

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nekonvenční obrábění z pohledu obrobeného povrchu

Autor: **Martin Kršek**

Vedoucí práce: **Ing. Ivana Zetková**

Akademický rok 2014/2015

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kršek	Jméno Martin	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie - technologie obrábění		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková	Jméno Ivana	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Nekonvenční obrábění z pohledu obrobeného povrchu		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	43	TEXTOVÁ ČÁST	43	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, PŘÍNOSY, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce na téma „Nekonvenční obrábění z pohledu obrobeného povrchu“ se zabývá nejprve rozdělením a popisem zvolených metod z pohledu principu, použití, výhod a nevýhod. V další části je rozebrána kvalita obrobených povrchů různých materiálů z hlediska struktury obrobeného povrchu, drsnosti povrchu, přesnosti a hloubky řezu. Následně jsou tyto výsledky vyhodnoceny a porovnány z pohledu kvality a struktury obrobeného povrchu různých materiálů a dosažených obráběcích parametrů.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	nekonvenční způsoby obrábění, kvalita, drsnost, přesnost, hloubka úběru, obrobený povrch, druhy a použití obrábění, povrchové vady, struktura povrchu, tříška

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

ATHOR	Surname Kršek	Name Martin	
FIELD OF STUDY	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetková	Name Ivana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The unconventional machining from the viewpoint of the machined surface		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining technology	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eg. A4)

TOTALLY	43	TEXT PART	43	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis "The unconventional machining from the viewpoint of the machined surface" first of all deals with the division and description of the selected methods from the perspective of principle, usage, advantages and disadvantages. In the next part is analyzed the quality of the machined surfaces of various materials in terms of the structure of the machined surface, surface roughness, accuracy and depth of the cut. Subsequently, these results are evaluated and compared in terms of the quality and structure of the machined surface of various materials and achieved machining parameters.
KEY WORDS	non-conventional machining methods, quality, roughness, accuracy, removal depth, machined surface, species and the use of machining, surface defects, surface structure, chip

Obsah

Obsah	6
Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek.....	7
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	8
1 Úvod [1]	9
2 Rozbor současného stavu [2, 3].....	10
2.1 Obrábění paprskem koncentrované energie	11
2.1.1 Obrábění paprskem fotonů – laserem	11
2.1.1.1 Laserové dělení materiálu [5, 18]	13
2.1.1.2 Laserový předehřev při soustružení [27]	16
2.1.1.3 Laserový předehřev při frézování [38]	18
2.1.2 Obrábění plazmou.....	18
2.1.2.1 Plazmové dělení materiálu [21, 22, 23]	20
2.1.2.2 Plazmové obrábění [37,41]	22
2.2 Obrábění mechanickým způsobem.....	23
2.2.1 Obrábění ultrazvukem.....	23
2.2.1.1 Ultrazvukové nárazové obrábění (USM) [1, 32]	25
2.2.1.2 Rotační ultrazvukové obrábění (RUM) [1, 33].....	26
2.2.1.3 Soustružení s podporou ultrazvuku [35, 36]	28
2.2.2 Obrábění vodním paprskem	29
2.2.2.1 Dělení materiálu vodním paprskem [17, 19, 20]	30
3 Porovnání nekonvenčních způsobů obrábění	34
3.1 Nekonenční a konvenční metody obrábění	34
3.2 Nekonenční a konvenční metody obrábění	35
3.3 Nekonenční metody obrábění při dělení materiálu.....	36
3.4 Laserový předehřev při soustružení [27].....	36
3.5 Plazmový předehřev před břítem řezného nástroje [41].....	37
3.6 Soustružení s podporou ultrazvuku [35, 36].....	37
4 Závěr.....	38
5 Použitá literatura	40

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip obrábění paprskem laseru [14].....	11
Obrázek 2: Předehřev laserem při soustružení [8]	13
Obrázek 3: Předehřev laserem při frézování [8]	13
Obrázek 4: Povrchové rýhy (nerezová ocel) při řezání CO ₂ laserem [26].....	14
Obrázek 5: Vstupní průměry o různých impulzech materiálu ČSN EN 10088-1 [39]	16
Obrázek 6: Mikrostruktura ČSN 14 100 oceli [27].....	17
Obrázek 7: Tvorba třísky při různých výkonech laseru [27]	18
Obrázek 8: Princip obrábění paprskem plazmy [34].....	19
Obrázek 9: Řezná hrana konstrukční oceli ČSN 11523 [30]	21
Obrázek 10: Struktura povrchu SiC s PVD povlakem [37]	23
Obrázek 11: Princip ultrazvukového obrábění [2]	23
Obrázek 12: Princip soustružení podporovaného ultrazvukem [10].....	25
Obrázek 13: Příčný řez SiC (karbid křemíku) [32]	26
Obrázek 14: Kvalita výstupního otvoru C/SiC [33].....	27
Obrázek 15: Výchozí pórovitost C/SiC[33]	27
Obrázek 16: Podpovrchová vrstva titanové slitiny (strukturní typ beta) [35].....	28
Obrázek 17: Princip obrábění vodním paprskem [2]	29
Obrázek 18: Řez vodním paprskem (keramika) [28]	31
Obrázek 19: Mikrostruktura před vrtáním a vrtané okraje děr [40].....	33

Seznam tabulek

Tabulka 1: Drsnosti na tloušťce materiálu [26].....	15
Tabulka 2: Základní kvalitativní stupně řezání vodním paprskem [19].....	32
Tabulka 3: Použití nekonvenčních metod z hlediska materiálů [1]	34
Tabulka 4: Charakteristika nekonvenčních obrábění na obráběcích parametrech [1]	35
Tabulka 5: Porovnání dosažených parametrů při řezání [1, 5, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]	36

Přehled použitých zkratek a symbolů

CNC – číslicové řízení počítačem

mm – milimetr (délková jednotka)

μm – mikrometr = 10^{-6} m (jednotka délky)

$^{\circ}\text{C}$ – Celsiův stupeň (jednotka teploty)

kHz – kilohertz (jednotka frekvence)

HRC – zkouška tvrdosti podle Rockwella

MPa – megapascal (jednotka tlaku)

m/s – metr za sekundu (jednotka rychlosti)

Nd: YAG – typ pevnolátkového laseru

CO_2 – typ plynového laseru (oxid uhličitý)

H_2O – chemická sloučenina vodíku a kyslíku (voda)

Ar/ H_2 – argon/dvouatomový vodík

Si_3N_4 – nitrid křemičitý

ZrO – oxid zirkončitý

Ra – střední aritmetická úchylka profilu

Rq – průměrná kvadratická odchylka profilu

ČSN – česká technická norma

USM – Ultrasonic machining

RUM – Rotary Ultrasonic Machining

A – ampér (je základní jednotka soustavy SI pro elektrický proud)

CVD - Chemical vapor deposition

1 Úvod [1]

V dnešní průmyslové době především ve strojírenském průmyslu je využíváno mnoho druhů a způsobů, jak docílit obráběním výsledný produkt daných rozměrů a tvarů. Mezi nimi je i způsob, který se nazývá nekonvenční obrábění. Tato metoda už je známá delší dobu a našla si své uplatnění jak ve strojírenství, tak i v jiných oborech. Mnozí lidé mají alespoň drobné povědomí o konvenčním obrábění např. soustružení, frézování, broušení nebo vrtání, ale o nekonvenčních metodách obrábění už toho moc nevědí. Hlavní odlišností od konvenčního obrábění je, že se využívá jevů jako světelná energie u laserového obrábění nebo proud vody u obrábění vodním paprskem. Rostoucí použití této metody se odráží v aplikování nových konstrukčních materiálů s vysokou pevností, tvrdostí, houževnatostí a odolností proti opotřebení. Nekonvenční obrábění se používá u materiálů, které nelze hospodárně a kvalitativně obrábět konvenčním obráběním (nerezová ocel, kompozitní materiály, titanové slitiny, slinuté karbidy a keramika).

U nekonvenčního obrábění se nepoužívá obvyklý řezný nástroj, u kterého se označují pracovní části nástroje (např. čelo, břit atd.). Většinou jsou využívány CNC řídicí systémy, které usnadňují a rozšiřují jejich možnosti obrábění. Využívá tepelného, elektrického, chemického či mechanického principu. K rozvoji nekonvenčních obrábění došlo v druhé polovině 20. století. Tato metoda se v dalších letech postupně a intenzivně rozšiřovala, své použití našla při řešení problémů v leteckém a kosmonautickém průmyslu, při zpracování nových materiálů jako jsou kompozity, keramika, kalené oceli, plasty atd. V dnešní době se v mnohých obráběcích operacích využívá více než konvenční obrábění. Technologie nekonvenčního obrábění se postupně vyvíjí a zlepšuje, a to i se spojením s konvenčními metodami obrábění jako např. laserový předehřev u klasického soustružení nebo frézování a soustružení s podporou ultrazvuku.

V této bakalářské práci budou popsány různé metody nekonvenčních obrábění, jejich principy, rozdělení, výhody a nevýhody. Část práce se zaměří na způsoby použití, jako je řezání, vrtání a obrábění. Tyto způsoby obrábění budou posouzeny z pohledu obrobeného povrchu. Rozebrána bude rovněž kvalita obrobeného povrchu, jež patří mezi nejsledovanější parametr v obrábění. Na kvalitě obrobeného materiálu jsou závislé i další parametry, jedná se například o cenu, množství vyrobených kusů, časovou náročnost, zvolený druh obráběcího stroje a nástroje. Dále budou zhodnoceny různé dosažené parametry obrobené plochy (drsnost, přesnost a hloubka úběru materiálu). V této bakalářské práci budou zvoleny tyto metody nekonvenčního obrábění: obráběním laserem, ultrazvukem, plazmou a vodním paprskem. V neposlední řadě se tato bakalářská práce zaměří na inovace některých nekonvenčních metod obrábění v současné době.

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit a porovnat zvolené metody nekonvenčních způsobů obrábění z pohledu kvality obrobeného povrchu, jako je např. drsnost a přesnost, struktury obrobeného povrchu různých druhů materiálů.

2 Rozbor současného stavu [2, 3]

Nekonvenční technologie obrábění jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Většinou se jedná o bez silové působení na obráběný materiál, bez vzniku klasických třísek, které známe z konvenčního obrábění řeznými nástroji. Nekonvenční obrábění používáme tam, kde by byl klasický způsob obrábění (konvenční obrábění) velice složitý (např. tvarové součásti). Jsou to hlavně součásti s vysokou pevností a tvrdostí.

Charakteristika nekonvenčních obrábění [2, 4]

- nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu
- nástroje nemusí být tvrdší a pevnější než obráběný materiál
- možnost obrábění složitých tvarů
- možnost zavedení plné automatizace
- během výroby dochází ke změně vlastností povrchové vrstvy (odolnost proti korozi, pevnosti apod.)
- malá produktivita a vysoká energetická náročnost
- vysoká pořizovací cena obráběcích strojů a jejich vybavení
- menší hodnota úběru materiálu než u konvenčního obrábění

Rozdělení [4]

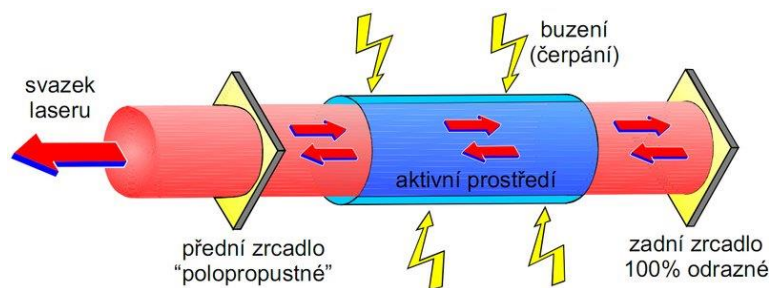
- Obrábění elektrickým výbojem:
 - Elektroerozivní obrábění
- Obrábění chemické:
 - Elektrochemické obrábění
 - Chemické obrábění
- Obrábění paprskem koncentrované energie:
 - Obrábění laserem
 - Obrábění plazmou
 - Obrábění elektronovým paprskem
- Obrábění mechanickým způsobem:
 - Obrábění ultrazvukem
 - Obrábění vodním paprskem

2.1 Obrábění paprskem koncentrované energie

2.1.1 Obrábění paprskem fotonů – laserem

Princip metody [2, 5]

Jde o přeměnu světelné energie na energii tepelnou. Materiál se taví a odpařuje. Laserové světlo vzniká v oblasti elektromagnetického záření. Jedná se o působení vysoké koncentrace elektromagnetického záření viditelného světla na malou plochu obrobku. Poté se přemění na tepelnou energii přesahující teplotu tavení obráběného materiálu. V místě dopadu se materiál roztaví a vypaří. Zdrojem záření je laser, jehož paprsky se přes optickou čočku soustředí na malou plochu. Lasery se dělí podle různých hledisek např. na polovodičové, plynové, kapalinové, plazmatické nebo podle vlnových délek na infračervené, ultrafialové, rentgenové.



Obrázek 1: Princip obrábění paprskem laseru [14]

Použití [5]

Ve strojírenském průmyslu se laser používá k vrtání, řezání, svařování, pájení, tepelnému zpracování, povrchovým úpravám a rovněž se využívá pro laserovou podporu konvenčního obrábění.

Řezání a vrtání laserem [6]

Laserovým řezáním se vyrábějí malé otvory. Především se využívá tam, kde jiné metody jsou obtížné. Díry mohou být kruhové i tvarové. Vrtat se můžou materiály jako kovy, plasty, textilie, dřevo, sklo, keramika a jiné. Laserové řezání se dělí na sublimační, tavné a pálení. Při sublimačním řezání je obráběný povrch odstraňován odpařováním vlivem vysoké intenzity záření laseru. Při tavném řezání je obráběný povrch odtavován a spolu s asistenčním plynem je odfukován z řezné spáry. Tímto způsobem jsou většinou řezány nekovové materiály. Při způsobu pálení se laserový paprsek ohřeje na danou teplotu a s přivedeným plynem dojde k exotermické reakci. Následně vznikne struska, která je odfukována asistenčním plynem. Používá se zejména na řezání titanu, nerezových ocelí a u ocelí s nízkým obsahem uhlíku.

Výhody [7]

- vysoká přesnost řezaných dílů
- řezání malých otvorů
- bez mechanického úběru materiálu
- žádná deformace obrobku
- vysoká řezná rychlost
- obrábění složitých součástí
- velmi malá šířka řezné spáry (0,2 až 0,4 mm)

Nevýhody [7]

- velké investiční náklady
- omezení tloušťky materiálu (konstrukční ocel do 25 mm, vysokolegovaná ocel do 15 mm, hliník do 10 mm)
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku
- tepelně ovlivněná oblast materiálu

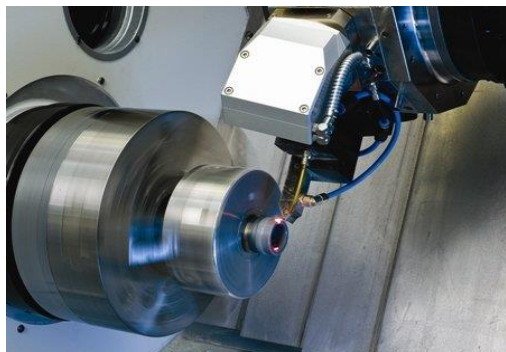
Obrobitelnost materiálu laserem je dána pohltivostí, tepelnou vodivostí a odrazivostí. Obrobitelnost materiálu je lepší, pokud je pohltivost materiálu větší a jeho tepelná vodivost s odrazivostí menší. [5]

Laserový předehřev při obrábění [8]

Využívá se hlavně u vysokopevnostních slitin a jiných těžkoobrobitelných materiálů. Nejpřednější výhodou předehřevu materiálu před břitím je snížení opotřebení nástroje a obrábění vyšší řeznou rychlostí.

a) Obrábění laserem při soustružení [8]

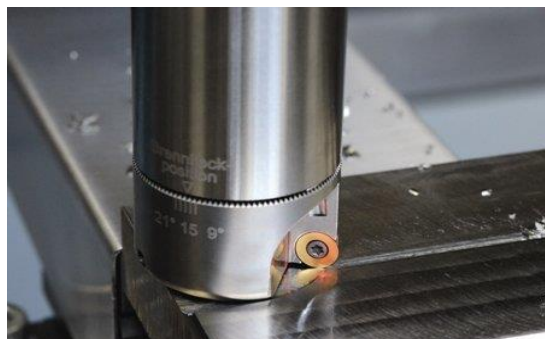
Jde o spojení klasického obrábění s laserovým předehřevem. Jedním upnutím je možné laserem povrch vytvrzovat nebo navařovat. Předehřívá se na teplotu kolem 800 až 1000 °C. To má za následek měknutí sklovité fáze mezi jednotlivými zrny. Tím klesá pevnost na povrchu a tvrdost. Není potřeba používat chladicích kapalin. Používá se u předehřevu pro soustružení dílů z technické keramiky, materiálů typu Si_3N_4 nebo ZrO aj. Hloubka řezu je do 2 mm, drsnost povrchu dosahuje i 0,2 μm . Dosahuje podobných hodnot jako u broušení, ale povrchová vrstva má lepší pevnostní parametry.



Obrázek 2: Předehřev laserem při soustružení [8]

b) Obrábění laserem při frézování [8]

Ohřev obrobku před břitem nástroje, který rotuje, je složitější než u soustružnických operací. Laserový paprsek je přiváděn do dutiny vřetena. Optická soustava rotuje. Soustavou prochází paprsek současně v ose vřetene. Díky tomuto ohřevu obrobku dochází ke snížení pevnosti odebíraného materiálu bez ovlivnění okolní oblasti.



Obrázek 3: Předehřev laserem při frézování [8]

2.1.1.1 Laserové dělení materiálu [5, 18]

Při řezání kovových materiálů se nejvíce používají CO₂ lasery a pevnolátkové lasery. Dále se využívá tavné řezání. Spára je průběžně profukována asistenčním inertním plynem (např. dusíkem). Řezání je možno použít na různé druhy materiálů, jako konstrukční oceli do tloušťky 15 mm, nerezové oceli do tloušťky 10 mm, hliník a hliníkové slitiny do tloušťky 3 mm, mosaz do tloušťky 3 mm, dále i na některé dřevěné materiály a plasty. Horní hranice technologických možností kvalitativního laserového řezání v běžné praxi je tloušťka materiálu 25 - 30 mm. Do tloušťky 5 - 8 mm je řez hladký, rovný a bez okují. Rychlost řezání je závislá na způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu a na tloušťce a druhu řezaného materiálu. Běžná drsnost řezaného materiálu se pohybuje v rozmezí Ra 3,6 až 12 μm a tloušťka tepelně ovlivněné oblasti je 0,05 až 0,2 mm. Přesnost řezání je cca ± 0,1 mm a šířka řezné spáry bývá 0,02 - 0,2 mm.

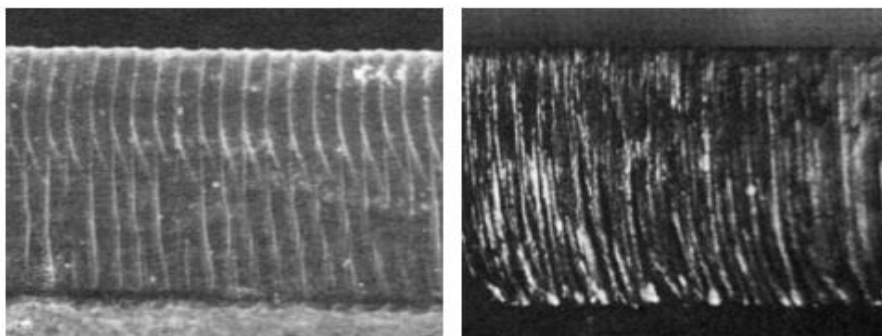
Při vrtání laserem se vytvářejí otvory bezdotykově, většinou laserem pevnolátkovým typu (Nd: YAG nebo CO₂ laserem). Díry lze vrtat dvěma způsoby, a to jednotlivými impulsy laseru nebo nárazovým vrtáním (více impulsů s kratším trváním). Díry je možno vrtat do černých plechů o minimálním průměru 0,8 až jednonásobku tloušťky materiálu (např. D8 do tloušťky 10 mm). Do nerezů se vrtají otvory menší od 0,5 násobku tloušťky. Ve speciálních případech je možno vrtat otvory i menší, ale záleží na druhu materiálu, hustotě otvorů a na dalších parametrech. V dnešní době je nejvíce využíváno laserové nárazové vrtání. Každý impuls laseru odstraní určité množství obráběného materiálu. Tento způsob vrtání se především používá u vrtání malých otvorů. Laserové nárazové vrtání ukazuje velkou rychlost v poměru vrtaných otvorů. Z toho vyplývá, že může být dosaženo vrtaných otvorů dobré kvality s vysokou přesností, pokud jsou nastaveny správné parametry. Pro tento způsob vrtání se obvykle používají materiály z nerezové oceli nebo niklové slitiny. Hlavní výhodou tohoto způsobu vrtání v porovnání s jinými metodami je možnost vrtání mnoha děr za určitých podmínek.

Obrobený povrch při laserovém řezání [15, 16, 26]

Mezi přední faktory ovlivňující kvalitu obrobeného povrchu při řezání patří tvorba povrchových rýh a stusky. Povrch materiálu má obvykle pravidelné povrchové rýhy. To má za následek povrch drsnosti, který se mění s tloušťkou a také v závislosti na podmínkách zpracování. Na obr. 12 jsou zachyceny rýhy při řezání laserem (typ laseru CO₂). Příčinou těchto povrchových rýh je kolísání výkonu laseru, kolísání průtoku plynu nebo hydrodynamika proudu roztaveného kovu. Vytvořená stuska zvyšuje povrchové napětí a viskozitu roztaveného materiálu. Kvalita řezné plochy se zlepšuje kruhově polarizovanými paprsky, polohou ohniska paprsku na obrobku nebo těsně pod ním.

Maximální hloubka povrchových rýh se snižuje při zvyšující se řezné rychlosti. Tyto povrchové rýhy se zatím nepodařilo odstranit. Zmírnění těchto povrchových rýh by mohlo pomoci ke stabilizaci výkonu laseru a průtoku laseru na daný materiál.

Drsnost řezacích ploch se snižuje se zvyšující se rychlostí posuvu (kolem 800 - 1400 mm / min) laserového řezání. U laserového řezání se dosahuje nejmenšího úkosu ze všech tepelných metod dělení. Je závislý na tloušťce plechu, kolem 10 mm se úkos pohybuje do 1 stupně.



Obrázek 4: Povrchové rýhy (nerezová ocel) při řezání CO₂ laserem [26]

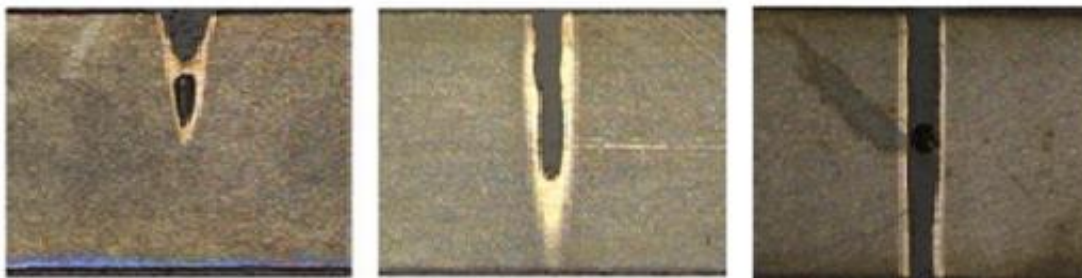
Tloušťka materiálu (mm)	Horní drsnost (μm)	Spodní drsnost (μm)
1	3	3
3	9	11
5	24	30
7	40	55
9	70	60
10	85	110

Tabulka 1: Drsnosti na tloušťce materiálu [26]

Obrobený povrch při laserovém vrtání [39]

Laserovým nárazovým vrtáním se obrábějí zejména díry od průměru 5 mm do 1 mm v široké škále materiálů. Pro tento způsob obrábění se používají lasery pevnolátkové (vláknový nebo Nd:YAG). Používá se většinou jeden pulz nebo série krátkých pulzů (0,01 – 100 m/s) o síle do 50 kW. Kombinace velmi dobrého pulzního výkonu a doby obrábění výrazně ovlivňuje mechanismus při odstraňování materiálu. Při krátkých impulzech a vysoké hustotě energie je materiál odstraňován za studena ablačním mechanismem. Na druhé straně při delších pulzech a nižší hustotě energie se odstraní materiál tavením a odpařováním. Jednou z hlavních nevýhod tohoto způsobu je nízká opakovatelnost. Hlavním hlediskem konečné geometrie otvorů a ořepu kolem děr je rozstřík taveniny. Rozstřík taveniny, který je způsoben nárazem laserového paprsku, má za následek nízkou opakovatelnost procesu. Při výrobě otvorů mohou být aplikovány dva mechanismy: roztavený materiál vyloučený tlakem plynu a odpařováním. I když při odstraňování materiálu je účinnější metoda pomocí roztavení materiálu, protože není zapotřebí poskytovat latentní teplo, kvalita otvorů se snižuje. Z tohoto důvodu se používá nejvíce metoda odpařování, v důsledku vyšší kvality otvorů.

Na obr. 5 jsou zobrazeny jednotlivé pulzy při vstupu do materiálu vláknovým laserem o výkonu 0,8 kW, v délce 0,3 m/s, při hustotě energie 10^7 až 10^8 W/cm², ve vzdálenosti mezi obrobkem a nástrojem 2 mm, do nerezového materiálu (ČSN EN 10088-1) o tloušťce 1 mm. Vrtaný materiál je zkoušený různými pulzy. Je vidět, že při jednom pulzu a pěti pulzech se díra nevyvrtá v celé tloušťce materiálu, přičemž při devíti pulzech je vyvrtaná díra i na výstupu.



Obrázek 5: Vstupní průměry o různých impulzech materiálu ČSN EN 10088-1 [39]

a) jeden pulz

b) pět pulzů

c) devět pulzů

Je možné pozorovat, že průměr vstupní díry je větší než průměr výstupní díry kvůli kuželovitému tvaru otvoru. Tento malý kuželový tvar svírá úhel 2 až 3 stupně. Jak je zmíněno dříve, jedná se o typický proces při laserovém vrtání vzhledem k mechanismu při odstraňování materiálu. Vnitřní průměr díry vykazuje velmi nízkou drsnost a dobrou kvalitu řezu. Dále je možno pozorovat, že některé dutinky jsou při vrtání přítomny ještě před úplným odstraněním materiálu z vrtané díry. Ukazuje se, že při odstraňování materiálu se snižuje objem materiálu při dalším pulzu. To má za následek rozostření laseru při zvětšující se hloubce řezu. Tento úkaz je důležitý především při určování maximální hloubky řezu.

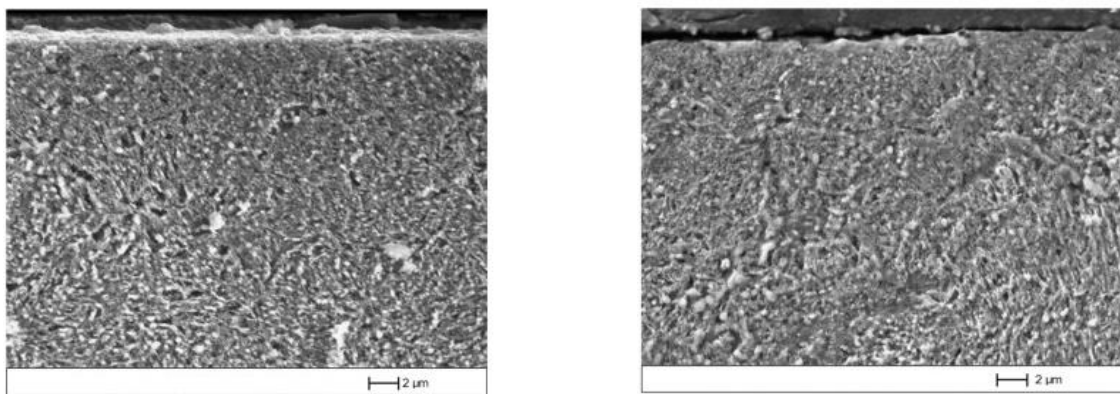
2.1.1.2 Laserový přehřev při soustružení [27]

Používá se typ laseru Nd: YAG (pevnolátkový laser - pulzní). Laserové asistované obrábění se ukazuje jako velmi efektivní alternativa za broušení tvrdých materiálů. Toto obrábění nemá žádný vliv na celistvost povrchu obrobku a úběr materiálu může být až 4krát rychlejší než běžné soustružení nebo broušení. Laserové zahřívání těsně před obrobkem o úhlu 60° snižuje pevnost ve smyku obráběného materiálu. Zvýšením teploty dochází ke snížení drsnosti, meze kluzu a tvrdosti obrobku. Dochází ke snížení odolnosti proti deformaci.

Obrobený povrch při laserovém přehřevu [27]

Laserový přehřev snižuje tok napětí v obráběném materiálu, a tím se snižuje vznikající teplo v materiálu v důsledku plastické deformace. Obráběcím nástrojem je použita keramická destička. Drsnost při laserovém přehřevu je menší než Ra 0,3 μm . Také se při laserovém přehřevu tvoří mechanicky zpevněná oblast. Tato zpevněná oblast je vyvolaná úhlem sklonu a změnou teploty při náhlém ochlazení. Měření mikrotvrdosti podpovrchové vrstvy ukazuje vyšší tvrdost povrchu i dolní vrstvy v hloubce 400 μm . Toto zvýšení mikrotvrdosti přímo souvisí s extrémní plastickou deformací v povrchové obráběné vrstvě. Na tvrdosti závisí náhodně rozdělené tvrdé cementické částice, které jsou různě odsazené.

Při konvenčním soustružení a při laserovém předehřevu se na materiálu tvoří bílá vrstva. Tato vrstva je tepelně ovlivněná zóna (mikrostrukturální vrstva) a může ovlivnit životnost obrobků.



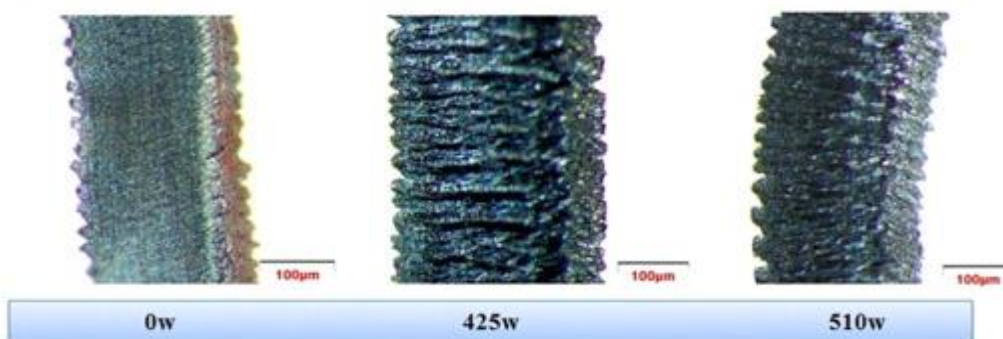
Obrázek 6: Mikrostruktura ČSN 14 100 oceli [27]

a) laserový předehřev při soustružení

b) konvenční soustružení

Při laserovém předehřevu o teplotě 200 až 250 °C, výkonu 425 W, s frekvencí 120 Hz, posuvem 0,08 mm/ot, o řezné rychlosti 70 m/min a v hloubce 0,2 mm je dokázáno snížení o 25% měrné řezné energie a zlepšení drsnosti o 18% v porovnání s konvenčním soustružením. Rovněž se ukazuje, že při nižší frekvenci s vyšší energií laserového pulzu se zvyšuje opotřebení obráběcího nástroje důsledkem průniku zvýšeného tepla do obrobku a vysoké teploty na rozhraní nástroje a obrobku. Pulzní laser umožňuje kontrolu povrchové teploty a pronikání tepla do všech oblastí obráběcího materiálu.

Třísky se deformuje jiným způsobem než jako u obyčejného konvenčního soustružení. Opotřebení a povrchová úprava třísky je ovlivněna tvorbou a typem třísky. Má více jednotný vzhled a jinou barvu, která je zapříčiněna vysokou teplotou. Rovněž má jednotnou plastickou deformaci. Při laserovém předehřevu se mění tvar třísky z pilového tvaru zubu na více kontinuální tvar.



Obrázek 7: Tvorba třísky při různých výkonech laseru [27]

2.1.1.3 Laserový předehřev při frézování [38]

Tento způsob obrábění zlepšuje obrobitelnost vysoce pevných, těžkoobrobitelných materiálů, hlavně slitiny titanu. Stále více tyto slitiny nahrazují tradiční materiály, jako jsou oceli a hliníkové slitiny. Kombinace frézování s podporou laserového ohřevu má výhodu v menší náchylnosti ke korozi a k tepelné roztažnosti. Tato technologie snižuje zatížení na obráběcím nástroji a změkčuje obráběný materiál. Změkčením obráběcího materiálu se snižuje mechanická pevnost materiálu. Následkem této změny dochází ke snížení obráběcího času, zvyšuje se úběr materiálu a prodlužuje se životnost nástroje. Dále se zvyšují obráběcí časy a náklady spojené s laserem. Jako nástroj se většinou používá čelní válcová fréza. Používaným typem laseru při předehřevu u frézování je laser pevnolátkový, plynový nebo diodový. Nejnovějším systémem laserového předehřevu při frézování je působení laserového paprsku přímo v rotujícím nástroji. Umožňuje minimalizovat tepelný příkon a efektivněji ohřívat materiál, dochází ovšem ke zvýšení provozních nákladů.

Obrobený povrch při laserovém předehřevu [38]

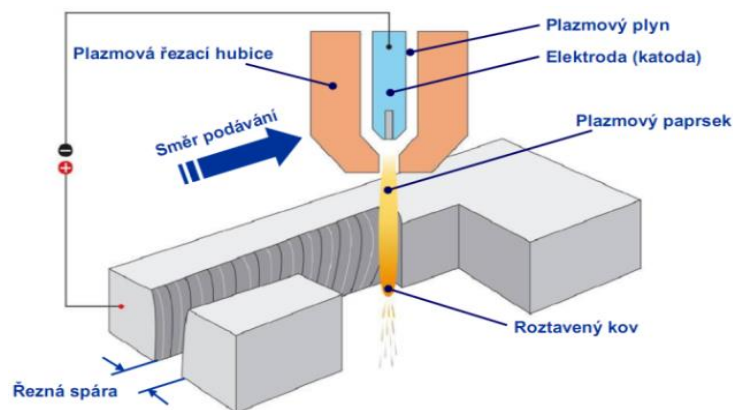
Při laserovém předehřevu, v porovnání s jinými zdroji, laserové zařízení přesně lokálně předehřívá obráběný materiál při vysokých intenzitách. Vzhledem k vysoké hustotě energie musí být energie laseru dobře řízena, aby se zabránilo tepelnému poškození mikrostruktury. V dnešní době se povětšinou používají pevnolátkové lasery (typ vláknový nebo Nd: YAG laser). V porovnání s konvenčním frézováním se snižuje řezná síla a opotřebení nástroje. V oblasti mikrostruktury se ukazuje tepelně ovlivněná oblast až do hloubky 1,5 mm. Při konstantní řezné síle může být hloubka úběru materiálu zvýšena až o 33% v porovnání s konvenčním frézováním.

2.1.2 Obrábění plazmou

Princip metody [2,12]

Materiál je odtavován a odpařován paprskem plazmy. Plazma je ionizovaný plyn, který vystupuje vysokou rychlostí z hořáku. Ionizací se dosahuje vysoké teploty, jež vzniká rozpadem molekul

plynu při průchodu elektrickým obloukem. Elektrický oblouk hoří mezi netavící se katodou (wolframová) a anodou. Teplota plazmy se pohybuje mezi 10000 až 30 000 °C. Plazmové hořáky se rozdělují na plazmové hořáky s plynovou a vodní stabilizací. Dále se plazmové hořáky dělí s plynovou stabilizací na s transferovaným a s netransferovaným obloukem. Používanými plyny jsou plyny plazmové (jednoatomový argon anebo dvouatomové plyny vodíku, dusíku, kyslíku a vzduchu), fokusační (argon, dusík nebo směs argonu a vodíku) a asistentní (argon, dusík).



Obrázek 8: Princip obrábění paprskem plazmy [34]

Použití [12]

Nejvíce se plazmové hořáky používají pro řezání, obrábění těžkoobrobitelných materiálů, svařování, navařování a tavení materiálů v pecích.

Řezání a vrtání plazmatem [12]

Mezi elektrodou a řezaným materiálem hoří elektrický oblouk. Ten je koncentrován pomocí chlazené trysky a ochranného plynu. Současně se dodává plazmový plyn. Řezaný materiál je taven. Tavenina a oxidy jsou vyfukovány z řezu plazmovým plynem.

Obrábění plazmatem [12]

Je možné obrábět dvěma způsoby, buď jako předehřev materiálu před břitem řezného nástroje nebo odtavováním materiálu z povrchu obrobku. U předehřevu mění materiál před břitem řezného nástroje mechanické a fyzikální vlastnosti. V závislosti na těchto změnách se také mění pevnost a tvrdost. Při druhém způsobu odtavování se materiál z povrchu obráběného materiálu taví a následně je vyfukován asistenčním plynem.

Řezné síly jsou malé a důsledkem toho se zvyšuje trvanlivost břitu. Používá se zejména při hrubování, při velkém množství obráběného materiálu. Obrobený povrch je tepelně ovlivněn a získává velkou drsnost.

Výhody [7]

- provoz jednoho a více hořáků
- velký výkon při řezání do tloušťky 30 mm
- velmi dobré vlastnosti obrábění u slabých a středních tlouštěk konstrukční oceli (do 30 mm)
- řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem
- vysoká řezná rychlost
- možnost řezání všech elektricky vodivých materiálů
- velmi dobrá automatizace

Nevýhody [7]

- omezení použití do tloušťky 200 mm u suchého řezání
- omezení do tloušťky 120 mm u řezání pod vodou
- širší řezná spára
- obtížné propalování otvorů tlouštěk nad 15 mm
- obrobitelné pouze vodivé materiál

2.1.2.1 Plazmové dělení materiálu [21, 22, 23]

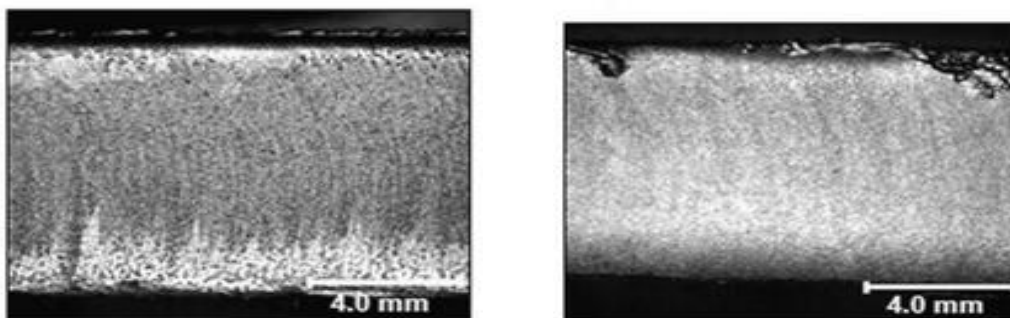
Řezat plazmou můžeme celou řadu různých kovů, včetně lakovaných a zkorodovaných. Toto řezání je vhodné pro řezání menších a středních tlouštěk nelegovaných ocelí (tloušťka do 50 mm, zdroj 600 A, H₂O), vysokolegovaných ocelí (tloušťka do 100 mm, zdroj 600 A, Ar/H₂), slitin hliníku (tloušťka do 120 mm, zdroj 600 A, Ar/H₂). Parametry řezání jsou hlavně rychlost řezání, výkon plazmového oblouku, průměr trysky a její vzdálenost od povrchu řezaného materiálu, použití plazmového plynu a stabilizace plazmy. Při řezání plazmovým paprskem dochází k vysoké rychlosti řezání, což umožňuje větší průnik tepla do materiálu, ale způsobuje nižší kvalitu řezu s úhlem podkosení (2 až 4 stupně). Šířka teplem ovlivněné oblasti je kolem 0,2 až 1,3 mm. Řezáním plazmou je dosaženo přesnosti až $\pm 0,15$ mm a šířka řezu se v závislosti na tloušťce materiálu pohybuje kolem 1 až 4 mm.

Velikost děr lze vypálit o minimálním 1,5 násobku tloušťky materiálu, menší díry se deformují. Díru lze vypálit při tloušťce 15 mm za dvě vteřiny, což je značně rychlé. Při vrtání vzniká vířivý proud plazmového plynu ve směru proti pohybu hodinových ručiček. To způsobí, že šikmost řezané plochy na pravé straně řezné mezery je menší než na levé straně. Plazmové hořáky mívají ochranné terčíky trysek udržující správnou výšku hořáku nad plechem, což umožňuje i kvalitní řez. Velmi dobré výsledky z hlediska výkonu lze získat při řezání pod vodou. Tato technologie snižuje v okolí řezu deformaci plechu, zabraňuje šíření škodlivých plynných emisí do okolí a také snižuje hlučnost.

Obrobený povrch [30, 31]

Pro dosažení dobré kvality řezu je zapotřebí uvažovat následující faktory: úhel řezu (stupeň řezné hrany), strusku (ztuhne na horní nebo spodní straně obrobku) a rovinnost řezné plochy (konkávní nebo konvexní plocha). Zvyšování nebo snižování rychlosti řezání je nepřímo úměrně závislé na tloušťce materiálu. Řezná rychlost snižuje množství roztaveného kovu, které nelze odstranit hybností proudu plazmatu.

Hlavními parametry dosažení kvalitního řezu je napětí oblouku a rychlost řezu, ne výkon oblouku. Nerovnosti řezu mohou být eliminovány, snížením rychlosti řezu. Plazmovým plynem při řezání je vzduch nebo kyslík. Na profilu povrchu řezu provedeným vzduchem převládají povrchové rýhy. Zvýšením posuvu řezné rychlosti jsou tyto rýhy jemnější a více zkosené. Za použití kyslíku převládají na profilu řezu povrchové rýhy mělké. Tyto povrchové linky jsou jemnější, než u řezání vzduchem. Struska se ukládá na krajích ve spodní části řezu. Při vysoké řezné rychlosti posuvu 2500 mm/min se nacházejí nepravidelné škodlivé prvky na krajích v horní části řezu. Proto je třeba zvolit optimální řeznou rychlost posuvu kolem 2000 m/min, vzhledem k nižší tvorbě povrchových vad, které se tvoří v horní a dolní části řezu. Drsnost povrchu řezné hrany u řezání kyslíkem je nižší než u řezání vzduchem. Důvodem tohoto snížení je snížení řezné rychlosti.



Obrázek 9: Řezná hrana konstrukční oceli ČSN 11523 [30]

a) vzduchem

b) kyslíkem

Při plazmovém řezání a vrtání se přenáší teplo z plazmového paprsku do obráběného materiálu. To má za následek smrštnutí, pnutí, mechanickou deformaci a chemickou modifikaci na obráběném materiálu. Jeden z hlavních problémů při přenosu tepla z plazmového paprsku do materiálu je deformace řezných hran, potéco je materiál obříben a ochlazen. Vzhledem k těmto deformacím je řezná hrana více nerovná, což má za následek, problémy v následných operacích.

V první fázi materiál absorbuje energii. Tato absorpce probíhá v tloušťce menší než jeden milimetr, takže je teplem ovlivňován pouze povrch materiálu. Teplota povrchu materiálu nestoupá plynule. Při vstupu plazmatického paprsku se taví na kov, což vede k fázové přeměně z pevného na kapalné blízko zdroji plazmatického paprsku. Poté co se materiál roztaví a latentní teplo je absorbováno bez dalšího zvýšení teploty. V další části se teplo přenáší do obrobku z teplejší části

do chladnější části kovu, což vede ke zvýšení teploty v řezaném materiálu. Plazmový paprsek proniká do obráběného materiálu konstantní rychlostí, zatímco proud plynu s vysokou řeznou rychlostí odstraňuje roztavený materiál ze spodní části řezu nebo řezné spáry.

Dalším jevem je změna tuhé fáze. Některé části materiálu se ohřívají až do velmi vysokých teplot (i když pod teplotou tání), se vytváří pevná fáze, které se později změní na jinou pevnou fázi, poté co je materiál ochlazen na relativně nízkou teplotu.

2.1.2.2 Plazmové obrábění [37,41]

Plazmový předehřev před břitem řezného nástroje [41]

Tento způsob obrábění se zejména používá pro špatné obrobitelné materiály, zejména v leteckém průmyslu. Tímto způsobem se sníží na zkoušeném materiálu Inconel 718 řezná síla o 30% při teplotě ohřevu kolem 600°C. To zapříčiňuje pokles pevnosti ve smyku. Při teplotě 550 °C je pozorována oxidace na určitých místech materiálu, která nepatrně zhoršuje kvalitu. Také se zlepši drsnost povrchu dvojnásobně, při plazmovém předehřevu a zvýší se životnost obráběcího nástroje o 40% ve srovnání se konvenčním soustružením. Tímto způsobem lze zlepšit vlastnosti na těžko obrobitelných materiálech. V porovnání plazmového předehřevu s laserovým předehřevem jsou vynaložené náklady na obrábění nižší.

Plazmové obrábění - odtavováním [37]

Optické a mechanické konstrukce, které jsou vyráběny z karbidu křemíku, jsou z velké většiny používány v leteckém a kosmickém průmyslu. Ačkoliv se výrobní kroky v posledních letech zlepšují a optimalizují, stále se nedaří použít konvenční způsob obrábění na různé složité tvary obrobků. Jedná se většinou formy s velkým zakřivením nebo velmi malé součástky.

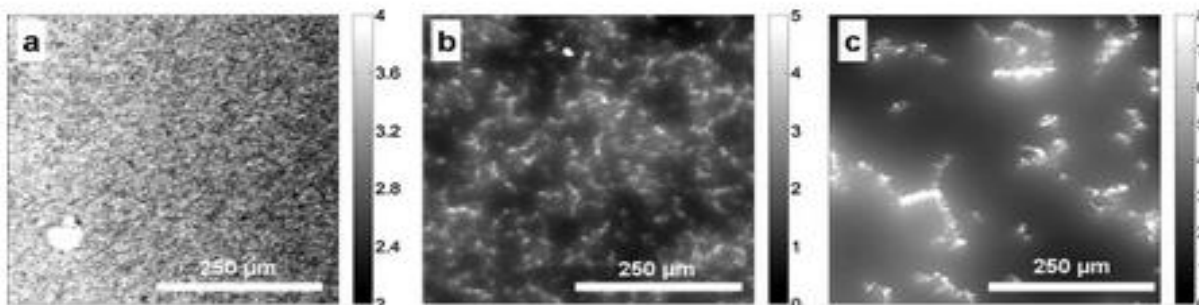
Karbid křemíku je velice tvrdý, pevný a obrábění pomocí konvenčních způsobů je velmi časově náročné. Obrábění plazmovým paprskem je bezkontaktní způsob odstraňování materiálu pomocí chemického leptání mezi atomy obráběného povrchu a paprskem plazmy.

Obrobený povrch při odtavování plazmou [37]

Pro dosažení kvality povrchu je zapotřebí nastavit výkon stroje (140 W), vzdálenost paprsku plazmy od povrchu obráběného materiálu (10 mm) a průtok plynu. K obrábění karbidu křemíku s CVD povlakem, se používá inertní plyn He + CF₄. Plazmový paprsek nevykazuje žádné mechanické síly působící na povrch. Pohybuje se vzhledem k povrchu rastrovitě nebo spirálovitě, s určitým řádkováním a rychlostí.

Počáteční drsnost obráběného povrchu karbidu křemíku s CVD povlakem je $R_q = 0,4 \mu\text{m}$. V průběhu obrábění plazmovým paprskem se ukazuje snížení na $R_q = 0,3 \mu\text{m}$ v hloubce 0,06 mm. V dalších hloubkách se drsnost mírně zvyšuje. Na obr. 10 jsou znázorněny podpovrchové struktury při obrábění plazmou v různých hloubkách.

Při obrábění se plazmovým paprskem narušuje podpovrchová vrstva. Je-li narušena tato vrstva, vytvoří se nová vrstva hladší než původní povrch. To platí pro podpovrchové plochy od 0,05 mm do 0,07 mm. Během obrábění se vytvářejí zrnité struktury, které jsou v hloubce 0,35 mm hladší než v hloubce 0,15 mm.



Obrázek 10: Struktura povrchu SiC s PVD povlakem [37]

a) počáteční stav

b) povrch v hloubce 0,15 mm

c) povrch v hloubce 0,35 mm

Plazmové obrábění poskytuje v některých případech oproti konvenčním obráběním jistou výhodu. Tato metoda je vhodná pro složité tvary s velkým zakřivením. V průběhu obrábění se mírně drsnost obráběného povrchu snižuje, ale postupem dalšího poklesu hloubky řezu se drsnost mírně zvyšuje. Tento výsledek je díky chemickým vlivům, které působí během obrábění. Průběh drsnosti velmi závisí na druhu materiálu a obráběcích parametrech.

2.2 Obrábění mechanickým způsobem

2.2.1 Obrábění ultrazvukem

Princip metody [1, 9]

Jedná se o mechanický úběr materiálu, při kterém dochází k řízenému rozrušování obráběného materiálu pomocí abrazivních zrn. Mezi obrobkem a nástrojem jsou abrazivní zrna. Nástroj kmitá kolmo na obráběný povrch ultrazvukovou frekvencí 10 až 30 kHz a o amplitudě 10 až 100 µm.



Obrázek 11: Princip ultrazvukového obrábění [2]

Druhy ultrazvukového obrábění [25]

a) Ultrazvukové nárazové obrábění (USM) [25]

Nástroj kmitá frekvencí kolem 20 kHz s přívodem brusných zrn, které jsou rozptýleny ve vodě. Nástroj svými ostrými hranami vylamuje malé kousky materiálu. Kapalina proudí a tím jsou abrazivní zrna unášena. Obrobený materiál má tvar čela nástroje. Na stěnách otvoru je obráběcí účinek minimální, takže skutečný rozměr otvoru je větší než rozměr nástroje o hodnotu střední velikosti zrn násobenou 1,6 - 1,8 krát. Nejčastěji používanými kapalinami jsou voda, petrolej, lín nebo strojní olej.

b) Rotační ultrazvukové obrábění (RUM) [25]

Tento způsob obrábění spočívá ve vrtání diamantovým vrtákem. Ten je rozechvíván vibracemi o frekvenci 20 kHz. U tohoto způsobu se nepřivádí brousící materiál mezi nástroje a obrobek, ale nástroj sám obrábí materiál. Rotační ultrazvukové zařízení obsahuje jedinečně navržené vřeteno, které je spojeno s ultrazvukovým snímačem. Změnou nastavení výstupního napájení může být amplituda ultrazvukového kmitání upravena.

Použití [24, 25]

Obráběním ultrazvukem se používá pro dělení materiálů, hloubení drážek, broušení, obrábění podporou ultrazvuku, vrtání děr kruhových i tvarových, výrobu tvářecích nástrojů. Ultrazvukem se obrábějí tvrdé a křehké materiály, především kompozitní materiály, titanové slitiny, keramika, sklo a další. Nelze jimi obrábět měkké materiály. Používá se pro hloubení průchozích děr (tloušťka obrobku maximálně do 10 mm), hloubení dutin např. skla a keramiky (maximální hloubka dutiny 4 - 6 mm) a také je využíván pro broušení rovinných ploch.

Výhody [24]

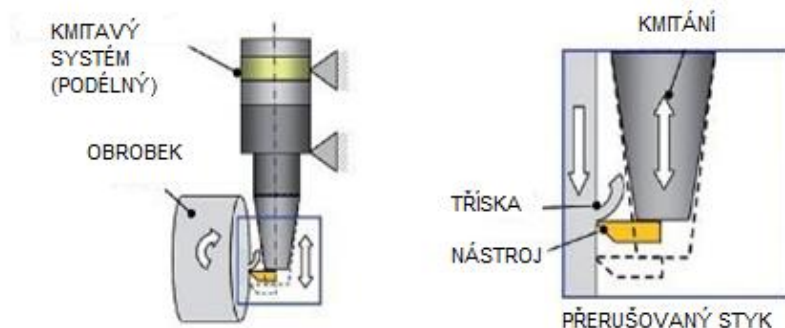
- vysoká přesnost a dobrá povrchová úprava
- skoro žádné teplo při obrábění, hlavně na obrobku
- nevodivé materiály mohou být obrobeny
- pro tvrdé materiály nad 40 HRC
- práce není nebezpečná

Nevýhody [24]

- vysoké opotřebení nástroje
- použití jen pro tvrdé materiály
- oblasti obrábění a hloubka řezu jsou nízké
- nákladný provoz

Soustružení s podporou ultrazvuku [10, 11]

Velmi vysoké opotřebení bříty nástroje vede k vysokým výrobním nákladům. Tyto náklady se mohou snížit použitím ultrazvuku při soustružení. Jedná se o konvenční soustružení doplněné o axiální kmity. Tříska je dělena vysokofrekvenčními kmity. Tím se zmenšují řezné síly a čas dotyku bříty s třískou. Nástroj se pohybuje přerušovaně a zvyšuje se trvanlivost bříty. To umožňuje obrábět ocel monokrystalickým diamantem.



Obrázek 12: Princip soustružení podporovaného ultrazvukem [10]

Podélný ultrazvukový systém má při přesném soustružení nevýhodu v obrábění některých tvarových ploch. Proto byl vyvinut bočně uložený kmitající systém, kterým se dají obrábět vnější tvarové plochy.

2.2.1.1 Ultrazvukové nárazové obrábění (USM) [1, 32]

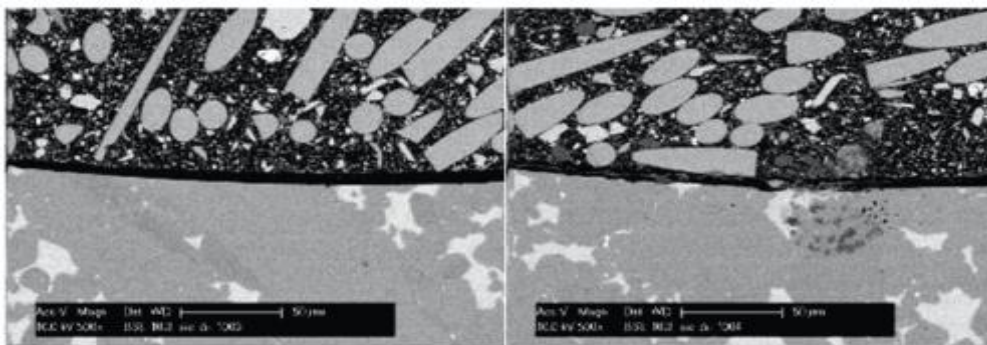
Materiály, které jsou pokročilé, vyžadují velmi náročnou technologii na obrábění. Jsou to především kompozitní materiály, titan, keramika a sklo. Aplikováním této technologie, se zvyšuje obráběcí proces tenkostěnných konstrukcí, z důvodu snížení obráběcího času a zvýšení kvality povrchu, ve srovnání s jinými metodami.

Jedná se převážně o obrábění složitých dílců s jemnou strukturou určenou pro letecký průmysl. U ultrazvukového nárazového obrábění se používá diamantový nástroj s příměsí abrazivních zrn. Stará opotřebovaná zrna se vyměňují za nová pomocí kavitačních účinků, které během procesu obrábění působí. Brusivem používaným většinou při ultrazvukovém obrábění je B_4C , Al_2O_3 , zrna kubického nitridu boru nebo diamantová zrna. Závislost podílu brusiva v kapalině na tvrdosti obrobeneho povrchu je v rozmezí 30 až 40%. Při hrubování se používá velikost zrna většinou 30 až 50 μm o zrnitosti 200 až 400. Při dokončovacích operacích se používá velikost zrna 9 až 14 μm o zrnitosti 800 až 1000.

Obrobený povrch USM [32]

Vysoká kinetická energie abrazivních zrn vytváří necelistvost obráběného povrchu. Při rostoucí velikosti zrna se zvyšuje úběr obráběného materiálu a zároveň klesá přesnost obrábění s opotřebením nástroje. Když se zvětšuje amplituda a frekvence kmitání, narůstá úběr obráběného materiálu.

Materiál je odstraňován diamantovým nástrojem s abrazivy a vytváří se mikro trhlinka v důsledku ultrazvukového narážení na povrchu obráběného materiálu. Nejvýraznějším účinkem této metody obrábění je snížení procesních sil způsobené periodickým kmitáním nástroje. To má za následek zjemnění struktury obráběného materiálu a zvýšení rychlosti posuvu s větším úběrem materiálu. Tato technologie obrábění snižuje hodnoty drsnosti povrchu a i okraje hran v závislosti na materiálu, nástroji a obráběcích parametrech. Na obr. 13 je porovnání drsnosti povrchu materiálu SiC a) obrábění s podporou ultrazvuku Ra 0,16 μm b) obrábění bez podpory ultrazvuku Ra 0,32 μm .



Obrázek 13: Příčný řez SiC (karbid křemíku) [32]

a)

b)

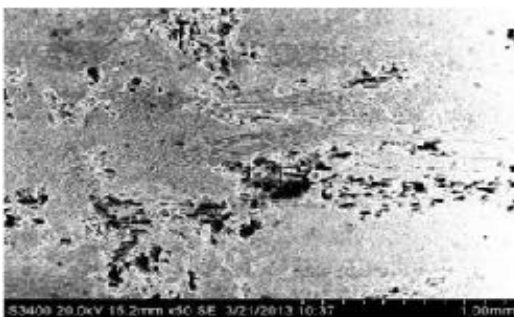
2.2.1.2 Rotační ultrazvukové obrábění (RUM) [1, 33]

Při rotačním ultrazvukovém obrábění se používá rotující diamantový jádrový vrták kmitající frekvencí kolem 20 kHz o amplitudě 0,025 až 0,050 mm. Jádrem vrtáku se přivádí chladicí kapalina, která pak odplavuje třísku a zabraňuje v přehřátí a vzpříčení nástroje. Do místa řezu není přiváděna kapalina s abrazivními zrnky. Tato metoda ultrazvukového obrábění se používá při hlubokém vrtání. To zlepšuje obráběcí podmínky, dochází k většímu úběru obráběného materiálu, tlak nástroje na jemnou strukturu obráběcího materiálu není tak velký, strojní čas se zkracuje a kmitavý pohyb mezi nástrojem a obrobkem snižuje tření.

Obrobený povrch RUM [33]

Kompozity jsou používány v leteckém a kosmickém průmyslu. Mají vynikající vlastnosti jako je nízká hustota, odolnost proti opotřebení a vysokým teplotám. Kompozitní materiál C/SiC má špatnou charakteristiku obrábění. Z tohoto důvodu se používá rotační ultrazvukové obrábění, které zlepšuje obráběcí proces.

Kvalita výstupního otvoru při vrtání je závislá na kroutícím momentu, rychlosti posuvu a mění se vrtací silou. Lepší kvalita výstupního otvoru nastane, když se sníží vrtací síla a kroutící moment. V průběhu vrtání působí smykové napětí a namáhání v tahu, které jsou vyvolané kroutícím momentem a vrtací silou. Vzhledem k těmto faktorům vznikají na začátku makro trhliny v matici SiC a šíří se ve směru kolmém k rozhraní uhlíkových vláken a pak se trhliny zastaví, když dojde na rozhraní. Poté se trhliny šíří v úzkém prostoru mezi uhlíkovými vlákny a maticí SiC. Spolu s dalším rozšiřováním trhliny se některá vlákna začínají lámat a z toho plyne, že některé zlomené konce vláken jsou od sebe odtaženy po překonání tření. Na výstupu z otvoru se vlákna vytáhnou a oddělí se od obrobku vrtací silou a vzniká makro trhliny.



Obrázek 15: Výchozí pórovitost C/SiC[33]



Obrázek 14: Kvalita výstupního otvoru C/SiC [33]

Drsnost povrchu otvoru závisí na pórovitosti matice SiC a uhlíkových vlákních. V průběhu obrábění s měnícími se obráběcími parametry je materiál vystaven pórovitosti, což vede k nepravdělné charakteristice drsnosti povrchu. Řez obrobené třísky je menší, což odpovídá křehkému lomu C/SiC. To má za následek zlepšení drsnosti povrchu vrtaných otvorů v určitém rozsahu. Drsnost povrchu vytvořená rotačním ultrazvukovým obráběním se pohybuje Ra 2,98 až 3,9 μm .

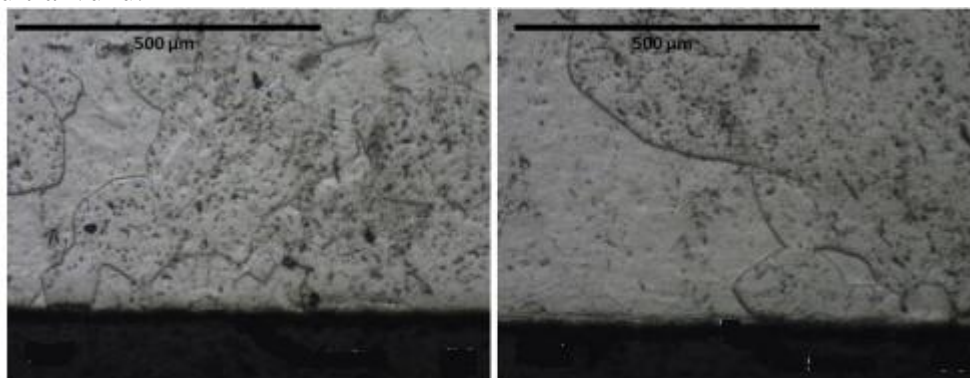
2.2.1.3 Soustružení s podporou ultrazvuku [35, 36]

Soustružení s podporou ultrazvuku kombinuje přesné obrábění s vibrací nástroje 20 kHz o malé amplitudě 10 μm , která zlepšuje výrobní proces. Vhodnou řeznou rychlostí, amplitudou a frekvencí nástroje nástroj pravidelně ztrácí kontakt s obrobenou třískou. To má za následek snížení obráběcích sil a vytvoření tenčích třísek. Tím se zlepšuje povrchová úprava, dochází k lepší tvarové přesnosti a téměř žádnému otřepu. Těmito vlastnostmi se prodlužuje životnost nástroje. Při obrábění křehkých a houževnatých materiálů se zvětšuje hloubka řezu, což umožňuje obrábět složité tvary bez použití dalších obráběcích operací broušení nebo leštění. Obrábění s podporou ultrazvuku výrazně zvýší obrobiteľnosť křehkých a tvrdých materiálů, jako jsou křehké materiály (křemík, keramika) nebo titanové slitiny.

Obrobený povrch při soustružení s podporou ultrazvuku [35]

Titanové slitiny (strukturní typ beta) mají výborné mechanické vlastnosti, vysokou tvrdost, dobrý poměr pevnosti a hmotnosti a odolnost proti korozi. Jsou používány jako tradiční nástrojové materiály. Ale špatná tepelná odolnost a velká chemická slučivost těchto slitin snižuje jejich obrobiteľnosť. Na obrábění těchto titanových slitin jsou použity nástroje ze slinutého karbidu.

Vše závisí na správném nastavení posuvu ($f = 0,1 \text{ mm/min}$), na rychlosti ($v = 65 \text{ m/min}$), hloubce řezu (0,05 – 0,5 mm), geometrii nástroje, spolu s vhodnou frekvencí a amplitudou. Drsnost se pohybuje kolem $Ra 0,89 \pm 0,25 \mu\text{m}$ za těchto vhodných podmínek. Slitiny titanu mají hrubou strukturu zrn. Obr. 16 ukazuje, že struktura zrn se nezměnila v porovnání se soustružením bez ultrazvuku.



Obrázek 16: Podpovrchová vrstva titanové slitiny (strukturní typ beta) [35]

a) soustružení bez ultrazvuku

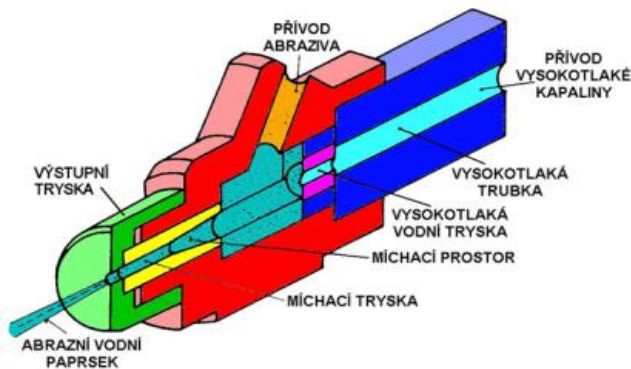
b) soustružení s ultrazvukem

Ve spojení s nízkou tepelnou vodivostí slitiny je nutné analyzovat podpovrchovou vrstvu obrobku, jestli nedochází k fázové přeměně. Tyto fázové přeměny jsou nežádoucí, protože mohou zhoršit mechanické vlastnosti. U daných hloubek řezů a rychlostí se neobjevují žádné tyto nežádoucí přeměny. Ve srovnání s konvenčním soustružením se sníží drsnost o 40% až 50%. Řezné síly působící při obrábění, hlavně tangenciální síly, se snižují až o 70%. Na obrobený povrch, s podporou ultrazvuku, nepůsobí žádné nepříznivé účinky.

2.2.2 Obrábění vodním paprskem

Princip metody [2, 7]

Jde o oddělení materiálu kinetickou energií, která se mění na mechanickou práci. Vysokotlaký a vysokorychlostní paprsek proudí rychlostí z trysky 600 až 1200 m/s o tlaku 200 až 600 MPa a o průměru paprsku 0,1016 až 0,254 mm. Zdrojem pracovního tlaku je vysokotlaké čerpadlo. Paprsek vody vzniká v řezací hlavě, jež je zakončena tryskou. Používají se dva způsoby obrábění - čistým vodním paprskem nebo obráběním abrazivním zrnem.



Obrázek 17: Princip obrábění vodním paprskem [2]

Obrábění čistým vodním paprskem [7]

Je to mechanické dělení používané především k řezání měkkých materiálů, při kterém je materiál mechanicky narušován samotnou vodou pomocí vysokého tlaku.

Charakteristika [14]

- velmi tenký proud – průměr 0,1016 až 0,254 mm
- velmi detailní geometrie
- velmi malý odpad materiálu při řezání
- řezání rychlé a bez vzniku tepla
- řezání velmi silných a tenkých materiálů
- nízké řezné síly a jednoduché upnutí

Obráběním abrazivním vodním paprskem [7]

Jedná se o mechanické dělení tvrdých materiálů. Voda urychluje abrazivní zrna. Obráběný materiál je mechanicky narušován abrazivními částicemi. Tento způsob je výkonnější než jen s čistým vodním paprskem. Obrábějí se hlavně materiály, jako jsou kompozity, keramika a různé kovy.

Charakteristika [14]

- žádné mechanické namáhání
- tenký proud (průměr 0,508 až 1,27 mm)
- velmi detailní geometrie a řezání tenkého materiálu
- malý odpad materiálu při řezání a jednoduché upnutí
- nízké řezné síly
- omezení počtu následných operací a skoro žádné otřepy

Výhody [13]

- žádné fyzikální, chemické ani mechanické jevy
- žádné metalurgické změny na řezné ploše a žádný přívod tepla
- velmi vysoká přesnost řezu
- úzká řezná spára a rozměrová stálost obráběných materiálů
- při řezu nedochází k porušení povrchové úpravy materiálu (leštění, broušení...)
- u nejkvalitnějšího řezu většinou není nutné další opracování materiálu
- je šetrná na životní prostředí

Nevýhody [13]

- vysoké investiční a provozní náklady
- hlučný a mokvý způsob řezání
- malá řezná rychlost u tvrdých materiálů
- bez okamžitého ošetření může dojít ke korozi

Dále se využívá nová metoda obrábění, která se nazývá Dynamic Waterjet XD. Systém Dynamic XD umožňuje srážení hran a pohyb pod úhlem až 60 stupňů. To umožňuje snadné řezání tvarově složitých součástí ve 3D. Řeže 2krát až 4krát rychleji a s vyšší přesností. [14]

2.2.2.1 Dělení materiálu vodním paprskem [17, 19, 20]

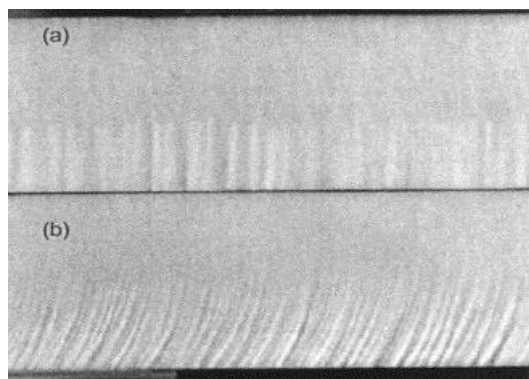
Řezání vodním paprskem většinou s abrazivními zrny lze použít pro dělení nejrůznějších materiálů, například ocelí (konstrukčních, legovaných, tepelně zpracovaných, návarových s extrémní tvrdostí). Takže je možné řezat celou řadu materiálů a tloušťek s dobrou kvalitou řezu. Průměrná drsnost při řezáním vodním paprskem je Ra 3,2 μm , to odpovídá kvalitnímu povrchu. Řezání vodním paprskem dosahuje přesnosti až $\pm 0,04$ mm, ale normálně se pohybuje v rozmezí $\pm 0,1$ až 0,2 mm. Na výslednou přesnost má především vliv rychlost řezání a tloušťka řezaného materiálu. Čím je větší tloušťka řezaného materiálu nebo rychlosti řezání, tím klesá přesnost. Hloubka řezu dosahuje až 150 mm, ovšem ve speciálních případech může dosahovat 400 mm.

Řezání vodním paprskem jen nepatrně ovlivňuje okolí řezu, proto je možné řezat materiály s provedenou povrchovou úpravou. Tloušťka řezaného materiálu se pohybuje v rozmezí od 0,1 mm po 200 mm, jen se musí přizpůsobit řezná rychlost. Šířka řezné spáry je v rozmezí od 0,1 mm do 2 mm. Řeznou hranu není nutné dále opracovávat, ale při horších kvalitativních stupních řezu u silnějších materiálů dochází k deformaci kontury řezu ve spodní hraně (vlivem výběhů paprsků).

Vrtání je možné provádět dvěma způsoby, buď vrtací díra má stejný průměr jako paprsek nebo když je průměr díry větší, vyvrtá se díra do středu a poté se vyřeže na větší průměr. Materiál je v místě styku s proudem, jenž vyvíjí určitý tlak proudu, obroušený. Kvalita a velikost díry je závislá na intenzitě proudění abrazivních zrn. Je možno vrtat různé tvary kruhového průřezu paprsku (vodní paprsek $d = 0,15 - 0,3$ mm a hydroabrazivní paprsek $d = 0,8 - 1,5$ mm). Dále je možno vrtat pod úhlem 15° pomocí polohovací řezné hlavy.

Obrobený povrch při řezání vodním paprskem [28, 29]

Při řezání vodním paprskem s abrazivními zrny se vytváří příčně rýhovaná povrchová úprava. Tento jev se vytváří i u jiných metod řezání. Povrch řezu se skládá obecně ze dvou vrstev. Z horní hladké vrstvy, která je bez rýhování a z dolní hrubé vrstvy, kde je vidět rýhování. Kvalitní povrch získáme, když tloušťka plechu je menší než hloubka horní vrstvy. Rýhování na povrchu materiálu má opačný směr, než je směr řezání. Toto zakřivení závisí na typu materiálu, jeho tloušťce a na rychlosti řezání. Rýhování se vytváří oscilací trysky, kolmé ke směru řezu. Na obr. 12 a) je řez s oscilací při pojezdové rychlosti 20 mm/min a na obr. b) řezání bez oscilace rychlostí 15 mm/min.



Obrázek 18: Řez vodním paprskem (keramika) [28]

Dalšími možnými příčinami vzniku rýhování je kinetická energie brusných zrn a dynamické vlastnosti vodního paprsku. Rýhování se nedá úplně odstranit, ale můžeme ho minimalizovat správným výběrem výrobních parametrů, jako je zvýšení tlaku vody, snížení pojezdové rychlosti nebo zlepšení smíchání brusiva s vodou. Při řezání a vrtání vodním paprskem či hydroabrazivním paprskem vzniká úkos 1 až 1,5 stupně. Tento úkos je ovlivněn posuvovou rychlostí, tloušťkou a tvrdostí materiálu. Tvar obráběných ploch je limitován kruhovým průřezem paprsku a kvalita obrobenej plochy je ovlivněna rychlostí posuvu řezací hlavy.

Stupeň kvality	Základní charakteristika	Drsnost Ra* kontura		Tvarová přesnost (mm)* kontura		Úkos
		horní	spodní	horní	spodní	
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	Většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Dle materiálu	Dle materiálu
Q2	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Dle materiálu	Dle materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

Tabulka 2: Základní kvalitativní stupně řezání vodním paprskem [19]

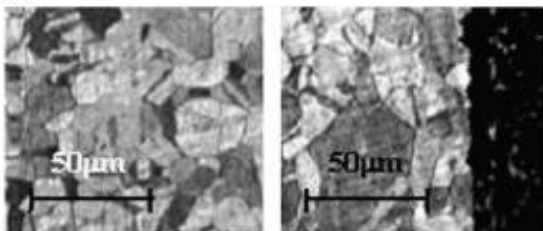
Obrobený povrch při vrtání vodním paprskem [40]

Materiál je obráběn v místě styku paprsku s obrobkem pomocí určitého tlaku. Při průniku abrazivních se narušuje společně s vodním paprskem počáteční oblast a začne vznikat dutina v závislosti na počtu srážejících se zrn s povrchem. Kvalita a velikost otvoru je závislá na přiváděných abrazivních zrnech a rozsahu tlaku vodního paprsku při procesu vrtání. Čím je hloubka vodního paprsku větší, snižuje se také energetická úroveň proudu. To má za následek snížení rychlosti abrazivních zrn a zvyšuje se doba vrtání. Poté, co je vytvořena dutina v obráběném materiálu, paprsek dosahuje určité hloubky. V této části voda s abrazivními zrny a částmi obrobenej materiálu otočí tok v souvislém směru a odplavuje je směrem ke vstupní trysce. Rychlost průniku a narušená oblast zpětného toku jsou hlavní parametry vykreslující geometrii vrtaných děr.

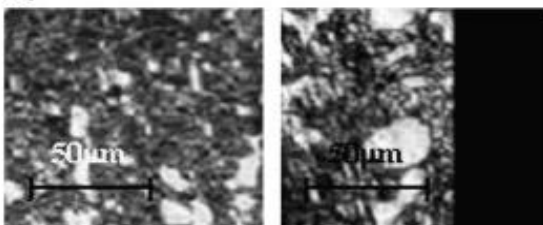
Vodní paprsek se z kanálu vrací během procesu vrtání a tento proces se opakuje, dokud není dosaženo úplného otvoru. Během tohoto procesu je průměr ve spodní části vrtaného materiálu do obvodu proudu vodního paprsku, a tedy se v této fázi zhoršuje soudržnost proudu. Aby se zabránilo během procesu vrtání k porušení tenkého křehkého povrchu materiálu, musí být nastaven tlak na počátku vrtání nižší než 70 až 100 MPa. Poté, co je dosaženo průniku vodního paprsku se zrny, tlak je postupně zvyšován. To je důležité pro dosažení optimálního vrtacího času. Další možností je zvýšení rychlosti abrazivních zrn v trysce, ale není to vhodné pro křehké materiály. U křehkého materiálu musí být abrazivní zrna pravidelná, aby se zabránilo porušení povrchu, v důsledku zpomalení proudu brusiva a nárazové tlakové vlně ze začátku

procesu vrtání. Na obr. 19 je vidět srovnání mikrostruktury před vrtáním a vrtané okraje děr a) nerezové oceli materiál (ČSN EN 10088-1), b) nástrojové oceli (ČSN 19436) v tloušťce materiálu 5 mm. Tyto dva druhy ocelí jsou velmi využívány ve strojírenském průmyslu.

a)



b)



Obrázek 19: Mikrostruktura před vrtáním a vrtané okraje děr [40]

Ukazuje se, že při vrtání plechu 5 mm vodním paprskem s abrazivními zrnky lze obrábět za velmi krátký čas. Na obr. 13. je vidět, že vodní paprsek s abrazivními zrnky nezpůsobuje žádné metalurgické změny, ani žádné jiné změny mechanických vlastností. Jak bylo dříve zmíněno, kvalita povrchu se zhoršuje s tloušťkou obráběného materiálu, důsledkem toho se sníží tlak proudu vody z trysky a také se sníží účinnost brusných zrn v trysce. Vrtání pomocí vodního paprsku s abrazivními zrnky nemá žádný vliv na výslednou tvrdost obrobku.

3 Porovnání nekonvenčních způsobů obrábění

3.1 Nekonvenční a konvenční metody obrábění

Níže uvedená tab. 3 popisuje vybrané druhy nekonvenčních a konvenčních materiálů v závislosti na vhodnosti obráběných materiálů.

Obráběný materiál	Nekonvenční metody obrábění				Konvenční obrábění	
	Obrábění mechanickým způsobem		Obrábění paprskem koncentrované energie		Frézování	Soustružení
	Obrábění ultrazvukem	Obrábění vodním paprskem	Obrábění laserem	Obrábění plazmou		
Slitina Al	C	C	B	A	A	A
Oceli	B	D	B	A	A	A
Superslitiny	C	D	B	A	B	B
Keramika	A	D	A	D	D	C
Sklo	A	D	B	D	D	C
Křemík			B	D	D	B

A - velmi vhodné, B - vhodné, C - obtížné, D - nelze aplikovat

Tabulka 3: Použití nekonvenčních metod z hlediska materiálů [1]

Z tab. 3 lze pozorovat, že keramika, sklo a oceli jsou velmi vhodné pro mechanický způsob obrábění ultrazvukem. Zatímco materiály, jako jsou superslitiny a slitiny hliníku, nejsou až tak vhodné pro tento způsob obrábění. U obrábění mechanickým způsobem metodou vodního paprsku jsou zvolené druhy obráběných materiálů velice obtížné obrobitelné nebo je nelze na tuto metodu obrábění použít.

Dále je z této tabulky zřejmé, že obrábění paprskem koncentrované energie u metody laserového obrábění můžeme s výhodou aplikovat na všechny zvolené materiály. Nejvhodnější je tato metoda pro obrábění keramiky. Poslední metodu obrábění plazmou je vhodné použít u obrábění slitin hliníku, ocelí a superslitin. Naopak u materiálů, jako jsou sklo, keramiky a křemík, nelze tuto metodu obrábění použít.

U konvenčního soustružení a frézování jsou materiály ze slitin hliníku a ocelí velmi vhodné pro konvenční způsob obrábění. Na druhou stranu sklo, keramiku a křemík není možné tímto způsobem obrábět, případně pouze obtížně.

3.2 Nekonvenční a konvenční metody obrábění

Tab. 4 obecně porovnává nekonvenční a konvenční způsoby obrábění z hlediska obráběcích parametrů (přesnost, drsnost, úběr materiálu).

Obráběcí parametry	Nekonvenční metody obrábění				Konvenční obrábění	
	Obrábění mechanickým způsobem		Obrábění paprskem koncentrované energie			
	Obrábění ultrazvukem	Obrábění vodním paprskem	Obrábění laserem	Obrábění plazmou	Frézování	Soustružení
Úběr materiálu	C	C	D	A	A	B
Přesnost obrobeného povrchu	A	B	A	D	B	A
Drsnost obrobeného povrchu	A	A	B	D	B - C	A

A - velmi vhodné, B - vhodné, C - obtížné, D - nelze aplikovat

Tabulka 4: Charakteristika nekonvenčních obrábění na obráběcích parametrech [1]

Za tab. 4 je vidět, že obrábění mechanickým způsobem (ultrazvukem a vodním paprskem) je vhodné pro dosažení velmi dobré drsnosti a přesnosti obráběných dílů, avšak úběr materiálu není tak uspokojivý. Obrábění paprskem koncentrované energie za použití laserového paprsku je velmi vhodné pro dobré dosažení drsnosti a přesnosti, ale úběr materiálu není tak velký. Na druhou stranu obrábění plazmou je vhodné pro dosažení velkého úběru materiálu, na úkor přesnosti a drsnosti.

Na základě porovnání nekonvenčních způsobů obrábění s konvenčním soustružením a frézováním lze vyvodit, že u konvenčního obrábění jsou obráběcí parametry velmi vhodné pro dosažení kvalitního povrchu.

3.3 Nekonvenční metody obrábění při dělení materiálu

Níže uvedená tab. 5 porovnává nekonvenční způsoby obrábění se zvolenými metodami při procesu dělení materiálu (řezání, vrtání) v závislosti na dosažených obráběcích parametrech.

Dosahované parametry dělení materiálu	Nekonvenční metody obrábění			
	Obrábění mechanickým způsobem		Obrábění paprskem koncentrované energie	
	Obrábění ultrazvukem	Obrábění vodním paprskem	Obrábění laserem	Obrábění plazmou
Hloubka řezu [mm]	-	do 150 speciálně do 400	do 25	do 200 u suchého do 120 u mokrého
Přesnost [mm]	-	$\pm 0,1 \div \pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$
Drsnost [μm]	$0,4 \div 6,3$	$3,2 \div 40$	$3,6 \div 110$	-
Tepelně ovliv. oblast [mm]	-	-	$0,05 \div 0,2$	$0,2 \div 1,3$
Úkos [°]	-	$1 \div 1,5$	do 1	$2 \div 4$

Tabulka 5: Porovnání dosažených parametrů při řezání [1, 5, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]

Z této tabulky rovněž plyne, že při dělení materiálu mechanickým způsobem pomocí ultrazvuku je dosaženo velmi nízké drsnosti, další obráběcí parametry nejsou u metody dělení známy. Velmi nízké hodnoty u dělení vodním paprskem vykazují hodnoty drsnosti, přesnosti řezu a úkosu.

Při obrábění paprskem koncentrované energie dosahuje dělení laserem také velmi kvalitních a nízkých hodnot. Zároveň hloubka řezu u metody dělení laserem je jedna z nejnižších. Při dělení materiálu plazmou je dosaženo největšího úkosu na obráběném materiálu. Výhodou této metody při dělení materiálu je hloubka řezu, která patří mezi největší.

3.4 Laserový předehřev při soustružení [27]

U laserového předehřevu při porovnání s klasickým soustružením materiálu ČSN 14100:

- se řezná síla sníží o 25%
- se drsnost zlepší o 18%, menší než Ra 0,3 μm
- vzniká tepelně ovlivněná a zpevněná oblast
- dochází k více kontinuálnímu tvaru třísky

3.5 Plazmový předehřev před břitem řezného nástroje [41]

U plazmového předehřevu při porovnání s klasickým soustružením materiálu Inconel 718:

- se řezná síla se sníží o 30%
- se drsnost se zlepší dvojnásobně
- dochází k oxidaci povrchu v určitých místech a to má za následek zhoršení kvality
- se zvýší se živostnost obráběcího nástroje
- pokles pevnosti ve smyku

3.6 Soustružení s podporou ultrazvuku [35, 36]

U soustružení s podporou ultrazvuku při porovnání s klasickým soustružením materiálu titanová slitina (strukturní typ beta):

- se řezná síla se sníží o 70%
- se snížení drsnosti o 40 až 50%, $R_a 0,89 \pm 0,25 \mu\text{m}$
- se struktura zrn se nezměnila
- se tvoří tenčí tříška

4 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zhodnocení a porovnání zvolených nekonvenčních metod obrábění z pohledu obrobeného povrchu. Byly zvoleny tyto metody nekonvenčního obrábění: obrábění paprskem koncentrované energie (obrábění laserem a vodním paprskem) a obrábění mechanickým způsobem (ultrazvukové a plazmové obrábění). Zhodnocení bylo provedeno na základě kvality a struktury obrobeného povrchu různých materiálů a na dosažených obráběcích parametrech (drsnost, přesnost aj.).

V úvodní části se tato bakalářská práce zabývala současným stavem nekonvenčních způsobů obrábění, charakteristikou z pohledu výrobního a ekonomického procesu i rozdělením nekonvenčních metod obrábění. Dále byla každá zvolená nekonvenční metoda obrábění rozebrána z hlediska principu, používaných zdrojů pro jednotlivé metody obrábění, aplikací jednotlivých metod a výhod a nevýhod.

Následně byly různé druhy obrábění posouzeny z pohledu kvality, struktury způsobené vlivem fyzikálních účinků, tvorby třísky a dosažených parametrů.

První metodou bylo obrábění laserem. Tato metoda byla rozdělena na dva způsoby obrábění: na dělení materiálu (řezání, vrtání) a laserový předeřev u konvenčního soustružení a frézování. Při laserovém řezání se na nerezové oceli CO₂ laserem tvořily povrchové rýhy a struska. Příčinou těchto povrchových rýh bylo kolísání výkonu laseru, kolísání průtoku plynu nebo hydrodynamika proudu roztaveného kovu. Vytvořená struska zvyšovala povrchové napětí a viskozitu roztaveného materiálu. Povrchové rýhy se zatím nepodařily odstranit. U metody vrtání laserovým paprskem byly porovnány na nerezové oceli (ČSN EN 10088-1) počty pulzů v závislosti na tloušťce materiálu a hloubce vrtané díry. Hlavním hlediskem konečné geometrie otvorů a ořepů kolem děr byl rozstřík taveniny. Rozstřík taveniny byl způsoben nárazem laserového paprsku. Dále byl posouzen laserový předeřev u konvenčního soustružení, frézování na nízkolegované konstrukční oceli (ČSN 14 100).

Metoda plazmového paprsku byla rozdělena na dělení materiálu (řezání, vrtání) a na plazmové obrábění (předeřev před břitem řezného nástroje a obrábění plazmou - odtavování). Na profilu povrchu řezu konstrukční oceli (ČSN 11523) provedeným vzduchem převládaly povrchové rýhy. Zvýšením posuvu řezné rychlosti byly tyto rýhy jemnější a více zkosené. Za použití kyslíku převládaly na profilu řezu mělké povrchové rýhy. Tyto povrchové linky byly jemnější než u řezání vzduchem. Při plazmovém řezání a vrtání bylo přenášeno teplo z plazmového paprsku do obráběného materiálu. To mělo za následek smršťení, pnutí, mechanickou deformaci a chemickou modifikaci na obráběném materiálu. Při obrábění plazmou - odtavováním materiálu SiC s CVD - se v průběhu snížila mírně drsnost obráběného povrchu, ale vlivem dalšího poklesu hloubky řezu se drsnost mírně zvýšila. Tento výsledek byl zapříčiněn chemickými vlivy, které působily během obrábění. Průběh drsnosti závisel na druhu materiálu a obráběcích parametrech. Plazmový paprsek nevykazoval žádné mechanické síly působící na povrch. Následně byl popsán předeřev plazmou před břitem řezného nástroje na zkoušeném materiálu Inconel 718.

Další metodou bylo obrábění vodním paprskem způsobené dělením materiálu (řezání, vrtání). Povrch řezu keramiky se skládal ze dvou vrstev. Z horní hladké vrstvy, která byla bez rýhování, a z dolní hrubé vrstvy, kde bylo vidět rýhování. Rýhování bylo vytvořeno oscilací trysky kolmé ke směru řezu. Při vrtání materiálu (ČSN EN 10088-1 a ČSN 19436) vodním paprskem

s abrazivními zrnky se ukázalo, že vodní paprsek s abrazivními zrnky nezpůsobil žádné metalurgické změny, ani žádné jiné změny mechanických vlastností. Kvalita povrchu se zhoršovala s tloušťkou obráběného materiálu, důsledkem toho se snížil tlak proudu vody z trysky a také se snížila účinnost brusných zrn v trysce. Vrtání pomocí vodního paprsku s abrazivními zrnky nemělo žádný vliv na výslednou tvrdost obrobeného materiálu.

Poslední metoda byla rozdělena na rotační ultrazvukové obrábění, rotační nárazové obrábění a soustružení s podporou ultrazvuku. U nárazového ultrazvukového obrábění byla vytvořena necelistvost obráběného povrchu vlivem vysoké kinetické energie. Při rostoucí velikosti zrna se zvyšoval úběr obráběného materiálu a zároveň klesala přesnost obrábění s opotřebením nástroje. Když se zvětšovala amplituda a frekvence kmitání, narůstal úběr obráběného materiálu. Nejvýraznějším účinkem této metody obrábění bylo snížení procesních sil způsobené periodickým kmitáním nástroje. To mělo za následek zjemnění struktury obráběného materiálu SiC a zvýšení rychlosti posuvu s větším úběrem materiálu. Při rotačním ultrazvukovém obrábění byla kvalita výstupního otvoru SiC závislá na kroutícím momentu, rychlosti posuvu a měnící se vrtací síle. Lepší kvalita výstupního otvoru nastala, když se snížila vrtací síla a kroutící moment. V průběhu vrtání působilo smykové napětí a namáhání v tahu, které byly vyvolané kroutícím momentem a vrtací silou. Na výstupu z otvoru se vlákna vytáhla a oddělila se od obrobku vrtací silou a vznikla trhlinka. Dále bylo popsáno soustružení s podporou ultrazvuku titanových slitin ve srovnání s konvenčním soustružením.

V posledním bodu bakalářské práce byly nekonvenční způsoby obrábění posouzeny dle vhodnosti obráběcích materiálů a parametrů, dále byly zhodnoceny obráběcí parametry při dělení materiálu. Závěrem byl porovnán laserový i plazmový přehřev a soustružení s podporou ultrazvuku s klasickým třískovým soustružením.

5 Použitá literatura

[1] Doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc. *TECHNOLOGIE I Technologie obrábění-3.část*

Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf

[2] Ing. ZDENĚK STAVINOHA

Dostupný z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=33788&instance=2>

[3] Ing. JAROSLAV ŘASA, CSc., Ing. ZUZANA KEREČANINOVÁ

Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>

[4] Prof. Ing. JAN MÁDL, CSc. *Technologie obrábění 3. Díl*

Dostupný z: http://www.strojar.com/upload/skripta/Technologie_obrabeni_3.pdf

[5] Ing. JAROSLAV ŘASA, CSc., Ing. ZUZANA KEREČANINOVÁ

Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

[6] Ing. JAROSLAV ŘASA, CSc., Ing. ZUZANA KEREČANINOVÁ

Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>

[7] Dostupný z: <http://www.plazmacz.cz/plazma-prednosti-a-nevyhody/>

[8] Ing. JIŘÍ ŠMÍD

Dostupný z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/novinky-laseroveho-predehrevu-pri-obrabeni.html>

[9] Ing. RUDOLF MORÁVEK *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň: ZČU 1994

[10] SOPHIA HANNIG, CHRISTIAN BRECHER, CHRISTIAN WENZEL

Dostupný z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/obrabeni-s-podporou-ultrazvuku.html>

[11] Dostupný z:

<http://www.ceramicindustry.com/articles/machining-ceramics-with-rotary-ultrasonic-machining>

[12] Ing. JAROSLAV ŘASA, CSc., Ing. ZUZANA KEREČANINOVÁ

Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>

[13] Dostupný z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology.aspx>

[14] prof. Ing. ALEXEY POPOV, DrSc., Doc. Ing. JAN JERSÁK, CSc

Dostupný z:

http://www.techno-mat.cz/data/katedry/kom/KOM_SMO_PR_14_CZE_Popov-Jersak_Obrabeni_vodnim_paprskem_a_laserem.pdf

[15] N RAJARAM, J SHEIKH-AHMAD *International Journal of Machine Tools and Manufactur e* Volume 43, Issue 4, March 2003

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695502002705>

[16] AHMET HASÇALIK *Optics & Laser Technology Volume 48, June 2013*

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399212005208>

[17] Dostupný z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie>

[18] Dostupný z: <http://www.chps.cz/rezani-laserem/technologie>

[19] Dostupný z: www.kvm.tul.cz/studenti/texty/uvod_do.../VZOR-sem-prace.pdf

[20] JANET FOLKES *Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 20, 19 November 2009*

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609002179>

[21] Ing. MARTIN ROUBÍČEK *Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení materiálu*

Dostupný z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>

[22] Ing. JAROSLAV BREZÁNI *Technologické hľadiská delenia materiálov plazmovým a laserovým lúčem*

Dostupný z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42012/technologicke-hladiska-delenia-materialov-plazmovym-a-laserovym-lucom.html>

[23] Dostupný z: <http://www.filak.cz/strojni-vyroba/rezani-plechu-cnc-plazmou>

[24] Ing. JAROSLAV ŘASA, CSc., Ing. ZUZANA KEREČANINOVÁ

Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

[25] JAKUB MĚRKA *Možnosti dělení materiálů plazmovým obloukem*. Brno 2012

Dostupný z:

https://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/22247/m%C4%9Brka_2012_bp.pdf?sequence=1

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. Vedoucí práce

prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.

[26] ELIJAH KANNATEY-ASIBU JR. *Principles of Laser Materials Processing, Published Online: 1 OCT 2008*

Dostupný z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470459300.ch15/summary>

[27] AFSHIN PANJEHPOUR, MOHAMMAD R. SOLEYMANI YAZDI

Optics & Laser Technology Volume 63, November 2014

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399214000802>

[28] F.L. CHEN *Journal of Materials Processing Technology, Volume 141, Issue 2, 20 October 2003*

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602011202>

[29] F. L. CHEN, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 135, Issue 1, 20 October 2003

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013601005799>

[30] DANIEL J. THOMAS, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 13, Issue 2, August 2011

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612511000077>

[31] ARSEN NARIMANYAN, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 33, Issue 1, January 2009

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X0700282X>

[32] FLORIAN FEUCHT, JENS KETELAER, ALEXANDER WOLFF, MASAHIKO MORI, MAKOTO FUJISHIMA, *Procedia CIRP*, Volume 14, 2014

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001838#>

[33] KAI DING, YUCAN FU, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 14, 2014

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013614002386>

[34] Dostupný z:

<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/%C5%98ez%C3%A1n%C3%AD%20kov%C5%AF%20laserem%20a%20plazmou.doc>

[35] AGOSTINO MAUROTTO, RIAZ MUHAMMAD, ANISH ROY, *Ultrasonics*, Volume 53, Issue 7, September 2013

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X13000693?np=y>

[36] D.E. BREHL, *Precision Engineering*, Volume 32, Issue 3, July 2008

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635907001079>

[37] THOMAS ARNOLD, *Precision Engineering*, Volume 36, Issue 4, October 2012

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635912000578>

[38] ROBERT WIEDENMANN, CHRIS-JOERG ROSEN, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 8, January 2015

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581714000376>

[39] I. ARRIZUBIETA, A. LAMIKIZ, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* Volume 75, December 2013

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695513001375>

[40] ADNAN AKKURT, *Materials & Design*, Volume 30, Issue 3, March 2009

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306908002148>

[41] CARL R. LESHOCK, JIN-NAM KIM, YUNG C. SHIN, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 41, Issue 6, May 2001

Dostupný z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695500001061>