může být v provedení:

- s transferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a obráběným materiálem. Používá se pro opracování elektricky vodivých materiálů, například pro řezání ocelí a neželezných kovů.
- s netransferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a výstupní tryskou, která tvoří anodu. Používá se pro obrábění elektricky nevodivých materiálů (např. keramiky) a k nanášení povlaků.

Řezací tryska plazmového hořáku s vodní stabilizací má přídavné kanálky, kterými se přivádí voda do plazmového hořáku. Tyto hořáky se používají pro řezání ocelí a neželezných kovů a k nanášení povlaků. Výhodou je možnost řezat pod vodou, čímž se snižuje hlučnost, prašnost a vliv UV záření na obsluhu.

5.5.3 Používané plyny

Plyny používané pro plazmové řezání mají vysoký vliv na kvalitu řezání a podle funkce se dělí na:

- plazmové plyny – jsou přiváděny do elektrického oblouku, kde dochází k jejich ionizaci a disociaci. Jako plazmový plyn může být používán jednoatomový argon anebo dvouatomové plyny vodíku, dusíku, kyslíku a vzduchu.
- fokusační plyny – zaostřují paprsek plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku. Používá se argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popř. argonu a dusíku.
- ochranné plyny – obklopují paprsek plazmatu a pracovní místo na obrobku a chrání je před účinkem atmosféry. Používá se argon a dusík.

Volba plazmového a ochranného plynu je závislá na typu řezaného materiálu a jeho tloušťce. Kombinace obou plynů je doporučována výrobcem zařízení. Plazmový plyn se volí pro:

- konstrukční ocel: kyslík, vzduch
- vysoce legovanou ocel: argon+vodík, argon+vodík+dusík, argon+dusík, vzduch, dusík

- neželezné kovy: argon+vodík, vzduch
- kompozitní materiály: argon+vodík, argon+vodík+dusík, vzduch, kyslík

Zapálení elektrického oblouku se u plynových hořáků provádí pomocí vysokofrekvenčního jiskrového výboje nebo mechanicky pomocí zapalovací jehly. Zdroj stejnosměrného elektrického proudu má výkon 0,5 až 250 kW. [7]

5.5.4 Řezání plazmatem

Metoda je založena na využití teplotních a dynamických účinků plazmatu. Mezi elektrodou a řezaným materiálem hoří při současném dodávání plazmového plynu elektrický oblouk koncentrovaný pomocí chlazené trysky a fokusačního (ochranného) plynu, případně vody. Zkoncentrováním elektrického oblouku se výrazně zvýší hustota výkonu. Fokusační (ochranný) plyn zároveň obklopuje plazmový elektrický oblouk a chrání vytvářené řezné hrany před vlivy okolní atmosféry. Řezaný materiál je taven a tavenina a oxidy jsou vyfukovány z místa řezu plazmovým plynem. V případě použití kyslíku jako plazmového plynu je materiál rovněž spalován a reakce mezi materiálem a kyslíkem přispívá k vytváření řezné spáry. [7]

Vysoké teploty (17000 – 33000 °C) a vysoká intenzita přenosu tepla do materiálu (okolo 24 – 69 MW/m²) charakterizují přednosti plazmového řezání v porovnání s řezáním plamenem. Teplota kyslík-acetylenového plamene je okolo 2900 °C a intenzita přenosu tepla v rozmezí 8 – 19 MW/m², což je v porovnání s plazmou o mnoho nižší. Při styku plazmy s povrchem tuhého materiálu nastává vlivem vysoké teploty tavení materiálu, odtékání, odpařování, sublimace nebo rozprašování. Tyto jevy se poté projevují při procesech svařování, řezání či tvoření povlaků. [7]

Díky vysoké hustotě výkonu plazmatu a vysoké dosahované teplotě lze plazmatem řezat takřka všechny kovové materiály. Omezením je tloušťka materiálu, což je způsobeno poklesem tlaku plazmového plynu se vzrůstající tloušťkou materiálu.

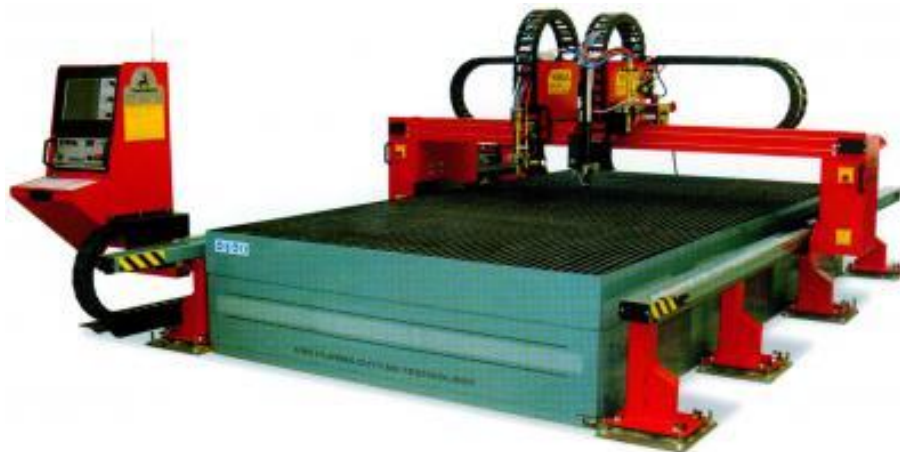
Výhody řezání plazmatem:

- možnost provozu jednoho nebo více hořáků podle velikosti výrobní dávky
- vhodnost zejména pro řezání slabých a středních tloušťek konstrukční oceli (do 30 mm)

- možnost řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem
- vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než při řezání plamenem)
- proces lze plně automatizovat
- řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště

Nevýhody řezání plazmatem:

- omezí použití do 160 mm (180 mm) u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou
- poněkud širší řezná spára oproti řezání laserem
- vyšší náklady než při řezání plamene či laserem
- méně kvalitní hrany v porovnání s laserem



Obr. 22 Zařízení pro řezání plazmatem [7]

Teoretické základy úběru materiálu při plazmovém řezání je založená na předpokladu, že materiál obrobku absorbuje všechnu tepelnou energii, kterou plazma uvolňuje při styku s materiálem. Úběr materiálu nastává jeho tavením a následným odplavením ve formě jemné rozprášené tekutiny, nebo odpařením materiálu, popřípadě chemickou reakcí mezi materiálem a plazmou.

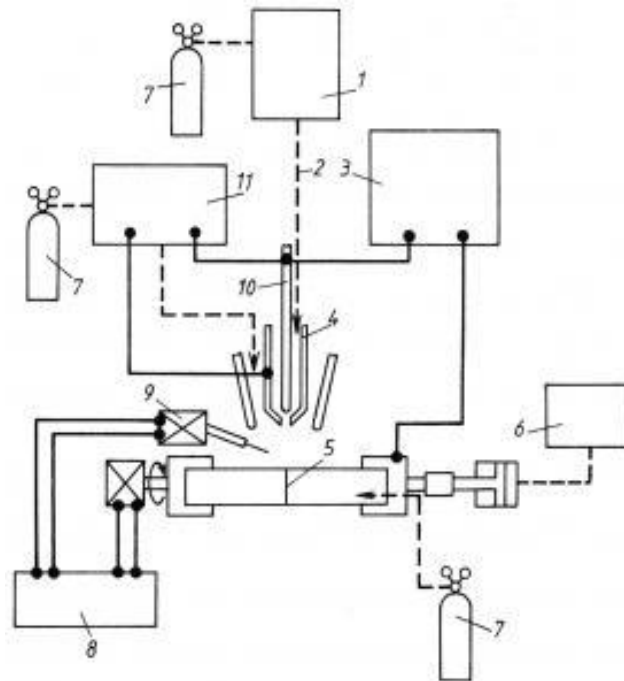
Intenzita přenosu energie z plazmového oblouku do materiálu je dána rozdílem energie mezi dopadajícím paprskem plazmy a energií potřebnou na tavení materiálu.



Obr. 23 Pohled do pracovního prostoru řezacího stroje [7]

5.5.5 Svařování plazmatem

Plazmové svařování patří mezi moderní, vysoce produktivní metody svařování v ochranné atmosféře. Je charakterizováno velmi vysokou koncentrací energie a vysokou pracovní teplotou. Předností plazmového svařování je stabilní svařovací proces a charakteristický tvar svaru – zejména kořene, což umožňuje svařování bez podložení kořene až do tloušťek 10 mm. V základních rysech se svařování plazmatem podobá metodě TIG (WIG) – oblouk hoří mezi netavící se elektrodou a základním materiálem nejčastěji v ochranné atmosféře inertního plynu. Na rozdíl od svařování metodou TIG se používá hořák s intenzivně chlazenou výstupní hubicí menšího průměru, která oblouk zužuje na poměrně malou plochu svařence. Na zvýšení hustoty energie se podílí ochranný (fokusační) plyn. [7]



Obr. 24 Schéma svařování plazmatem [7]

Koncentrované teplo zaručuje hluboké natavení základního materiálu, dobré formování kořene a charakteristický průřez svaru. Ve srovnání s laserovým paprskem má plazmový oblouk nižší koncentraci energie, avšak nesrovnatelně vyšší energetickou účinnost a nižší celkové provozní náklady. U plazmatu je zřejmá vyšší koncentrace energie a tím i délka oblouku. Teplo a dynamický účinek oblouku vytvářejí otvor na přední straně tavné lázně. Tento otvor, kde oblouk přechází přes materiál, se nazývá „klíčová díрка“. Při posuvu plazmového hořáku ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí k opětovnému spojení svarového kovu za „klíčovou dírkou“.

Ekonomický přínos této metody je viditelný. Snadná kontrola průvaru, nízká citlivost na změny délky oblouku, vysoká stabilita oblouku i při nízkých parametrech společně s malou tepelně ovlivněnou oblastí zajišťují vysokou kvalitu svařovacího procesu. Svařování metodou „klíčové dírkou“ je velmi vhodné pro automatizaci svařovacího procesu. Společným znakem všech oblastí použití svařování plazmatem je vysoká kvalita a produktivita procesu při minimálním tepelném ovlivnění základního materiálu. [7]

Výhody svařování plazmatem:

- vysoká rychlost svařování
- hluboký průvar

-
- menší tepelně ovlivněná oblast oproti svařování autogenem, a tím i menší deformace obrobku, daná velkou svařovací rychlostí
 - velký výkon
 - zachování příznivých mechanických hodnot základního materiálu
 - vynikající vzhled svaru při snadné reprodukovatelnosti
 - vynikající kvalita svaru
 - snížení pracnosti přípravy svarových ploch
 - úspora přídavného materiálu
 - měkký, stálý oblouk

6 JAKOST POVRCHU

Jedním z nejdůležitějších úkolů technologie je zajištění požadované jakosti výrobku. Pod pojmem „jakost“ se původně rozuměla jen rozměrová přesnost. I když tato charakteristika výrobku je velmi důležitá, je pojem jakosti mnohem širší a zahrnuje v sobě nejen rozměrovou a geometrickou přesnost, ale i vlastnosti povrchové vrstvy a všechny změny, které v povrchové vrstvě nastávají. Jedná se o texturu povrchu, která se projevuje v drsnosti a vlnitosti a dále o změny, které nastávají po technologických operacích a směřují pod povrch materiálu. To jsou změny struktury, fázové přeměny, které jsou důsledkem mechanických a tepelných účinků na povrch součástí. Hodnocení těchto změn i směrem do materiálu, může být vyjádřeno hodnotami zbytkových napětí.

Funkční plocha dokončená některou technologickou operací má svou jakost, tj. rozměr, tvar a drsnost. Na každém povrchu je možné sledovat a vyhodnocovat průběh povrchových nerovností, tj. výšku jejich vrcholů a prohlubní, tvar nerovnosti nebo rozteče jednotlivých charakteristických bodů profilu. Všechny tyto údaje je možné zahrnout pod pojem „textura povrchu“.

6.1 Hodnocení textury povrchu

Řešení otázek vlivu jakosti povrchu na funkci je v popředí zájmu konstruktérů i technologů. Znalost podmínek interakce ploch umožňuje totiž předem stanovit, jaké musí mít vlastnosti hodnocené plochy, aby byla zabezpečena jejich funkce.

Jednou z cest je dokonalé zvládnutí a optimalizace těch technologických operací, které se využívají pro dokončování funkčních ploch součástí.

To vede k tomu, že bude možné a nutné na základě provozních podmínek funkční plochy přesně a jasně specifikovat úchytky rozměru, tvaru, texturu povrchu, tj. její drsnost a vlnitost, zbytková napětí v povrchové vrstvě, a tak přispět ke splnění požadavků na zajištění spolehlivosti a životnosti vyráběných součástí.

Textura povrchu, tj. je jeho uspořádání z hlediska makro a mikrogeometrie představuje důležitý prvek, který určuje významné vlastnosti součástí. Textura povrchu zahrnuje drsnost, vlnitost i tvarovou úchytku sledovaného povrchu.

Rozdíly mezi těmito charakteristikami textury jsou dány poměrem rozteče nerovností k jejich výšce. U drsnosti je to poměr 1-50, u vlnitosti je to poměr 50-1000, u tvarové úchytky povrchu je to hodnota nad 1000.

Z geometrického hlediska je velikost, tvar a vzájemné rozložení nerovností povrchu určen tvarem ostří řezného nástroje a podmínkami, které určují trajektorie pohybu ostří nástroje vzhledem k obrobenému povrchu.

6.2 Drsnost povrchu

Drsnosti povrchu se nazývá část geometrických úchylek skutečného povrchu s poměrně malou vzdáleností sousedních nerovností. Na obrobeném povrchu jsou tyto nerovnosti stopami, které zanechává řezný nástroj, volné brusivo či jiskrový výboj.

Na neobrobených plochách zůstávají podle způsobu zpracování – otisk nerovností formy, průvlaků atd., okují a dalších nečistot.

Vady povrchu způsobené náhodným poškozením materiálu (póry, lunkry, trhliny) se do drsnosti povrchu nezahrnují.

Drsnost povrchu významně ovlivňuje funkční vlastnosti ploch, a to jak ploch stykových, tvořících uložení nebo dosedajících na jinou plochu, tak i některých ploch volných. U stykových ploch závisí na drsnosti povrchu ztráty tření, odolnosti proti opotřebení a životnost součástí, jakost mazání, doba záběhu, pevnosti a tuhost jejich spojení aj.

U volných ploch mohou na ní záviset fyzikální a chemické děje při provozu strojů jako únava materiálu, obtékání tekutinami, přestup tepla, odraz světla, koroze aj. Drsnost povrchu do jisté míry podmiňuje dosažení určité přesnosti rozměru a tvaru ploch, a má nezanedbatelný vliv na výrobní náklady.

Sledování, hodnocení a využívání mikrogeometrie povrchu pro zvyšování jakosti a efektivnosti strojních součástí je jedním ze základních úkolů, které si vynutil řešení problémů kvantitativního hodnocení vlastností funkčních ploch.

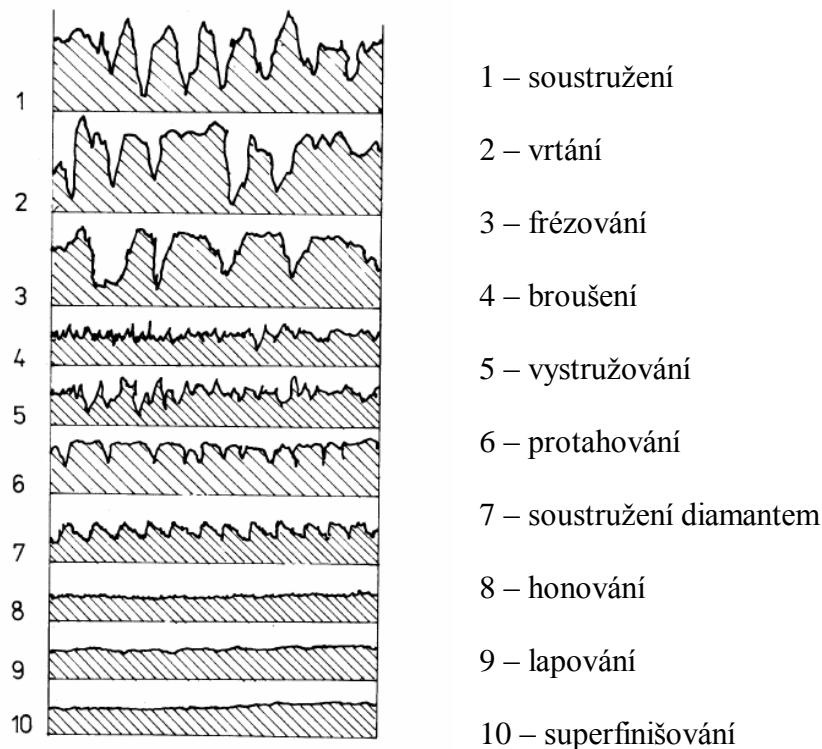
Měření jakosti, zvláště pak měření drsnosti povrchu zaznamenalo výrazný pokrok. Rozvíjí se měřicí technika, zavádějí se nové parametry, nové normy.

Vzrostly požadavky na:

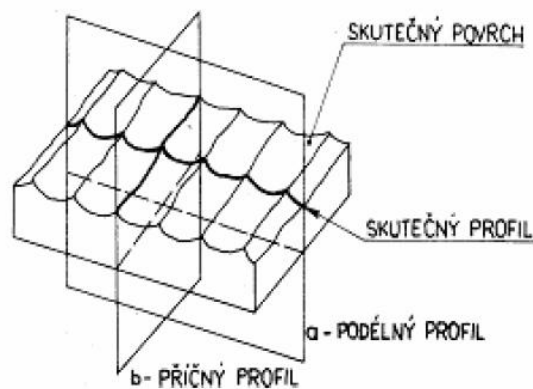
- hospodárnost měření
- větší univerzálnost přístrojů
- větší možnosti při měření
- možnost vyjadřovat vliv geometrie povrchu na funkční vlastnosti
- přesnější, spolehlivější měření lepší ověřování přesnosti měření.

6.2.1 Posuzování drsnosti povrchu

Drsnost povrchu nazýváme souhrn jemných nerovností (výstupků a prohlubní), které vznikají při každém zpracování materiálu. Na obrobeném povrchu to jsou nejčastěji poměrně pravidelně a směrově uspořádané stopy (rýhy) zanechávané řezným nástrojem, (Obr. 24). U některých způsobů obrábění, např. soustružení, frézování, hoblování není drsnost povrchu stejná ve všech směrech. Proto rozlišujeme drsnost příčnou, tj. drsnost ve směru kolmém na řezný pohyb (Obr. 25) a drsnost podélnou, tj. drsnost ve směru řezného pohybu.



Obr. 25 Drsnost povrchu základních způsobů obrábění



Obr. 26 Příčná a podélná drsnost profilu

Neobrobený povrch součásti nese některé typické stopy zpracování (stopy zanechané pískem odlévací formy, drsnými stěnami zápustky, válců, průvlaků apod.). Kromě těchto nerovností vznikají zejména na obrobených plochách také rozsáhlejší, periodicky se opakující nerovnosti, které se překrývají s drsností a nazývají se vlnitostí povrchu.

Vlnitost povrchu obráběných ploch je způsobena příliš velkým nebo proměnným tlakem řezného nástroje, nedostatečnou tuhostí nosných částí obráběcího stroje, chvěním soustavy, stroj – nástroj – obrobek a vnitřním pnutím a deformacemi obrobku.

Stupeň drsnosti plochy se určuje buď porovnáváním nebo změřením profilu, který vznikne vhodně vedeným rovinným řezem (Obr. 25) přístroji založenými na optických nebo elektrických principech. Při určování stupně drsnosti porovnáváním, srovnáváme obrobe-nou plochu s plochou, jejíž stupeň drsnosti známe nebo se speciálními vzorky, uspořádanými do vzorkovnice. Porovnává se buď přímo okem a hmatem nebo se použije mikroskopu. Nejoptimálnější výsledky dává hodnocení nehtem.

6.2.2 Metody měření drsnosti povrchu

Dotyková metoda

Dotyková metoda je pro hodnocení povrchu nejrozšířenější. Její výhodou je možnost převádět analogový záznam do digitální formy, a také proto, že naměřené hodnoty slouží jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. [10]

Výhodou této metody je její přesná reprodukovatelnost, tj. schopnost zobrazit měřený geometrický profil. Nicméně v důsledku tlaku na hrot snímače dochází k elastické (možná i

plastické) deformaci v povrchové vrstvě. To závisí na tvrdosti povrchu. V některých případech může dojít k tomu, že hrot snímače poškodí měřený povrch, což je nevhodné nejen pro hodnocení povrchu, ale i pro přesný výsledek měření [11].

Nejčastěji používané přístroje pro vyhodnocení:

Profilograf – dotykový přístroj, u něhož je výsledkem měření grafický záznam profilu.

Profilometr – přístroj vyhodnocující automaticky některé z normalizovaných charakteristik drsnosti povrchu.

Profiloměr – jednak kombinovaný přístroj profilometr-profilograf a jednak obecně dotykový přístroj na měření drsnosti povrchu.

Bezdotyková metoda

Vhodnou alternativou měření povrchu dotykovými profilometry jsou optické metody. Jedná se o bezdotykové měření, čímž je vyloučeno poškození měřeného povrchu. Dotykový hrot je nahrazen světelným paprskem, který se odráží nebo rozptyluje na měřeném povrchu. Interakce mezi světelným paprskem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti povrchu a vlastnostech měřeného tělesa. Hloubka vnikání světelného paprsku také ovlivňuje výsledek měření. Tato hloubka se mění podle součinitele absorpce materiálu. Intenzita v místě dopadu na povrch je poměr dopadajícího světla k jeho odrazu. U kovů jsou součinitelé absorpce a odrazu obecně vysoké. Pro jiné materiály jsou naopak oba součinitelé nízké tak, že velký podíl dopadajícího světla proniká do materiálu. Nicméně v případě vrstveného povrchu může dojít k vícenásobnému odrazu v různých hloubkách. Tato změna ovlivňuje optickou délku dráhy a tím i měření. [12]

Metoda světelného řezu

Ze zdroje světla procházejí paprsky zeleným filtrem a kondenzorem. Rovnoběžný svazek paprsků je omezen štěrbinou do tvaru velmi tenké světelné roviny a je promítán soustavou čoček objektivu pod úhlem 45° na měřený povrch. Průnikem světelné roviny nerovnostmi povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovností plochy, který se pozoruje druhým mikroskopem se stejnými optickými vlastnostmi, jaké má osvětlovací mikroskop. Měřicí okulár má skleněnou destičku s nitkovým křížem a pomocnou stupnicí s milimetro-

vým dělením, orientovanou k nitkovému kříži pod úhlem 45° . Natáčením měřicího okuláru lze nastavit různou polohu nitkového kříže k proměřovanému profilu. Vzhledem k tomu, že hloubka ostroty mikroskopů je malá, zaostřuje se pouze jedna strana obrazu světelné štěrby a na tomto profilu se nitkovým křížem a mikrometrickým šroubem měřicího okuláru měří výšky nerovností povrchu. [12]

Interferenční metody měření drsnosti povrchu

Při měření drsnosti jemně obrobených povrchů, např. broušených, superfinišovaných, leštěných apod., jsou profily zjištěné i nejdokonalejšími profiloměry vždy do určité míry zkreslené technicky použitelným zaoblením měřících hrotů. V takových případech lze nejpřesněji měřit nerovnosti povrchu menší než $1 \mu\text{m}$ jen optickými interferenčními metodami. Nejmenší výška nerovností povrchu měřitelná optickými interferenčními metodami je omezena vlnovou délkou použitého monochromatického světla, charakterem nerovností měřeného povrchu, drsnosti a porovnávací plochy. Základní podmínkou pro interferenční měření je malá drsnost povrchu a jeho dostatečná odrazivost světelných paprsků. [13]

Použití plastických otisků pro měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu dotykovými profiloměry i optickými měřicími metodami je často omezeno nebo znemožněno celou řadou důvodů, např. hmotností a rozměry součástí, nepřístupnosti ploch pro metody, které jsou k dispozici, obrobek je upnut na stroji a mají být na něm provedeny další operace atd. Byl proto hledán nepřímý způsob stanovení drsnosti povrchu strojních součástí prostřednictvím negativních otisků nerovností. Otisky reliéfů musí být: věrné až do zlomku mikrometru, dostatečně silné, aby se po oddělení od povrchu nedeformovaly, dostatečně tvrdé, aby měřící hrot alespoň při jednom měření nepoškodil jemnou strukturu otisknutých nerovností. [13]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CHARAKTERISTIKA VZORKŮ A POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ

7.1 Obráběný materiál a jeho charakteristika

Pro vyhodnocení výsledků obrábění plazmovým paprskem byla použita klasická konstrukční ocel 11 375 (EN S235JR).

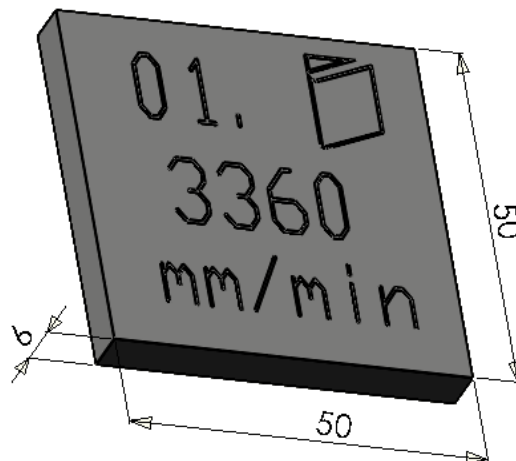
Chemické složení materiálu **11 375** je:

Uhlík (C)	max 0,19%
Mangan (Mn)	max 1,5%
Fosfor (P)	max 0,45%
Síra (S)	max 0,045%
Dusík (N)	max 0,014%

Tab. 1 Chemické složení oceli 11 375 [13]

Tato ocel je neušlechtilá, obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Nejčastěji se používá na součásti konstrukcí a strojů. Především dílce středních tloušťek, které jsou namáhané staticky i dynamicky. Dále pro součásti vyráběné z plechů, podélně svařovaných dutých profilů a součásti kované pro tepelná energetická zařízení a tlakové nádoby pracující s omezeným přetlakem a teplotou do 300 °C.

Plazmovou technologií bylo následně vyrobeno osm vzorků. Vzorky byly z plechu o tloušťce 6 mm a rozměrech 50x50 mm.



Obr. 27 3D model obráběného vzorku

7.2 Zařízení pro plazmové obrábění

K plazmovému obrábění byl použit stroj MGM OMNICUT 4000 o výkonu 2,5 kVA z firmy PROGRESS PRUCTUIONSTECHNIC spol. s.r.o. Toto zařízení je určené k plazmovému řezání kovových materiálů a opracování rovných plechů.

Konstrukce stroje je opatřena přesně opracovaným lineárním vedením s broušenými ocelovými tyčemi a broušenými ozubenými hřebeny v bez mazném provedení. Portál jezdí po robustní a přesně opracované dráze a jeho pojezd zaručují výkonné servomotory na obou stranách portálu. Řezný proud se pohybuje v rozmezí 10-360 A. Maximální rychlost stroje je 20 m/min. Pracovní rozměry stroje jsou 3000x12000 mm. Elektrické napájení stroje je 400 V při frekvenci 50 Hz. Chladicí médium je chladicí kapalina Kjellfrost (směs etylenu, glykolu ...). Jako plazmový plyn se používá vzduch, kyslík (O_2), dusík (N_2), argon (Ar), vodík (H_2). Ochranným plynem je kyslík (O_2), dusík (N_2), dusík/vodík (N_2/H_2). Elektroda se používá wolframová. Maximální tloušťka obráběného materiálu je 70 mm (pro neušlechtilou ocel). Řezací hlava byla od výrobce KJELLBERG. Stroj obsahuje také přestavovací nástroj vrtačku.



Obr. 28 Plazmový obráběcí stroj MGM OMNICUT 4000



Obr. 29 Pálicí hlava Kjellberg

7.3 Zařízení pro vyhodnocení výsledků

Pro vyhodnocení rozměrové přesnosti obrobků byl použit digitální třmenový mikrometr značky Mitutoyo s rozlišením 1 μm . Měřicí rozsah měřidla byl 25-50 mm. Výrobní číslo 106034. Mezní chyba měřidla: 4 μm .



Obr. 30 Měření mikrometrem Mitutoyo

Pro hodnocení kvality řezné plochy byl použit univerzální dílenský mikroskop CARL ZEISS, jehož optický systém je opatřen mikrometrickým posuvným šroubem hodnotou dě-

lení 0,01 mm. Nasvícení pomocí externí diodové lampičky. Ustavení vzorků bylo realizováno pomocí speciální plastelíny.



Obr. 31 Univerzální dílenský mikroskop

8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PŘI OBRÁBĚNÍ PLAZMOVÝM PAPERSEM

8.1 Vyhodnocení rozměrové přesnosti u oceli 11 375

Proměnným technologickým parametrem byla řezná rychlost, která se pohybovala od 1,8 m/min do 4,32 m/min. Pálící proud byl 130 A, řezný tlak 9,9 bar. Plazmový plyn byl kyslík (O_2), ochranný plyn byl dusík (N_2), zapalovací plyn byl vzduch.

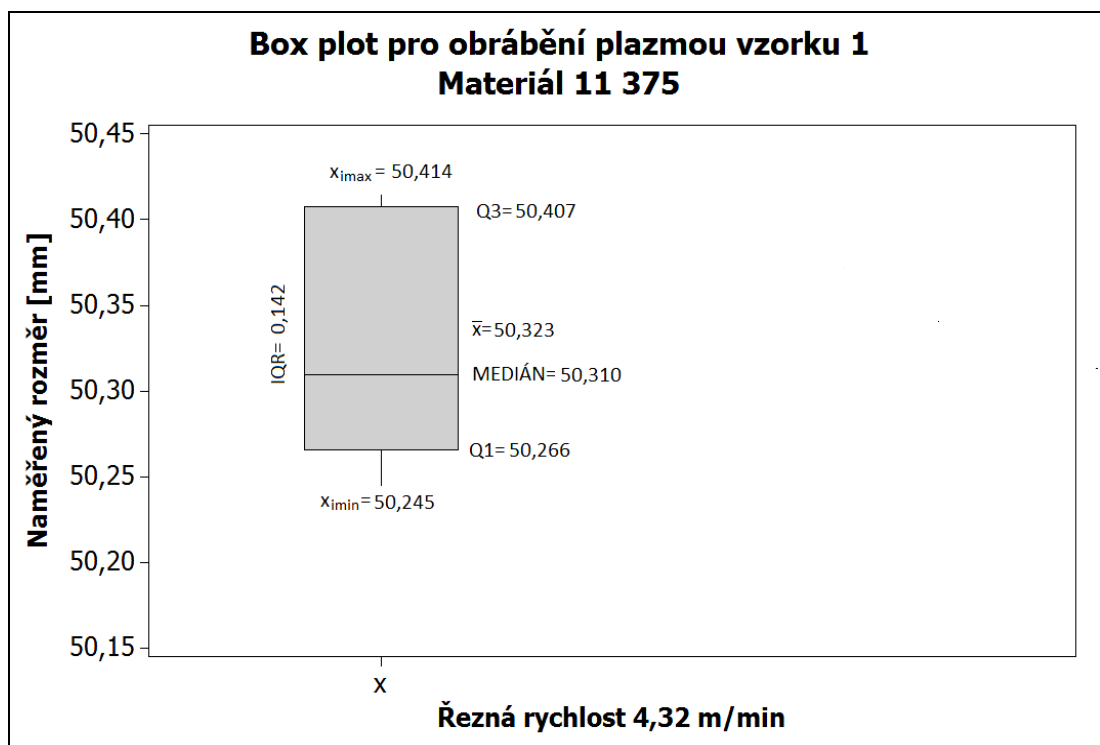
Obrobek byl měřen 10x ve směru x (x_1-x_{10}) digitálním třmenovým mikrometrem značky Mitutoyo s rozlišením 1 μm .



Obr. 32 Obrábění oceli 11 375 plazmovým paprskem

Tab. 2 Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

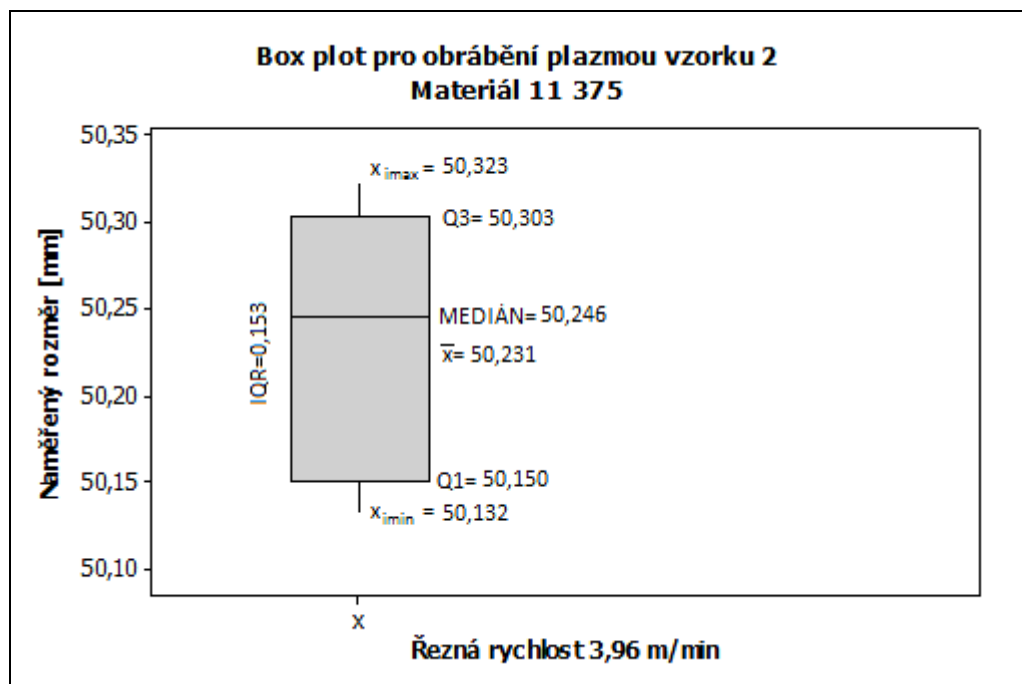
1.	PLAZMA vzorek 1 - 11 375 - 4,32 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	50,287	50,3233	-0,0363	0,00132	0,0676	0,1343
	2	50,245		-0,0783	0,00613		
	3	50,412		0,0887	0,00787		
	4	50,406		0,0827	0,00684		
	5	50,272		-0,0513	0,00263		
	6	50,332		0,0087	0,00008		
	7	50,247		-0,0763	0,00582		
	8	50,339		0,0157	0,00025		
	9	50,414		0,0907	0,00823		
	10	50,279		-0,0443	0,00196		



Obr. 33 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 1 - materiál 11 375

Tab. 3 Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

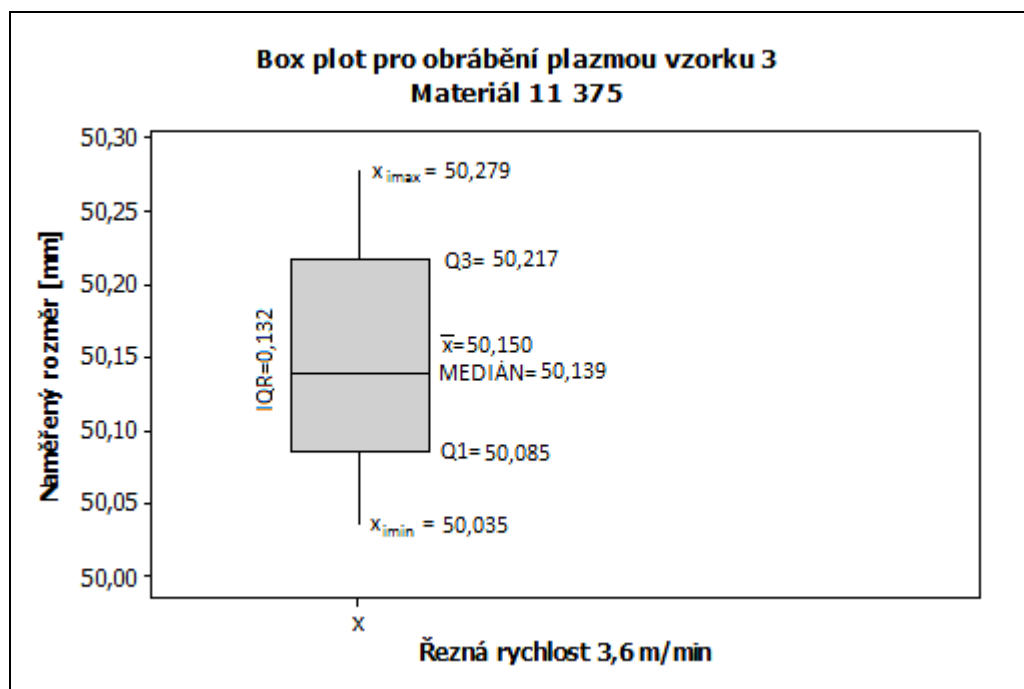
2.	PLAZMA vzorek 2 - 11 375 - 3,96 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	50,244	50,2308	0,0132	0,00017	0,0722	0,1438
	2	50,247		0,0162	0,00026		
	3	50,301		0,0702	0,00493		
	4	50,265		0,0342	0,00117		
	5	50,135		-0,0958	0,00918		
	6	50,323		0,0922	0,00850		
	7	50,309		0,0782	0,00612		
	8	50,132		-0,0988	0,00976		
	9	50,155		-0,0758	0,00575		
	10	50,197		-0,0338	0,00114		



Obr. 34 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 2 - materiál 11 375

Tab. 4 Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

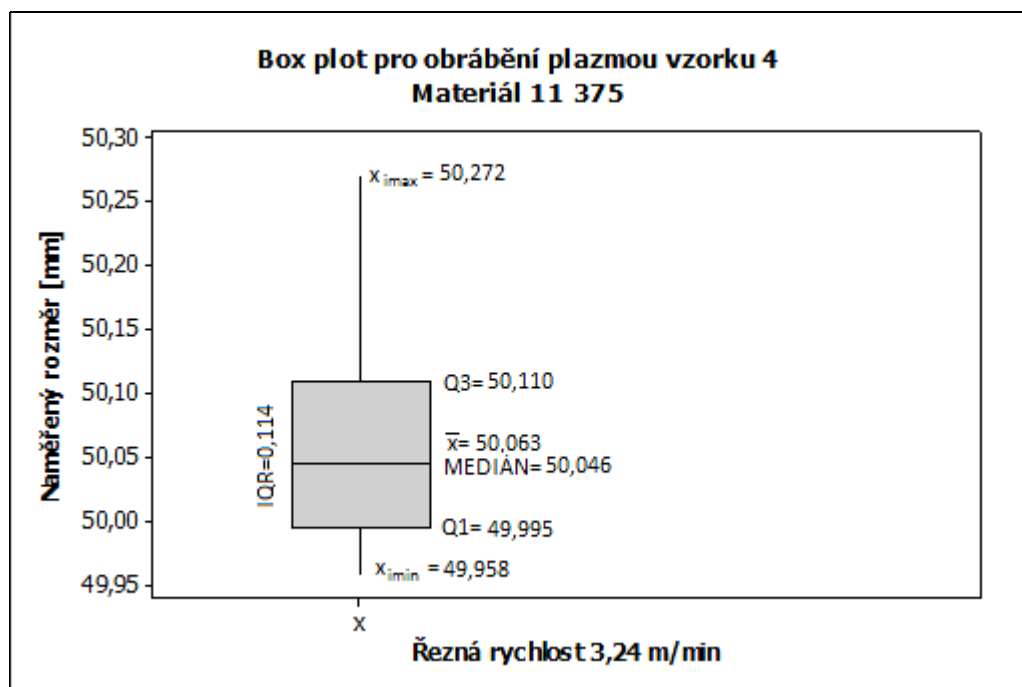
3.	PLAZMA vzorek 3 - 11 375 - 3,6 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	50,035	50,1497	-0,1147	0,01316	0,0815	0,1625
	2	50,125		-0,0247	0,00061		
	3	50,201		0,0513	0,00263		
	4	50,279		0,1293	0,01672		
	5	50,068		-0,0817	0,00667		
	6	50,177		0,0273	0,00075		
	7	50,266		0,1163	0,01353		
	8	50,091		-0,0587	0,00345		
	9	50,102		-0,0477	0,00228		
	10	50,153		0,0033	0,00001		



Obr. 35 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 3 - materiál 11 375

Tab. 5 Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

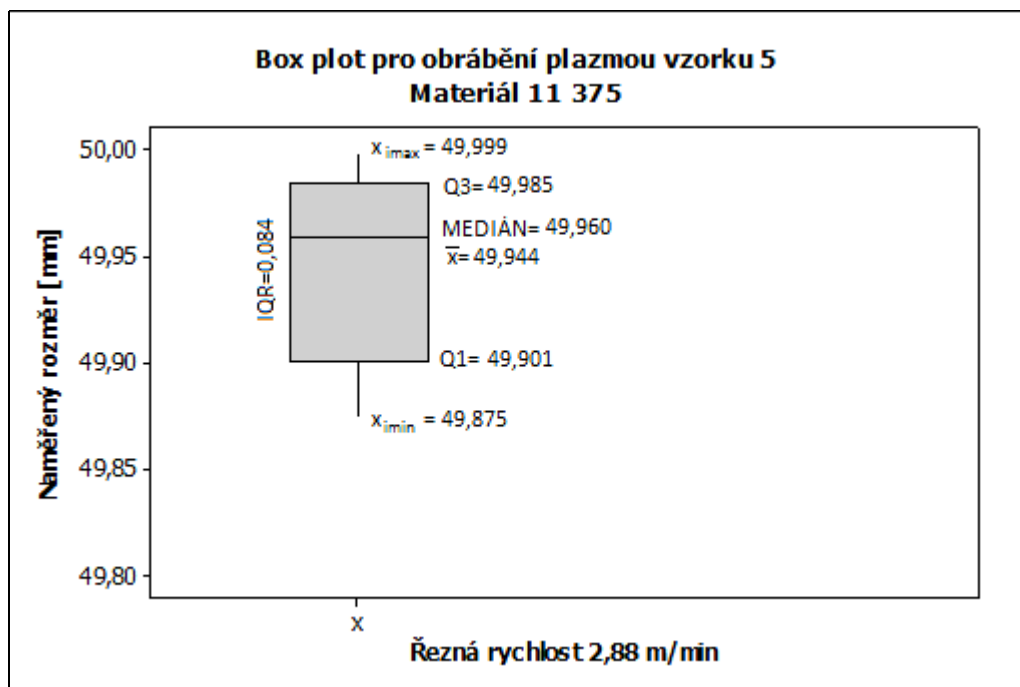
4.	PLAZMA vzorek 4 - 11 375 - 3,24 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	50,048	50,0633	-0,0153	0,00023	0,0925	0,1847
	2	50,148		0,0847	0,00717		
	3	50,007		-0,0563	0,00317		
	4	49,958		-0,1053	0,01109		
	5	50,075		0,0117	0,00014		
	6	49,987		-0,0763	0,00582		
	7	50,272		0,2087	0,04356		
	8	49,998		-0,0653	0,00426		
	9	50,097		0,0337	0,00114		
	10	50,043		-0,0203	0,00041		



Obr. 36 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 4 - materiál 11 375

Tab. 6 Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

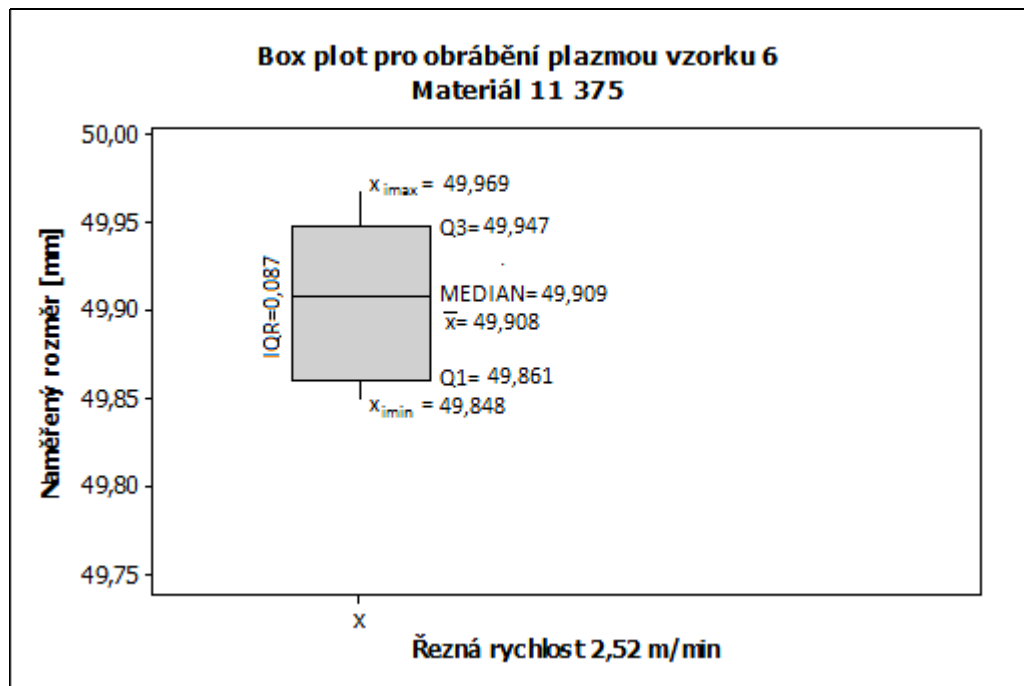
5.	PLAZMA vzorek 5 - 11 375 - 2,88 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	49,982	49,9443	0,0377	0,00142	0,0446	0,0893
	2	49,956		0,0117	0,00014		
	3	49,875		-0,0693	0,00480		
	4	49,898		-0,0463	0,00214		
	5	49,908		-0,0363	0,00132		
	6	49,999		0,0547	0,00299		
	7	49,964		0,0197	0,00039		
	8	49,994		0,0497	0,00247		
	9	49,965		0,0207	0,00043		
	10	49,902		-0,0423	0,00179		



Obr. 37 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 5 - materiál 11 375

Tab. 7 Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

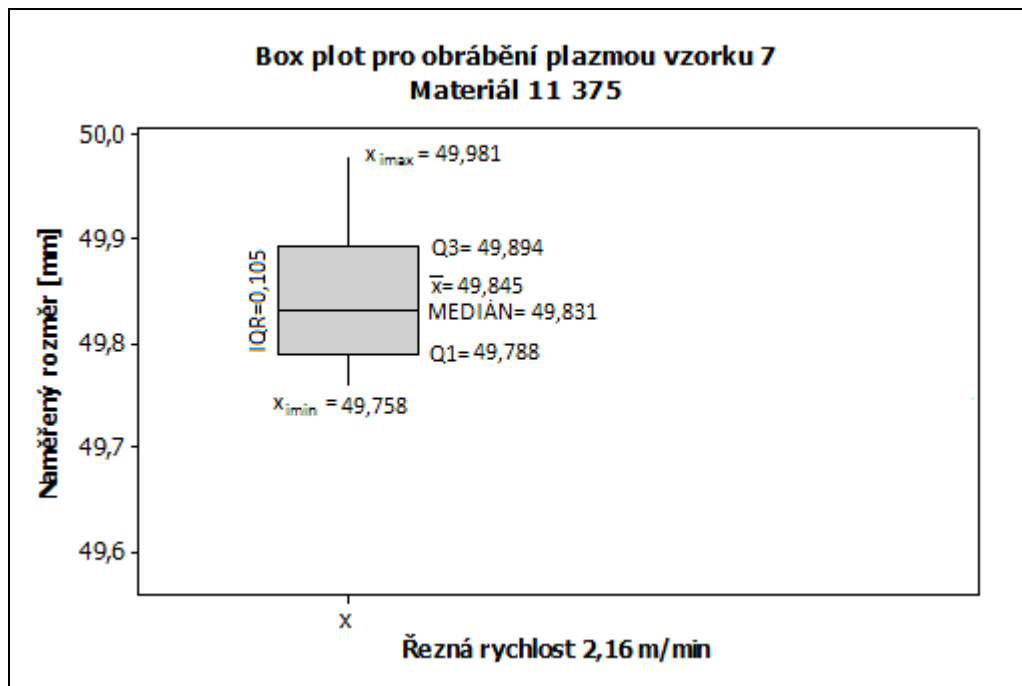
6.	PLAZMA vzorek 6 - 11 375 - 2,52 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	49,896	49,9079	-0,0119	0,00014	0,0432	0,0865
	2	49,861		-0,0469	0,00220		
	3	49,969		0,0611	0,00373		
	4	49,923		0,0151	0,00023		
	5	49,964		0,0561	0,00315		
	6	49,861		-0,0469	0,00220		
	7	49,894		-0,0139	0,00019		
	8	49,848		-0,0599	0,00359		
	9	49,942		0,0341	0,00116		
	10	49,921		0,0131	0,00017		



Obr. 38 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 6 - materiál 11 375

Tab. 8 Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

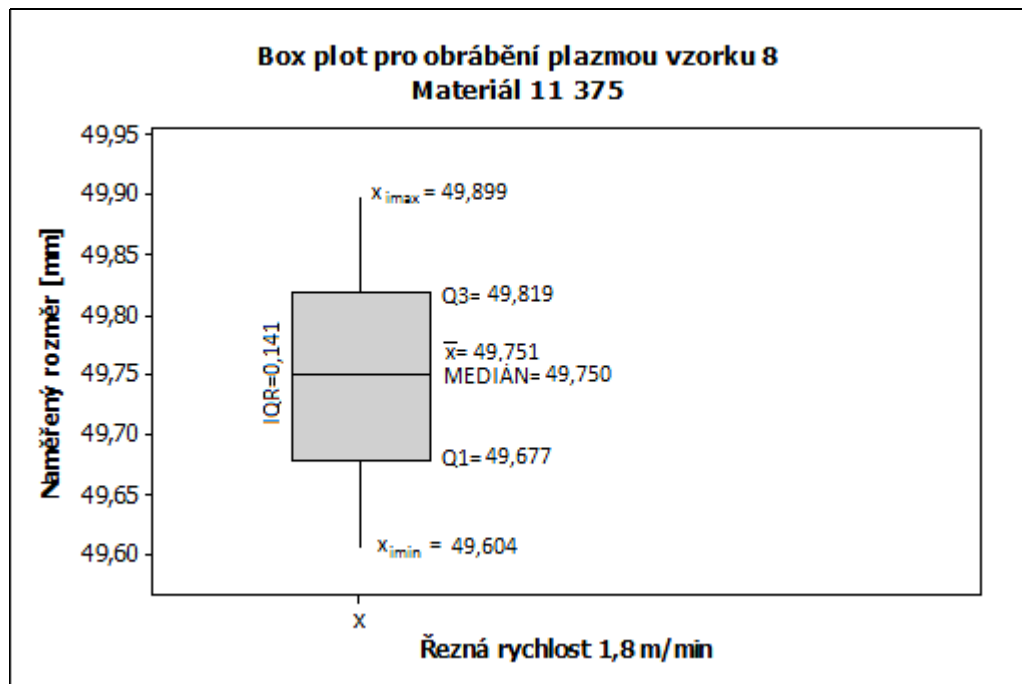
7. PLAZMA vzorek 7 - 11 375 - 2,16 m/min							
Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]	
1	49,921	49,8452	0,0758	0,00575	0,0693	0,1389	
2	49,981		0,1358	0,01844			
3	49,829		-0,0162	0,00026			
4	49,818		-0,0272	0,00074			
5	49,758		-0,0872	0,00760			
6	49,863		0,0178	0,00032			
7	49,769		-0,0762	0,00581			
8	49,885		0,0398	0,00158			
9	49,795		-0,0502	0,00252			
10	49,833		-0,0122	0,00015			



Obr. 39 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 7 - materiál 11 375

Tab. 9 Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 11 375 – obrábění plazmou

8.	PLAZMA vzorek 8 - 11 375 - 1,8 m/min						
	Č. měření	Hodnota [mm]	\bar{x} [mm]	$x_i - \bar{x}$ [mm]	$(x_i - \bar{x})^2$ [mm]	s [mm]	V_x [%]
Měření v ose x	1	49,676	49,7513	-0,0753	0,00567	0,0950	0,1908
	2	49,783		0,0317	0,00100		
	3	49,899		0,1477	0,02182		
	4	49,797		0,0457	0,00209		
	5	49,717		-0,0343	0,00118		
	6	49,784		0,0327	0,00107		
	7	49,884		0,1327	0,01761		
	8	49,678		-0,0733	0,00537		
	9	49,604		-0,1473	0,02170		
	10	49,691		-0,0603	0,00364		



Obr. 40 Box plot pro obrábění plazmou vzorku 8 - materiál 11 375

Přehled výsledků po obrábění plazmou materiálu 11 375 v ose x:

Variable	Mean	StDev	CoefVar	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
IQR 4,32 0,142	50,323	0,0676	0,13	50,245	50,266	50,310	50,407	50,414
3,96 0,153	50,231	0,0722	0,14	50,132	50,150	50,246	50,303	50,323
3,6 0,132	50,150	0,0815	0,16	50,035	50,085	50,139	50,217	50,279
3,24 0,114	50,063	0,0925	0,18	49,958	49,995	50,046	50,110	50,272
2,88 0,084	49,944	0,0446	0,09	49,875	49,901	49,960	49,985	49,999
2,52 0,087	49,908	0,0432	0,09	49,848	49,861	49,909	49,947	49,969
2,16 0,105	49,845	0,0693	0,14	49,758	49,788	49,831	49,894	49,981
1,8 0,141	49,751	0,0950	0,19	49,604	49,677	49,750	49,819	49,899

Kde:

Variable – proměnná (řezná rychlost [m/min])

Mean – aritmetický průměr

StDev – směrodatná odchylka

CoefVar – Variační koeficient

Minimum – nejnižší naměřená hodnota

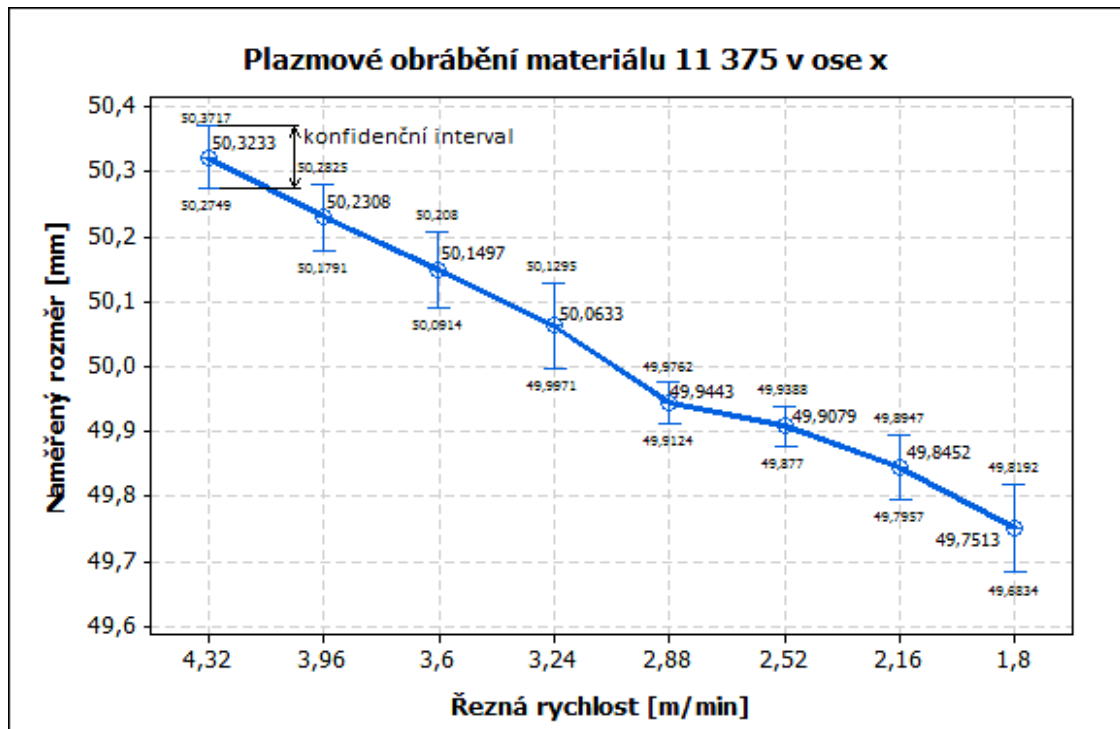
Q1 – první kvartil

Median – Medián

Q3 – třetí kvartil

Maximum – nejvyšší naměřená hodnota

IQR – rozdíl mezi prvním a třetím kvartilem



Obr. 41 Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose x vyrobených plazmovým obráběním

Interpretace výsledků pro vzorek 1 obráběný v ose x: S pravděpodobností $1-\alpha=0,95$, neznámá hodnota aritmetického průměru základního souboru μ , leží v konfidenčním intervalu od 50,2749 mm do 50,3717 mm na základě $n=10$ měření. Vidíme, že se snižující se řeznou rychlostí roste množství tepla, které přechází do obrobku a zvyšuje se tak množství odebíraného materiálu.

Závěr:

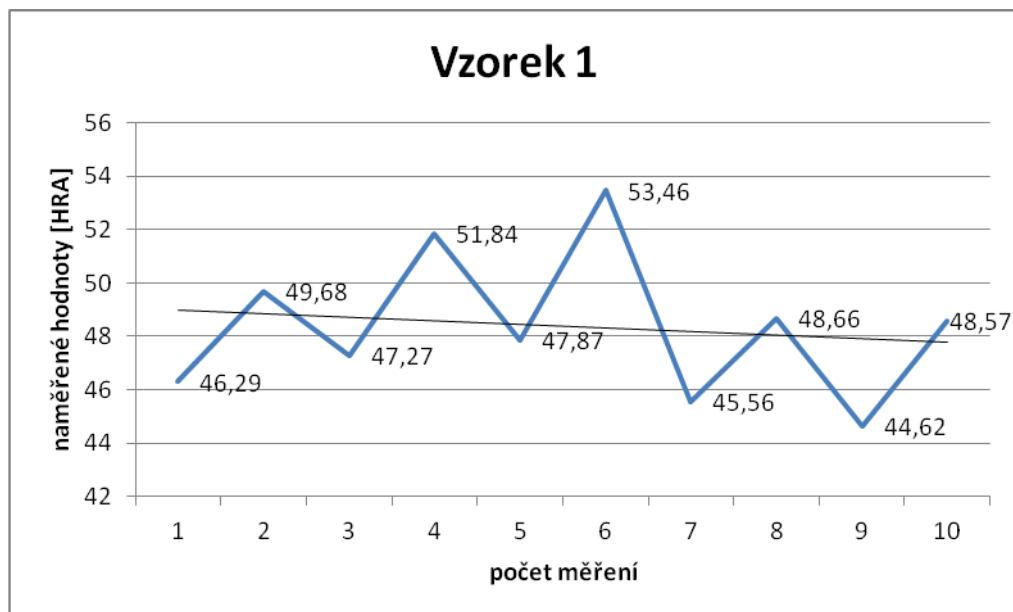
Plocha materiálu 11 375 obrobená plazmovou technologií je velmi jemná, bez výrazných stop po plazmovém paprsku. Se snižující se rychlostí se zvětšuje množství zatuhlého materiálu na spodní části řezné hrany. Je to velmi nežádoucí jev, který je nutné po obrábění plazmovým paprskem odstraňovat dalšími technologickými operacemi. Při obrábění materiálu 11 375 plazmovým paprskem se také projevilo zešikmení řezné plochy. Pro optimalizaci procesu řezání plazmovým paprskem z hlediska optického hodnocení kvality obrobku bychom zvolili řeznou rychlost 3,96 m/min, což by představovalo 10% zvýšení oproti defaultnímu nastavení plazmového obráběcího zařízení pro konstrukční ocel tloušťky 6 mm.

8.2 Vyhodnocení struktury a tvrdosti u oceli 11 375

Při vyhodnocování byly použity 3 vzorky vyřezané pomocí plazmového paprsku. Cílem experimentu bylo zjistit, jak se mění tvrdost a struktura se vzdáleností od řezu plazmy. Jednotlivá měření byla prováděna na každém vzorku od okraje s posunem o 1,5 mm.

Tab. 10 Měření tvrdosti vzorku 1. Z oceli 11 375 – obrábění plazmou

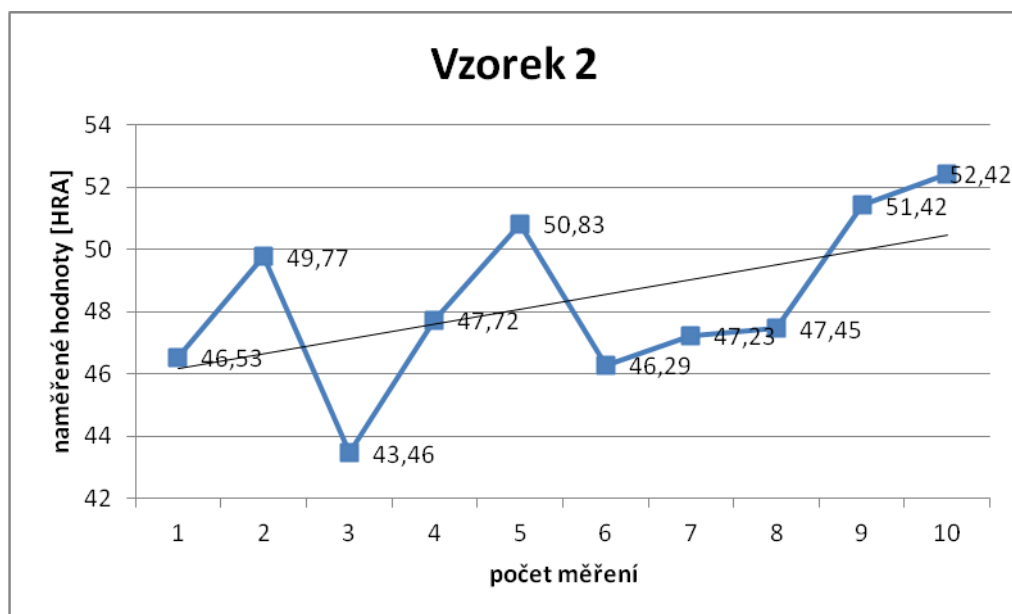
1.	Plazma vzorek 1 – 11 375						
	Č. měření	Hodnota [HRA]	\bar{x} [HRA]	$x_i - \bar{x}$ [HRA]	$(x_i - \bar{x})^2$ [HRA]	s [HRA]	V_x [%]
Měření tvrdosti HRA	1	46,29	48,3820	-2,0920	4,37646	2,7393	5,6618
	2	49,68		1,2980	1,68480		
	3	47,27		-1,1120	1,23654		
	4	51,84		3,4580	11,95776		
	5	47,87		-0,5120	0,26214		
	6	53,46		5,0780	25,78608		
	7	45,56		-2,8220	7,96368		
	8	48,66		0,2780	0,07728		
	9	44,62		-3,7620	14,15264		
	10	48,57		0,1880	0,03534		



Obr. 42 Výsledky měření tvrdosti vzorku 1 z oceli 11 375

Tab. 11 Měření tvrdosti vzorku 2. Z oceli 11 375 – obrábění plazmou

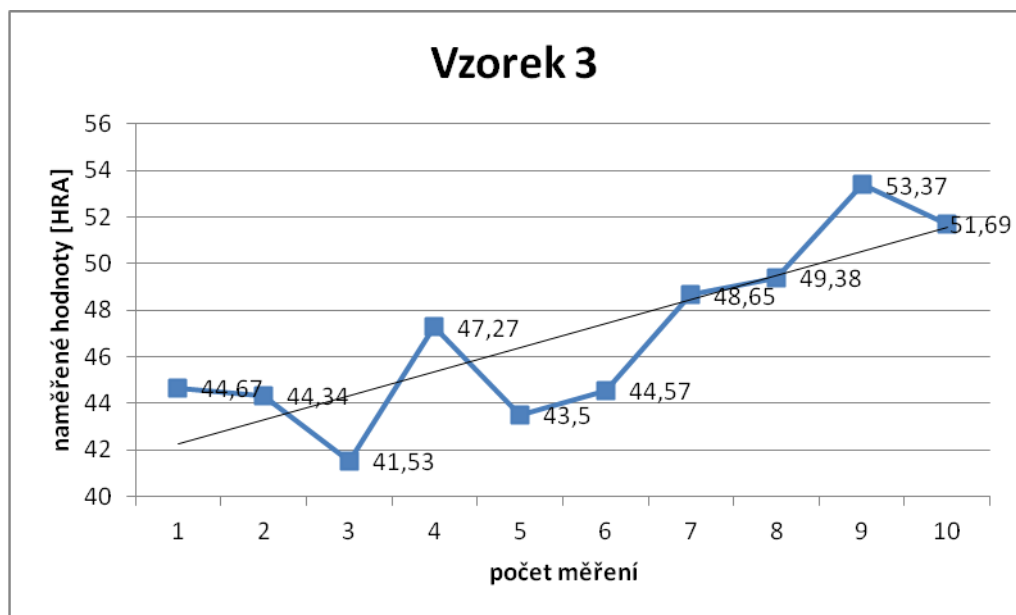
2.	Plazma vzorek 2 – 11 375						
	Č. měření	Hodnota [HRA]	\bar{x} [HRA]	$x_i - \bar{x}$ [HRA]	$(x_i - \bar{x})^2$ [HRA]	s [HRA]	V_x [%]
Měření tvrdosti HRA	1	46,53	48,3120	-1,7820	3,17552	2,7502	5,6925
	2	49,77		1,4580	2,12576		
	3	43,46		-4,8520	23,54190		
	4	47,72		-0,5920	0,35046		
	5	50,83		2,5180	6,34032		
	6	46,29		-2,0220	4,08848		
	7	47,23		-1,0820	1,17072		
	8	47,45		-0,8620	0,74304		
	9	51,42		3,1080	9,65966		
	10	52,42		4,1080	16,87566		



Obr. 43 Výsledky měření tvrdosti vzorku 2 z oceli 11 375

Tab. 12 Měření tvrdosti vzorku 3. Z oceli 11 375 – obrábění plazmou

3.	Plazma vzorek 3 – 11 375						
	Č. měření	Hodnota [HRA]	\bar{x} [HRA]	$x_i - \bar{x}$ [HRA]	$(x_i - \bar{x})^2$ [HRA]	s [HRA]	V_x [%]
Měření tvrdosti HRA	1	44,67	46,8970	-2,2270	4,95953	3,8226	8,1509
	2	44,34		-2,5570	6,53825		
	3	41,53		-5,3670	28,80469		
	4	47,27		0,3730	0,13913		
	5	43,5		-3,3970	11,53961		
	6	44,57		-2,3270	5,41493		
	7	48,65		1,7530	3,07301		
	8	49,38		2,4830	6,16529		
	9	53,37		6,4730	41,89973		
	10	51,69		4,7930	22,97285		



Obr. 44 Výsledky měření tvrdosti vzorku 3 z oceli 11 375

Závěr:

U obrábění plazmou došlo díky různým tloušťkám vzorků, vysokým teplotám a následně vysoké energii při obrábění k popuštění povrchu. Z toho plyne, že při vyhodnocení výsledků měření byl zjištěn větší rozptyl i směrodatné odchylky.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit technologii plazmovým obráběním. Touto technologií byly vyrobeny vzorky z plechu tloušťky 6mm. Na těchto vzorcích byla vyhodnocována rozměrová přesnost a kvalita obráběných ploch. Jako materiál vzorků byla použita klasická konstrukční ocel 11 375.

Při obrábění vzorků byla proměnným parametrem řezná rychlost. Při statistickém vyhodnocování výsledků měření byla u použité technologie nalezena taková závislost, že se snižující se řeznou rychlostí se zvětšovalo množství odebíraného materiálu, což bylo způsobeno delším tepelným působením plazmového paprsku na obrobek. Při delším čase interakce paprsku s obrobkem roste množství tepla přecházejícího do obrobku a dojde tak k natavení a odpaření větší vrstvy materiálu.

Kdybychom chtěli určit ideální řeznou rychlost z hlediska rozměrové přesnosti obrábění, zvolili bychom tyto parametry:

Materiál 11 375 – obrábění plazmou – 3,24 m/min

Pro výsledné nastavení řezné rychlosti na obráběcím stroji nemohou být tyto hodnoty brány příliš závazně, protože se musí brát v potaz také kvalita obráběných ploch. Ta byla při obrábění nerezového materiálu plazmovým paprskem řeznou rychlostí 1,02 m/min zcela nevyhovující, protože na obrobku ulpívalo velké množství odtavovaného materiálu. Musí se tedy volit určitý kompromis mezi rozměrovou přesností a kvalitou obrobených ploch.

Po zvážení těchto dvou aspektů bychom volili výsledné parametry řezné rychlosti následující:

Materiál 11 375 – obrábění plazmou – 3,96 m/min

Ve všech případech je optimální řezná rychlost vyšší, než je výchozí nastavená řezná rychlost obráběcích zařízení. Znamenalo by to tedy kratší výrobní časy a větší efektivitu výroby.

Dalším experimentem bylo měření tvrdosti u 3 vzorků taktéž z oceli 11 375, kde se zjišťovala změna struktury a tím i vliv změny tvrdosti se vzdáleností od řezu plazmovým paprskem. Měřením a následným zpracováním dat bylo vyhodnoceno, že se jedná o nehomogenní materiál vzorků, došlo k popuštění povrchu a díky různým tloušťkám vzorků bylo zjištěno, že struktura povrchu je měkká a tvrdost byla ovlivněna vysokou energií zapříčiněnou vznikem vysokých teplot při obrábění.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Lukovics, I.: Konstrukční materiály a technologie. NVUT Brno, 1991. ISBN 80-214-0399-3.
- [2] Maňková, I.: Progresivné technologie. Viena Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4
- [3] KUDĚLKA, J.: Analýza nekonvenčních technologií se zaměřením na elektrotepelné principy, UTB Zlín 2008
- [4] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
- [5] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil.html>
- [6] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
- [7] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
- [8] <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>
- [9] Mlčoch : Řízení kvality a strojírenská metrologie, SNTL/ALFA, Praha, 1987
- [10] Whitehouse, D. J. : Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces. Annals of CIRP, Vol. 37/2, 1988, s. 649 – 653
- [11] Leonardo, P. M. – Trumpold, H. – De Chiffre, L. : Progress in 3D surface microtopography characterization. Annals of CIRP, Vol. 45/2, 1996, s. 589 -598
- [12] Bumbálek, L. : Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu, CERM Brno, 2004
- [13] Bumbálek, B., Obvody, V., Ošťádal, B. : Drsnost povrchu, SNTL Praha, 1989
- [14] http://www.feron.cz/cze/katalog/mat_normy.php

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ECM	Elektrochemické obrábění
CM	Chemické obrábění
USM	Ultrazvukové obrábění
LBM	Obrábění paprskem fotonů-laserem
EBM	Obrábění paprskem elektronů
WJM	Obrábění vodním paprskem
PCM	Fotochemické obrábění
AJM	Obrábění abrazivním paprskem
AFM	Obrábění abrazivním paprskem
PAM	Obrábění plazmovým paprskem
ECG	Elektrochemické broušení
EDM	Elektroerozivní obrábění
IBM	Obrábění paprskem iontů
n	Počet měření
\bar{x}	Odhad aritmetického průměru [mm]
s	Odhad směrodatné odchylky [mm]
V_x	Variační koeficient
Q_1	První kvartil [mm]
Q_3	Třetí kvartil [mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění [3]</i>	14
<i>Obr. 2 Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění [4]</i>	16
<i>Obr. 3 Schéma elektroerozivního stroje [4]</i>	17
<i>Obr. 4 Princip elektroerozivního řezání drátovou elektrodou</i>	18
<i>Obr. 5 Schéma naznačení výroby díry v obrobku [4]</i>	19
<i>Obr. 6 Princip zařízení pro elektrokontaktní obrábění</i>	20
<i>Obr. 7 Schéma broušení kotouče</i>	21
<i>Obr. 8 Princip metody pro obrábění ultrazvukem [5]</i>	24
<i>Obr. 9 Zařízení pro obrábění ultrazvukem [5]</i>	25
<i>Obr. 10 Stroj pro řezání ultrazvukem [5]</i>	26
<i>Obr. 11 Řezání ultrazvukovou metodou [5]</i>	27
<i>Obr. 12 Hloubení průchozích otvorů [5]</i>	27
<i>Obr. 13 Broušení rovinné plochy [5]</i>	28
<i>Obr. 14 Schéma zařízení pro obrábění laserem [6]</i>	30
<i>Obr. 15 Podíl na trhu dle typu laserů [6]</i>	32
<i>Obr. 16 Procento rozdělení jednotlivých technologií [6]</i>	33
<i>Obr. 17 Oblasti pracovních parametrů laserů [6]</i>	34
<i>Obr. 18 Princip metody obrábění elektronovým paprskem</i>	35
<i>Obr. 19 Vysokotlaký vodní paprsek, vysokotlaký vodní paprsek</i>	36
<i>Obr. 20 Princip obrábění abrazivním paprskem [2]</i>	37
<i>Obr. 21 Plazmové hořáky s plynovou stabilizací [7]</i>	38
<i>Obr. 22 Zařízení pro řezání plazmatem [7]</i>	41
<i>Obr. 23 Pohled do pracovního prostoru řezacího stroje [7]</i>	42
<i>Obr. 24 Schéma svařování plazmatem [7]</i>	43
<i>Obr. 25 Drsnost povrchu základních způsobů obrábění</i>	47
<i>Obr. 26 Příčná a podélná drsnost profilu</i>	48
<i>Obr. 27 3D model obráběného vzorku</i>	52
<i>Obr. 28 Plazmový obráběcí stroj MGM OMNICUT 4000</i>	53
<i>Obr. 29 Pálicí hlava Kjellberg</i>	54
<i>Obr. 30 Měření mikrometrem Mitutoyo</i>	54
<i>Obr. 31 Univerzální dílenský mikroskop</i>	55

<i>Obr. 32</i>	<i>Obrábění oceli 11 375 plazmovým paprskem</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 33</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 1 - materiál 11 375.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 34</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 2 - materiál 11 375.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 3 - materiál 11 375.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 36</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 4 - materiál 11 375.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 37</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 5 - materiál 11 375.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 38</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 6 - materiál 11 375.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 39</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 7 - materiál 11 375.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 40</i>	<i>Box plot pro obrábění plazmou vzorku 8 - materiál 11 375.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 41</i>	<i>Výsledky měření vzorků z oceli 11 375 v ose x vyrobených plazmovým.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 42</i>	<i>Výsledky měření tvrdosti vzorku 1 z oceli 11 375</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 43</i>	<i>Výsledky měření tvrdosti vzorku 2 z oceli 11 375</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 44</i>	<i>Výsledky měření tvrdosti vzorku 3 z oceli 11 375</i>	<i>69</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Chemické složení oceli 11 375 [13]</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 2: Měření rozměrů vzorku 1. z oceli 11 375 – obrábění plazmou.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 3: Měření rozměrů vzorku 2. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 4: Měření rozměrů vzorku 3. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 5: Měření rozměrů vzorku 4. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6: Měření rozměrů vzorku 5. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 7: Měření rozměrů vzorku 6. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 8: Měření rozměrů vzorku 7. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 9: Měření rozměrů vzorku 8. z oceli 11 375 – obrábění plazmou</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 10: Měření tvrdosti vzorku 1. Z oceli 11 375 – obrábění plazmou.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 11: Měření tvrdosti vzorku 2. Z oceli 11 375 – obrábění plazmou.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 12: Měření tvrdosti vzorku 3. Z oceli 11 375 – obrábění plazmou.....</i>	<i>69</i>