

Vývoj zařízení a technologie obrábění materiálů plazmovým obloukem

Bc. Miroslav Zikmund

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Zikmund**
Osobní číslo: **T12887**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vývoj zařízení a technologie obrábění materiálů
plazmovým obloukem**

Zásady pro vypracování:

- 1) Provedte hodnocení metod nekonvenčního dělení materiálů
- 2) Hodnoťte materiály a strukturální změny probíhající v důsledku změn technologie
- 3) Uveďte metody hodnocení integrity povrchu pro různé technologie
- 4) Určete vliv technologických podmínek na strukturu povrchu materiálů

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- 1) MAŇKOVÁ, I.: Progresivní technologie. Viena Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4
- 2) POWEL, J.: CO2 Laser Cutting. Plenum Press. New York 1993
- 3) MILIKIČ, D.: Nekonvenční postupci obrábění. Sremska Kamenica, Novi Sad. 2002
- 4) HOLEŠOVSKÝ, F. a MÁDL, J.: Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností. UJEP Ústí nad Labem. 2008. ISBN 978-80-7414-095-2
- 5) PTÁČEK, L. aj.: Nauka o materiálu. CERM Brno, 2005. ISBN 80-7204-193-2

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: ZIKMUND MIROSLAV

Obor: ŘÍZENÍ JAKOSTI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové 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 práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou 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 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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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 30. 4. 2014

..... Miroslav Zikmund

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 vzdělávacího 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 přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Hlavním úkolem diplomové práce v teoretické části bylo vypracovat hodnocení metod nekonvenčního dělení materiálů se zaměřením vlivu strukturální změny materiálů a integrity povrchu. V praktické části bylo popsáno vývoj technologického zařízení plazmového řezacího stroje a určit vliv technologických podmínek na strukturu povrchu materiálů a na jeho tepelné ovlivnění.

Klíčová slova:

Řezání paprskem plazmy, Integrita povrchu.

ABSTRACT

The main objective of the diploma thesis in the theoretical part was to develop an evaluation of methods of unconventional materials cutting, focusing on the impact of structural changes in materials and surface integrity. In the practical part, the development process of the plasma cutting machine was described, and the influence of processing conditions on the structure of the surface of the material and the thermal influence was determined.

Keywords:

Plasma Cutting Beam, Surface Integrity.

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za cenné rady, připomínky a celkový odborný dohled. Dále pak pracovníkům laboratoře ZPS Slévárna za pomoc při obsluze metalografického světelného mikroskopu.

Prohlášení:

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

Ve Zlíně dne

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 METODY NEKONVENČNÍHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ	12
1.1 ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM.....	12
1.1.1 Princip řezání kyslíkem.....	13
1.1.2 Rychlost a kvalita řezu	13
1.1.3 Kyslík	14
1.1.4 Hořlavé plyny.....	15
1.2 LASEROVÉ DĚLENÍ MATERIÁLŮ	16
1.2.1 Řezný proces	17
1.2.2 Metody laserového řezání	18
1.2.3 Parametry laserového řezání	18
1.2.4 Parametry řezného plynu.....	19
1.2.5 Vlastnosti řezaného materiálu	19
1.2.6 Kvalita řezu	20
1.3 DĚLENÍ MATERIÁLŮ VODNÍM PAPSKEM	21
1.3.1 Obrábění vysokoenergetickým kapalinovým paprskem	21
1.3.2 Řezání čistým vodním paprskem	22
1.3.3 Řezání vodním paprskem s abrazivní směsí	23
1.3.4 Abrazivo	24
1.3.5 Přesnost a kvalita řezu.....	25
1.4 ELEKTROEROZIVNÍ DRÁTOVÉ ŘEZÁNÍ.....	25
1.4.1 Princip řezání	26
1.4.2 Dielektrikum	26
1.5 DĚLENÍ MATERIÁLŮ PAPSKEM PLAZMY	26
1.5.1 Plazma	26
1.5.2 Plazmové plyny a zařízení	27
1.5.3 Mechanismus plazmového řezání	30
2 TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU	32
2.1 TVRDOST POVRCHU	32
2.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella	33
2.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	34
2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	35
2.1.4 Zkoušky mikrotvrdosti	36
3 INTEGRITA POVRCHU	38
3.1 GEOMETRICKÁ PŘESNOST.....	38
3.2 DRSNOST POVRCHU	39
3.3 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ.....	39
3.3.1 Měření zbytkových napětí.....	40

3.4	ZMĚNY TVRDOSTI.....	41
3.5	ZMĚNY STRUKTURY	42
3.6	TEPELNÉ ZMĚNY.....	42
3.7	TRHLINY	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
4	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
4.1	HLAVNÍ CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	46
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	47
5.1	POPIS KONSTRUKCE PLAZMOVÉHO ŘEZACÍHO STROJE	47
5.1.1	Rám stroje	47
5.1.2	Prvky vodících systémů	49
5.1.3	Posuvy	52
5.1.4	Plazmový hořák.....	55
5.1.5	Řídící elektronika	56
5.1.6	Vstupní deska z PC s optickým oddělením portu LPT	56
5.1.7	Deska spínání plazmy a dalších obvodů	57
5.1.8	Drivery krokových motorů.....	58
5.1.9	Napájecí zdroj řídicí elektroniky.....	58
5.1.10	MACH3 CONTROLLER	59
5.1.11	Krytování stroje.....	60
5.2	MATERIÁL VZORKŮ.....	62
5.2.1	Chemické složení	63
5.2.2	Mechanické vlastnosti	63
5.3	PŘÍPRAVA METALOGRAFICKÝCH PREPARÁTŮ	64
5.3.1	Odběr vzorků.....	64
5.3.2	Způsob odběru vzorků.....	64
5.3.3	Preparování vzorků	65
5.3.4	Značení vzorků.....	66
5.3.5	Broušení vzorků	66
5.3.6	Leštění vzorků.....	66
5.3.7	Leptání vzorků	67
5.4	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI.....	67
5.5	FÁZE A STRUKTURNÍ SLOŽKY	69
6	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	70
6.1	HODNOCENÍ STRUKTURY VÝCHOZÍHO MATERIÁLU.....	70
6.2	HODNOCENÍ STRUKTURY MATERIÁLU PO DĚLENÍ	70
6.3	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	71
6.3.1	Grafické závislosti.....	76
	ZÁVĚR	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	84
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	87

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá hodnocením metod nekonvenčního dělení materiálů. Nekonenčního dělení materiálů se používá v průmyslu u tvarově složitých a těžkoobrobitelných materiálů. K úběru materiálu bez vzniku třísky se používá převážně tepelných, elektrických, abrazivních a jiných fyzikálních jevů. Jedná se především o špičkové moderní technologie.

Zavádění nekonvenčních technologií do strojírenského průmyslu probíhalo v druhé polovině 20. století. V současné době jsou některá průmyslová odvětví, jako je automobilový průmysl, letectví a kosmonautika na těchto technologiích už přímo závislá. Nekonenční metody díky automatizaci zvyšují hospodárnost a efektivitu výrobních procesů, minimalizují možnost chyby zapříčiněné lidským faktorem, zvyšují bezpečnost práce a poskytují mnoho dalších výhod. Snad jedinou nevýhodou zůstávají velmi vysoké pořizovací náklady na tyto technologie.

Nekonenční technologie můžeme rozdělit zejména na tyto metody dělení:

- elektrickým výbojem - dělení elektroerozivní, elektrickou jiskrou a elektrickým obloukem,
- chemické - elektrochemické a chemické,
- paprskem koncentrované energie - laserem, plazmou, elektronovým a iontovým paprskem,
- mechanickými procesy - ultrazvukem, kapalinovým paprskem a proudem brusiva.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 METODY NEKONVENČNÍHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ

Nekonvenční metody dělení materiálu v mnoha případech nahradily mechanické způsoby řezání a dělení materiálu (konvenční metody dělení materiálu). Hlavním důvodem této změny je fakt, že klasické třískové dělení materiálu v mnoha případech nelze použít z hlediska obrobitelnosti, jakosti obráběného povrchu, tvarové složitosti apod. Nekonvenční metody dělení materiálu využívají tepelných, elektrických, chemických, abrazivních a jiných fyzikálních jevů nebo jejich vzájemnou kombinaci převážně při bezsilovém působení a bez vzniku třísky.

Hlavní výhodou nekonvenčních metod obrábění je, že můžeme dělit materiály nebo složité tvary, které by konvenční metodou dělit vůbec nešly nebo jen s obtížemi. Nekonvenční metody dělení materiálu nacházejí v průmyslové výrobě velmi široké uplatnění a jejich vývoj neustále pokračuje.

1.1 Řezání kyslíkem

Řezání kyslíkem se zařadí mezi tři nejpoužívanější metody tepelného dělení materiálů (spolu a plazmovým a laserovým řezáním). Ze všech těchto tří metod má řezání kyslíkem nejdelší s nejbohatší historií a z toho plyne také nejvíce praktických aplikací. V téměř každé strojírenské výrobě se lze potkat s některou z variant řezání kyslíkem – ruční nebo strojní. Zatímco ale plazmové a laserové technologie v současnosti nalézají stále nová uplatnění a vývoj v těchto oborech postupuje rychle kupředu, v oblasti řezání kyslíkem je pro inovace zásadního charakteru stále méně prostoru, stále obtížněji se zde hledají témata doposud nevyzkoušená. Vývoj postupuje zejména v oblasti řezacích trysek, kde díky dokonalejším systémům vedení hořáku se stále více uplatňují trysky rychlořezné a vysokovýkonné dosahující nejvyšších řezných rychlostí při vynikající kvalitě řezu. [17]

Řezání kyslíkem je relativně jednoduchá metoda, jejíž podstatou je spalování řezaného materiálu (předehřátého nahřívacím plamenem na zápalnou teplotu) v proudu kyslíku. Produkty spalování – oxidy (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) jsou pak vyfukovány kyslíkem z místa řezu ve formě strusky. Kyslíkem lze efektivně řezat nelegované a v závislosti na chemickém složení také nízkolegované oceli. Výhodou je teoreticky neomezená tloušťka řezaného materiálu, i když většina běžně používaných zařízení je konstruovaná pro vysoce kvalitní řezu do tloušťky 300 mm. V oblasti menších tloušťek nepatří tato metoda k nejrychlejším,

nicméně vysoká kvalita řezu a jedinečnost při řezání velkých tloušťek ji zajišťuje stabilní místo ve strojírenství.

1.1.1 Princip řezání kyslíkem

Zdrojem energie pro proces řezání je jednak nahřívací plamen tvořený spalováním hořlavého plynu v kyslíku a jednak exotermická reakce mezi prvky obsaženými v oceli a kyslíkem. Teplo z nahřívacího plamene totiž nestačí energeticky pokrýt celý průřez řezu, vlivem odvodu tepla do obrobku. U větších tloušťek (cca nad 30 mm) tak narůstá význam tepla vznikajícího z probíhající reakce mezi kyslíkem a materiálem. Existence exotermické oxidické reakce je tedy jednou s nutných podmínek, které musí být splněny, aby materiál byl kyslíkem řezatelný. Množství tepla, které tato reakce vyvine, musí stačit na ohřev okolního materiálu na zápalnou teplotu. Zápalná teplota materiálu pak musí být nižší než jeho teplota tavení (u nelegované oceli: zápalná teplota cca 1300°C, teplota tavení cca 1500°C). Aby vznikající oxidy nebyly bariérou při dalším šíření reakce, musí být jejich teplota tavení nižší než teplota tavení řezaného materiálu. Za splnění těchto podmínek lze materiál kyslíkem řezat. [17]

Proces je zahájen nahříváním materiálu na zápalnou teplotu nahřívacím plamenem. Po dosažení zápalné teploty a přidání řezacího kyslíku je materiál spalován a vznikající oxidy jsou vyfukovány z řezné spáry řezacím kyslíkem ven. Rychlost náhřevu na zápalnou teplotu je daná chemickým složením hořlavého plynu, jeho množstvím, množstvím přidávaného nahřívacího kyslíku a způsobem odvodu tepla (tloušťka materiálu a rozměry plechu).

1.1.2 Rychlost a kvalita řezu

Rychlost řezání a kvalita řezu jsou ovlivněny souborem faktorů:

- úroveň stroje,
- kvalita a zkušenosti obslužného personálu,
- typ řezacího hořáku a trysky,
- čistota a tlak řezacího kyslíku,
- druh hořlavého plynu či správné nastavení parametrů procesu.

Podstatnou roli zaujímá také kvalita řezaného plechu a stav jeho povrchu. Za předpokladu kvalitního stroje a jeho zkušené obsluhy je význam soustředěn do kombinace tryska – kys-

lík – hořlavý plyn. Na trhu je dnes řada kvalitních řezacích trysek, které při dodržení nastavení optimálních parametrů umožňují bezvadné řezy vysokými řezacími rychlostmi. Nejvyšších řezacích rychlostí lze dosáhnout pomocí tzv. vysokovýkonných trysek, které jsou ale zároveň nejnáročnější na přesnost stroje, úroveň pracovníků a nastavení parametrů.

Řezatelnost materiálu je podmíněna těmito základními podmínkami:

- zápalná teplota řezaného kovu v proudu kyslíku musí být nižší než teplota tavení. Není-li tato podmínka splněna, nedochází k intenzivnímu hoření kovu a tím vytváření řezné mezery s hladkým povrchem, ale pouze k tavení materiálu a řez je tak velmi nekvalitní. Toto není splněno např. u šedé litiny,
- reakce při hoření kovu musí být exotermická, aby byly pokryty ztráty vzniklé odvodem tepla a reakce mohla kontinuálně pokračovat,
- ohřev materiálu musí být plynulý v celém průřezu a to nejméně na zápalnou teplotu kovu,
- teplota tavení vzniklých oxidů musí být nižší než teplota tavení řezaného kovu a struska musí mít dostatečnou tekutost, aby byla snadno odstranitelná z řezné mezery proudem řezacího kyslíku. Tuto podmínku nesplňují např. vysokolegované oceli, kde vznikající oxid chrómu má velkou viskozitu a proto nejde odstranit z řezné spáry. Proto tyto materiály nelze řezat kyslíkem a je třeba použít jiné metody jako např. dělení plazmou, laserem apod.

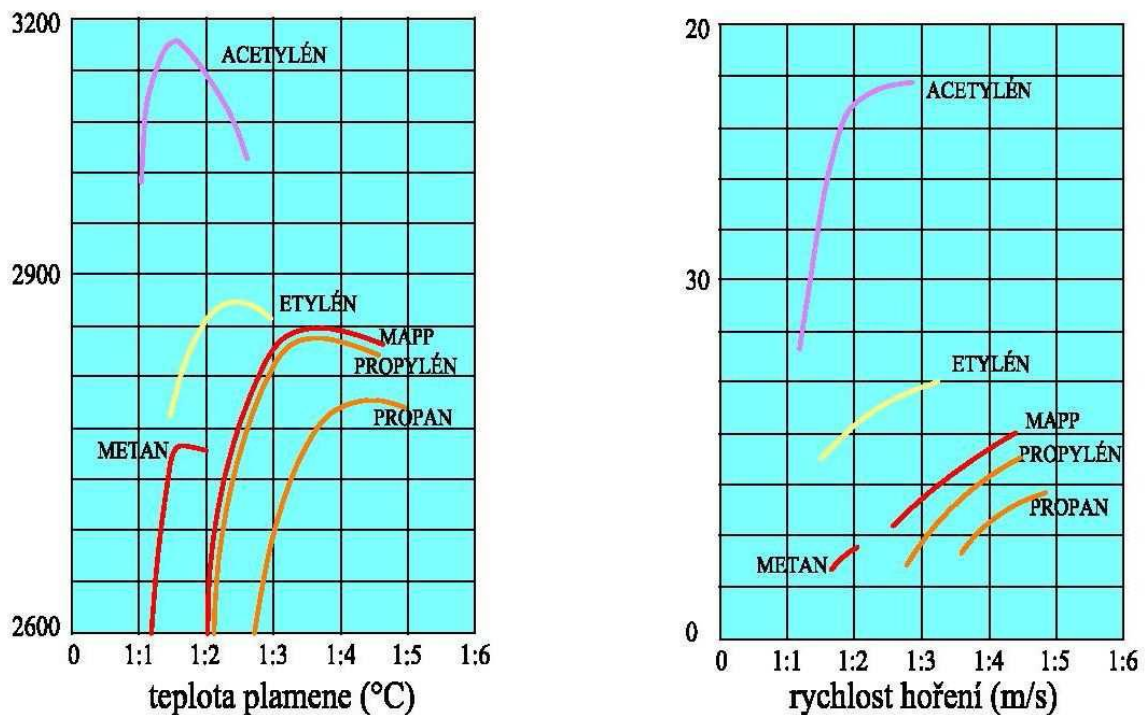
1.1.3 Kyslík

Jak již bylo uvedeno, podstatou technologie je spalování řezaného materiálu kyslíkem. Vlastnosti dodávaného kyslíku jsou tedy pro optimální výsledek rozhodující. Minimální potřebná čistota řezacího kyslíku je 2,5 (99,5 %). Významný vliv má čistota kyslíku na výstupu z tlakové láhve, svazku tlakových lahví či kryogenního zásobníku, mnohem důležitější však je zajistit zachování čistoty až do řezací trysky (čistota nesmí být snížena v průběhu transportu potrubním a hadicovým systémem k trysce). Často bývá podceňována rovněž skutečnost, že úroveň tlaku řezacího kyslíku (hodnoty – dle doporučení výrobce řezací trysky) musí být ne na výstupu ze zdroje média, ale přímo na řezací trysce. Již zmiňované vysokovýkonné trysky vyžadují při řezání některých tloušťek tlaku více než 10 bar, čemuž musí odpovídat celý systém zásobování. Optimálních hodnot čistoty, tlaku a průto-

ku kyslíku lze dosáhnout pouze pomocí dobře dimenzovaného zdroje kyslíku (láhev, svazek, zásobník) a transportního systému (potrubí, hadice, redukční a uzavírací ventily).

1.1.4 Hořlavé plyny

Hořlavý plyn je při technologii řezání kyslíkem nutný pro zahřátí materiálu na zápalnou teplotu. Volba typu hořlavého plynu je závislá převážně na požadavcích provozovatele technologie. Je možné sledovat několik kritérií: maximální výkon řezání (rychlost náhřevu na zápalnou teplotu, řezná rychlost, schopnost propálení apod.), kvalitu řezné plochy pro všechny běžně řezané tloušťky materiálů. Ve většině případů je optimálním výsledkem vysoká kvalita řezu při dosažení co největší rychlosti řezání, v případě kratších řezů a častých propalů, pak také vysoká rychlost zahřátí materiálu na zápalnou teplotu a možnost propálení co největší tloušťky materiálu bez nutnosti předvrtání. Nejpoužívanějším a z uvedených hledisek nejvýhodnějším hořlavým plynem je acetylén. Oprávněnost jeho použití dokazují následující grafy (Obr. 1), které zobrazují porovnání nejvýznamnějších výkonových charakteristik různých hořlavých plynů. [17]



Obr. 1. Porovnání charakteristik hořlavých plynů [17]

Jako zdroj acetylénu připadají v úvahu pouze jednotlivé tlakové lahve nebo svazky tlakových lahví. Velikost zdroje je potřeba dimenzovat vzhledem k maximálně možné okamžité spotřebě. Pro jednotlivé tlakové lahve o vnitřním objemu 40 l nebo 50 l a při teplotě v lahvi

15°C platí, že krátkodobě (max. 10 min.) lze odebírat množství o průtoku 1 m³/ hod, střednědobě (cca. 1 směna) 0,5 m³/hod. a trvale pouze 0,35 m³/hod.

Výhody řezání kyslíkem:

- nízká cena dělení,
- možnost dělení tlustých plechů,
- možnost přípravy hran pro svařování.

Nevýhody řezání kyslíkem:

- omezení jen na nízkouhlíkové oceli,
- poměrně hrubý řez,
- dodatečné obrábění výpalků.

1.2 Laserové dělení materiálů

Laser můžeme považovat za univerzální nástroj pro technologii řezání, který je vhodný pro sériovou i malosériovou výrobu. Z technologického hlediska existují dvě metody řezání a dělení materiálů laserem:

- a) řezání/ dělení materiálů (nejčastěji pro plechy a jiné tenké materiály).
- b) tvoření drážky na povrchu materiálu a potom jeho kontrolovaný lom (vhodné pro křehké materiály jako sklo a keramika).

Na řezání se nejvíce používají CO₂ lasery, většinou v kontinuálním režimu. Řezání/ dělení laserem je odstraňování materiálu postupným působením paprsku a proudu plynu, obvyčejně kyslíku (O₂), dusíku (N₂), stlačeného vzduchu, argonu (Ar) anebo helia (He).

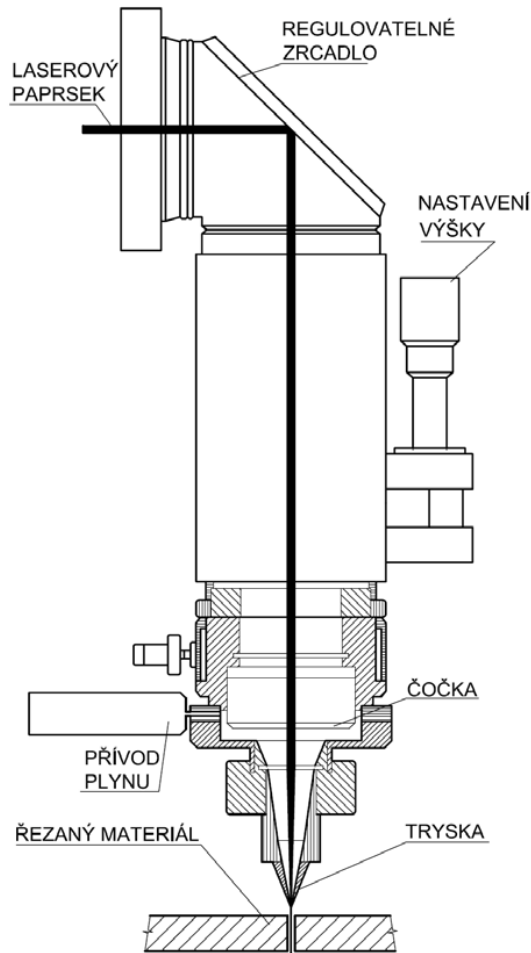
Hlavní mechanismus úběru při řezání laserem se skládá z:

- erozivního účinku vysokoenergetických částic fotonů na povrch materiálu,
- lokálního natavení povrchu,
- odstranění taveniny odpařením anebo pomocí přídavného stlačeného

plynu, který tlakem odstraňuje (vyfukuje) natavené částice materiálu ze zóny

řezání. [10]

Pro řezání je laser vybavený tzv. řezací hlavicí (Obr. 2), která chrání optiku před poškozením a zároveň přivádí pomocný anebo ochranný plyn do zóny řezání. Volba přídavného plynu závisí na materiálu obrobku. Pro kovy a uhlíkové oceli se používá kyslík, vzduch a inertní plyny se používají taktéž pro nekovy a plasty (plexisklo, polypropylen). Mimo inertních plynů a kyslíku se používá také dusík, a to pro řezání nekovových materiálů (PVC, textil apod.) Dusík chrání řezné plochy před spálením a vznícením.



Obr. 2. Řezací hlavičce [5]

1.2.1 Řezný proces

Řezný proces probíhá na základě vzájemného působení laserového paprsku, řezného plynu a řezaného materiálu. Oblast, ve které k těmto účinkům dochází, je ohraničena řeznou spárou ve směru řezu a nazývá se čelem řezu. Paprsek, který na toto čelo působí, musí natavit materiál na teplotu, která vede ke změně pevné fáze materiálu na kapalnou a plynnou.

Pásmo, které absorbovaný laserový paprsek ohřívá až na teplotu tání, se v důsledku exothermické reakce s proudícím kyslíkem ještě dále otepluje až k teplotě vznícení. Následuje

silné odpařování materiálu, které vede k jeho odvodu. Současné mechanické působení proudu řezného plynu unáší částice tekutého materiálu mimo prostor řezu. Roztavené pásmo se pohybuje ve směru řezu a proces natavování se neustále opakuje. Laserový paprsek v případě kontinuálního řezání tedy stabilně postupuje a představuje vlastní "řezný" nástroj.

Analýzou popsaného procesu lze teoreticky vypočítat řeznou rychlost, šířku řezu, tepelné ovlivnění okraje řezaného materiálu a vznik charakteristických rýh, které způsobují vlastní drsnost řezné plochy. Při analytickém řešení je třeba brát v úvahu i soubor parametrů podle následujícího schématu. [7]

1.2.2 Metody laserového řezání

Mezi metody laserového řezání patří:

- laserové sublimační řezání – laserový paprsek ohřívá povrch materiálu na teplotu odpařování a přiváděný inertní plyn odstraňuje vznikající páry na čele řezu. Vzniká úzký řez s vysokou kvalitou řezné plochy. Doporučuje se jen pro velmi malé tloušťky materiálu,
- laserové tavné řezání – silný proud inertního plynu odstraňuje roztavený materiál ze zóny řezu. Povrch materiálu se ohřívá jen na teplotu tavení, takže je potřebná menší energie na jednotkovou délku řezu. Nevýhodou je zhoršená jakost řezu, způsobená tuhneoucími kapkami taveniny na spodním okraji řezu,
- laserové řezání s aktivním plynem – používá se většinou kyslík, který vyvolává exotermickou reakci při spalování základního materiálu, tím se dosahuje rychlejší ohřev, vyšší rychlost řezání s kvalitním povrchem řezu. [10]

1.2.3 Parametry laserového řezání

Laserový paprsek je definován svojí vlnovou délkou, výkonem, rozdělením hustoty energie v příčném průřezu, polarizací, divergencí a průměrem. Pro dosažení potřebné hustoty energie pro řezání je laserový paprsek fokusován optikou, která je definována ohniskovou vzdáleností, transparentí, absorpcí a reflexivitou, fokusační kaustickou plochou a hloubkou ostrosti. Řezný proces dále ovlivňuje poloha ohniska fokusační optiky ve vztahu k povrchové ploše materiálu.

Celá řada parametrů je definována principiálně a nelze je u daného laseru měnit. Pro vlastní proces jsou důležité následující parametry:

- výkon laserového paprsku,
- transparence fokusační optiky,
- ohnisková vzdálenost optiky,
- poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku.

1.2.4 Parametry řezného plynu

Mezi nejdůležitější parametry řezného plynu pro proces řezání patří:

- druh plynu,
- pracovní tlak,
- geometrie tvaru trysky
- a průměr trysky.

Tlak plynu a geometrie tvaru trysky ovlivňují kvalitu řezu, drsnost povrchu řezné plochy a tvorbu otřepů. Tlak plynu se pohybuje při řezání nízkotlakém do 100 kPa, při řezání středotlakém do 500 kPa a při řezání vysokotlakém do 2 MPa. Konvenční trysky mají kruhový, kuželovitě se rozšiřující otvor. Odstup trysky od materiálu musí být co možno nejmenší, aby plyn optimálně působil v řezné drážce. Obvykle se pohybuje mezi 0,5-2,5 mm. Na odstranění taveniny z drážky se podílí pouze ta část plynu, která do ní vstupuje. Proto se jeví výhodný průměr trysky přibližně rovný šířce řezné drážky řezu. Takto malý průměr se však brzy znečistí a znemožňuje další řezání. Proto v praxi leží průměr trysek mezi 1-2,5 mm. Spotřeba řezného plynu je závislá na průměru trysky a tlaku plynu.

1.2.5 Vlastnosti řezaného materiálu

V praxi jsou pro proces řezání rozhodující tyto tepelně-fyzikální vlastnosti materiálu:

- hustota materiálu,
- tepelná kapacita,
- reflexivita řezaného materiálu,
- skupenské teplo tání,

- tepelná vodivost,
- skupenské teplo výparné,
- teplota tání,
- teplota vypařování,
- elektrický odpor materiálu,
- chemická energie vzniklá při reakci.

Výhody laserového řezání:

- přesnost a kvalita řezu
- pravoúhlá řezná hrana
- velmi malá šířka řezné spáry
- vysoká řezná rychlost
- žádná deformace obráběného předmětu.

Nevýhody laserového řezání:

- vysoké provozní náklady,
- omezení tloušťky materiálu,
- omezení stability paprsku,
- menší účinnost.

1.2.6 Kvalita řezu

Při sledování samotné kvality řezu je potřebné brát do úvahy parametry zóny řezání laserem, které zároveň mohou sloužit jako kritéria pro hodnocení řezaného povrchu laserem:

- šířka řezu
- nepravidelnost hrany,
- zaoblení hrany,
- šířka tepelně ovlivněné vrstvy,
- kuželovitost řezaného otvoru,

- tvoření trhlin,
- šířka kráteru,
- vychýlení paprsku,
- změna struktury materiálu,
- zpevnění,
- zbytkové napětí.

Toto je výčet všech vlivů, které ovlivňují kvalitu povrchu. Většina literárních pramenů, které se zabývají kvalitou řezného povrchu, se soustředí při hodnocení na jeden nebo dva určující provozní parametry jako jsou výkon paprsku a rychlost posuvu a také na jeden anebo dva parametry kvality řezu a šířku řezné spáry. Vychází z toho, že při hodnocení kvality řezu a optimalizaci laserového řezání je spektrum všech uvedených kritérií velmi široké.

1.3 Dělení materiálů vodním paprskem

V padesátých letech dvacátého století experimentoval inženýr lesního hospodářství Dr. Norman Franz s formami řezání vodním paprskem. Byl první osobou, která studovala použití velmi vysokého tlaku vody jako řezného nástroje. Začátkem šedesátých let minulého století dokázal získat krátkodobé výbuchy vysokého tlaku, které byly mnohonásobně vyšší než aktuální hodnoty tlaků. Pozdější studium věnoval kontinuálnímu proudu vody. První komerční aplikace přišla na svět v roce 1971. Technologie vodního paprsku postoupila v sedmdesátých letech, kdy Dr. Mohamed Hashish vytvořil techniku přidání abraziva k vodnímu paprsku, tím se umožnilo řezání i materiálů s vyšší pevností a s větší šířkou materiálu.

1.3.1 Obrábění vysokoenergetickým kapalinovým paprskem

Fyzikální podstata řezání materiálů paprskem kapaliny vychází z úvahy, že paprsek kapaliny pohybující se dvojnásobnou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku lze považovat z hlediska jeho účinků za pevné těleso. Proces řezání probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění v otvor, v druhé etapě dochází k prohlubování a k vytváření řezné spáry. Při nárazu paprsku kapaliny na obrobek dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, čímž vznikají v řezaném materiálu rázové vlny, a k rychlé destrukci materiálu obrobku na hranici zrn, ke vzniku mikrotrhlin. Mikro-

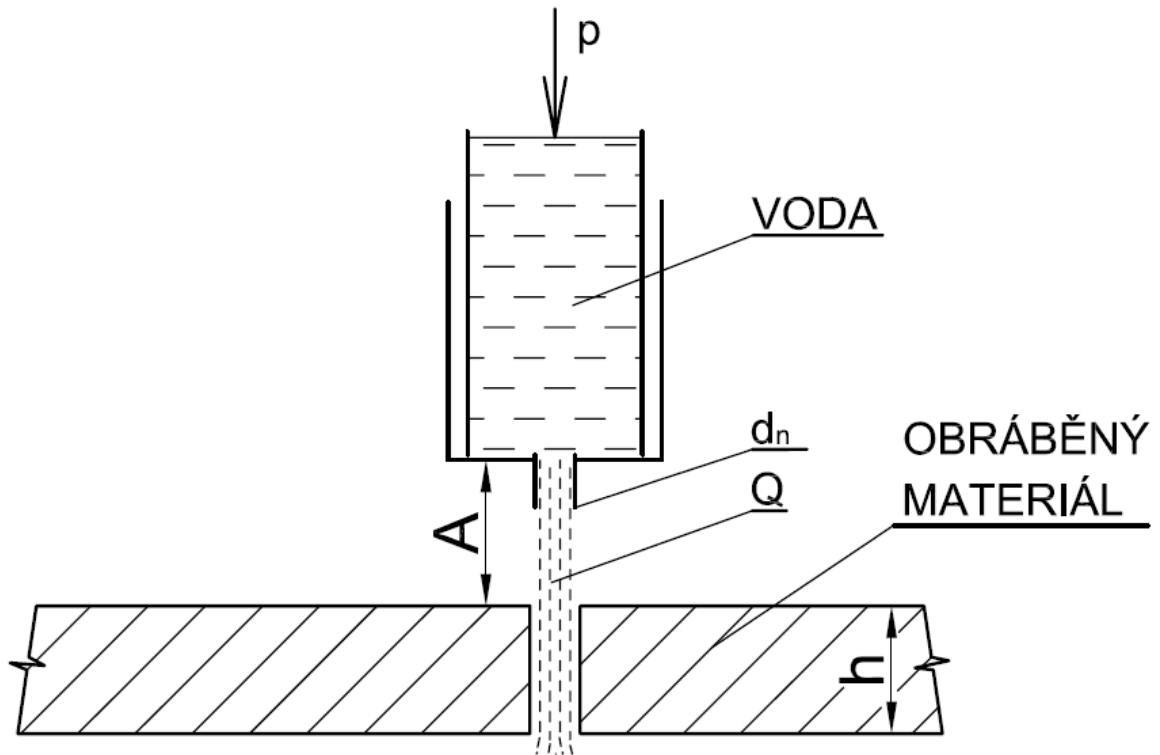
trhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří, a tím dochází k rozrušování obráběného materiálu. K destrukci řezaného materiálu dochází také turbulentním prouděním kapaliny ve spáře s účinkem kavitačních bublin. Pro řezání kovových materiálů, keramiky aj. se do paprsku kapaliny přidávají broušící zrna. K popsáným účinkům paprsku kapaliny přistupuje ještě abrazivní účinek broušících zrn. Jako kapalina se používá většinou upravená voda, k vytvoření potřebné rychlosti proudění se uplatňuje tlak 200 až 600 MPa. [9]

Technologie obrábění materiálu pomocí vysokoenergetického kapalinového paprsku, často označovaná též jako hydroabrazivní obrábění, je speciální způsob obrábění, využívající abrazivního účinku vysokotlakého vodního paprsku pro odstraňování (dělení) materiálů. Vzhledem ke svým mimořádným vlastnostem nalezla tato technologie velmi rychlé uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu a v důsledku značné univerzálnosti i v celé řadě dalších průmyslových oborů. Uvedená metoda se využívá dnes nejčastěji ve dvou základních provedeních:

- řezání čistým vodním paprskem,
- řezání vodním paprskem s abrazivní směsí.

1.3.2 Řezání čistým vodním paprskem

Zařízení pro obrábění vodním paprskem (Obr. 3), se dnes používá zejména pro řezání nekovových materiálů, jako jsou lamináty, kevlar, azbestocement, grafitové kompozity, sklo-textil a gumotextil. Rychlost řezání se pohybuje v rozsahu 5 m.min⁻¹ (kevlar, lamináty) až 400 m.min⁻¹ (papír, lepenky apod.). Tlak kapaliny je možno plynule regulovat podle technologických potřeb a druhu obráběného materiálu. Vodní trysky jsou vyráběny ze safíru, rubínu nebo diamantu. Velikostní řada trysek zajišťuje různou kinetickou energii paprsku a určuje také počet pracovišť, které je možno současně napájet z jednoho zdroje. Životnost trysek při nadzvukové rychlosti výtoku kapaliny (asi 1000 m.s⁻¹) je přímo úměrná množství minerálů obsažených ve vodě a je v rozmezí 50 ÷ 500 hodin. [12]



Obr. 3. Schéma principu řezání čistým vodním paprskem [12]

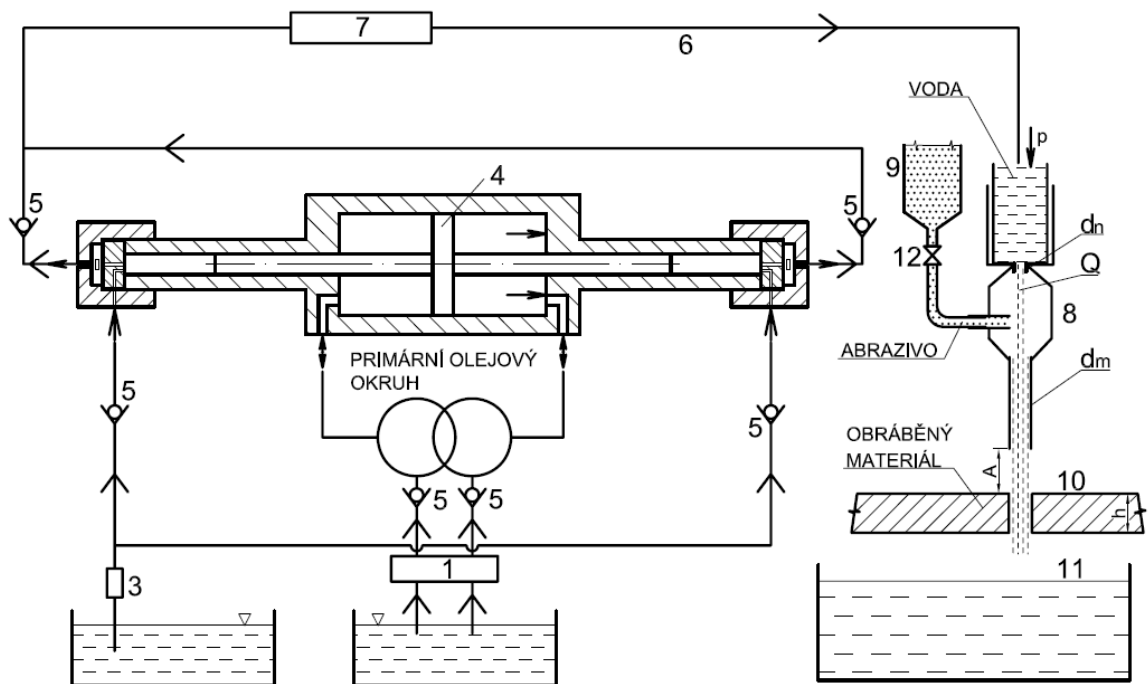
1.3.3 Řezání vodním paprskem s abrazivní směsí

Obrábění vodním paprskem s abrazivem se liší od předchozí technologie především v řezném mediu. Zatímco u čisté vody narušuje materiál sama voda, v případě abrazivního vodního paprsku voda slouží pouze k urychlení abrazivních částic. Vodní paprsek s abrazivem je stokrát až tisíckrát výkonnější než paprsek čisté vody. Proto se využívá pro tvrdé materiály, jako jsou kovy, kompozity a keramika. Průměr paprsku je 0,3 až 1,35 mm.

Schéma principu řezání vodním paprskem s příměsí abraziva je zobrazen na (Obr. 4). Základem primárního okruhu je vysokotlaké olejové čerpadlo (pozice č. 1) dodávající pracovní tlak max. do 20 MPa. Olej je tlačěn přes uzavírací ventil (pozice č. 2), který umožňuje mžikové přerušování průtoku střídavě před i za píst hydraulického zesilovače tlaku – multiplikátor (pozice č. 4). Tímto tlakem působíme na plochu velkého pístu, který je spojen se dvěma pístnicemi o daleko menším průměru, z nichž každá může vytvořit v tlakové komoře tlak až dvacetkrát větší (až 400 MPa). Velikost zesílení tlaku závisí na poměru velikosti průměru velkého pístu k průměru obou stejných pístnic. Do obou tlakových komor je přiváděna voda přes filtrační jednotku (pozice č. 3). Zde se odlučují pouze pevné částice o rozměrech nad 10 μm . Sekundární okruh je tvořen zpětnými ventily (pozice č. 5), dále vysokotlakým akumulátorem (pozice č. 7) ve formě pancéřované vysokotlaké komory, jehož

úkolem je tlumit rázy vysokotlaké technologické vody, které vznikají z jedné a druhé tlakové komory. Z něhož je přetlaková voda požadovaného konstantního tlaku vedena pancéřovým potrubím (pozice č. 6) do směšovací komory zakončené safírovou tryskou průměru 0,25 až 2 mm (pozice č. 10), ze které vytéká vodní paprsek nadzvukovou rychlostí 700 až 1200 m.s-1. Pod pevnou tryskou se pohybuje stůl s řezným materiálem (pozice č. 10), pod kterým je vodní nádrž (pozice č. 11).

Oproti metodě řezání čistým vodním paprskem je zdokonalena zabudovaným zásobníkem brusiva (SiC, diamantový prach, elektrokorund – spotřeba asi 1kg.min-1 (pozice č. 9), které je podáváno přes ventil s klapkou a s mžikovým přepouštěním (pozice č. 12) do speciálně tvarované otěruvzdorné směšovací komory (pozice č. 8). Zde dochází ke smíšení vody s brusivem. Hybnost vodního paprsku se přenáší na brusivo, čímž se pracovní výkon řezání umocňuje. [6]



Obr. 4. Schéma principu řezání vodním paprskem s příměsí abraziva [6]

1.3.4 Abrazivo

Abrazivo je směs tvrdých částic materiálu. Z toho nejčastěji používané jsou křemičitý písek, karbid křemíku, granát a skleněné kuličky. Volba abraziva zaleží na obráběném materiálu, parametrech stroje, kvalitě obrobeného povrchu a ceně brusiva. Čím menší je zrna abraziva, tím je hladší výsledný povrch, ale zvyšuje se spotřeba abraziva. Při použití většího množství se zvyšuje rychlost obrábění, ale s tím i cena. S vyšší tvrdostí abraziva také

roste opotřebení trysky. Křemičitý písek na rozdíl od granátu rychlost řezu zpomaluje, ale pro některé obráběné materiály je dostačující lacinější křemičitý písek než drahý granát. Proto se musí správně zvolit materiál, velikost i množství brusiva. [16]

Výhody řezání vodním paprskem:

- vysoká rychlost řezání,
- schopnost řezat rovinné ale i tvarově složité plochy v úzkých tolerancích,
- minimální tepelné ovlivnění povrchu,
- malé deformační napětí v opracovaném povrchu,
- možnost řezat v různých směrech bez ztráty účinnosti paprsku,

možnost řídit dráhu paprskem číslicovým řízením. [10]

Nevýhody řezání vodním paprskem:

- nevyhnutelný kontakt s vodou a většinou i s abrazivním materiálem (bez okamžitého vhodného ošetření rychlý nástup povrchové koroze, u nasákavých materiálů delší vysoušení, možnost změny barvy, znečištění apod.)
- omezená možnost výroby hodně malých dílců (cca pod 3-5 cm)
- při horších kvalitativních stupních řezu u silnějších materiálů dochází k deformaci kontury řezu ve spodní hraně vlivem tzv. výběhů paprsku.

1.3.5 Přesnost a kvalita řezu

Současná zařízení řezou s přesností až $\pm 0,04$ mm. Standardně se však pohybují v rozmezí $\pm 0,1$ až $0,2$ mm. Na konečnou přesnost má vliv především rychlost řezání a tloušťka řezaného materiálu (s růstem tloušťky materiálu anebo rychlosti řezání klesá přesnost). Řezání vodním paprskem prakticky neovlivňuje okolí řezu, tudíž je možné řezat materiály již s provedenou povrchovou úpravou jako například barvené, leštěné nebo s napařenou vrstvou.

1.4 Elektroerozivní drátové řezání

Elektroerozivní drátové řezání (EDR) patří do skupiny využívající elektrotepelné principy a je jednou z nejrozšířenějších nekonvenčních metod dělení materiálu. Drátové řezání využívá principu elektrické eroze, ta probíhá mezi dvěma elektrodami. Jedna z elektrod je ten-

ký drát a druhá obrobek. Vlivem působení elektrického napětového pole mezi elektrodami se uvádějí do pohybu kladné a záporné ionty. Tím se vytváří ionizovaný (vodivý) kanál. Nyní začíná mezi elektrodami protékat elektrický proud a vzniká výboj. Vzniklé plasmové pásmo s teplotou až 12 000 °C způsobuje tavení a odpařování materiálu na elektrodách. Odpařováním dielektrika vzniká plynná bublina s velkým tlakem. V okamžiku přerušeni proudu vyvolá pokles teploty implozi bubliny, do uzavřeného prostoru proniká dielektrikum a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. [12]

1.4.1 Princip řezání

Elektroeroze probíhá mezi nástrojovou elektrodou, kterou zde tvoří tenký drát. Ten je pomocí speciálního zařízení převíjený, aby se vyloučilo riziko opotřebení drátu. Obráběná součástka je jako druhá elektroda připevněna ke generátoru. Způsob zapojení je dán polaritou a typem výbojů, v dnešní době se převážně používají tranzistorové generátory, pro které je charakteristická přímá polarita (nástroj katoda -, obrobek anoda +). Elektrickými výboji, vznikajícími mezi drátovou elektrodou a obrobkem, se vytváří pracovní mezera, a tím i příslušný řez. [12]

1.4.2 Dielektrikum

Dielektrikum se dá označit jako elektricky nevodivá látka, tedy izolující, ve které vnější elektrické pole mezi nástrojovou elektrodou a obráběným materiálem, vytváří pole opačné polarity. Statické elektrické pole dielektrika zůstane zachováno i bez neustálého přívodu elektrického náboje.

1.5 Dělení materiálů paprskem plazmy

Technologie řezání materiálu paprskem plazmy je již používána od poloviny padesátých let. V posledních letech došlo k podstatnému zdokonalení a následnému rychlému rozvoji uplatnění této metody, která v řadě případů předčí jiné tepelné dělicí technologie. [12]

1.5.1 Plazma

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

Plazma je výjimečný stav plynů. Díky ionizaci atomů se stává vodivým. Je to směs elektronů a kladných iontů, která je většinou rozložena uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může však být částečně nebo úplně ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy se pohybuje kolem 5000÷15000 °C. Teplota zcela ionizované plazmy je asi 100 000 °C. Plazma může vzniknout ohřevem látky na vysokou teplotu nebo elektricky obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, případně mechanicky kompenzovaným iontovým svazkem. Jako zdroj tepla se pro ionizaci plynů nejčastěji používá elektrický oblouk. Samotný oblouk je plazmou s nízkým stupněm ionizace.

Plazma vznikne tak, že mezi wolframovou elektrodou a řezací tryskou se nejprve zapálí pilotní elektrický oblouk. Přiváděný plyn se při průchodu elektrickým obloukem přemění na plazmu - vznikne rozkladem molekul řezných plynů. Pohyb tohoto plynu je urychlován elektrickým polem, vytvořeným mezi wolframovou elektrodou a obráběným materiálem. Jakmile dopadne paprsek plazmatu na materiál, dojde k okamžitému tavení a odpařování materiálu.

Důležité je, aby byl plazmový oblouk stabilizovaný. To znamená usměrnění paprsku do požadovaného tvaru. Tuto funkci je možné zabezpečit několika způsoby:

- Tvarem dýzy plazmového hořáku,
- proudícím plynem,
- vodou.

Abychom vytvořili technicky kvalitní plazmu, je nezbytné sledovat její technologické parametry. Mezi ně patří zejména teplota plazmy a její elektrická vodivost, průměr paprsku plazmy, hustota proudu plazmy či stupeň fokusace paprsku po výstupu z trysky. [10]

1.5.2 Plazmové plyny a zařízení

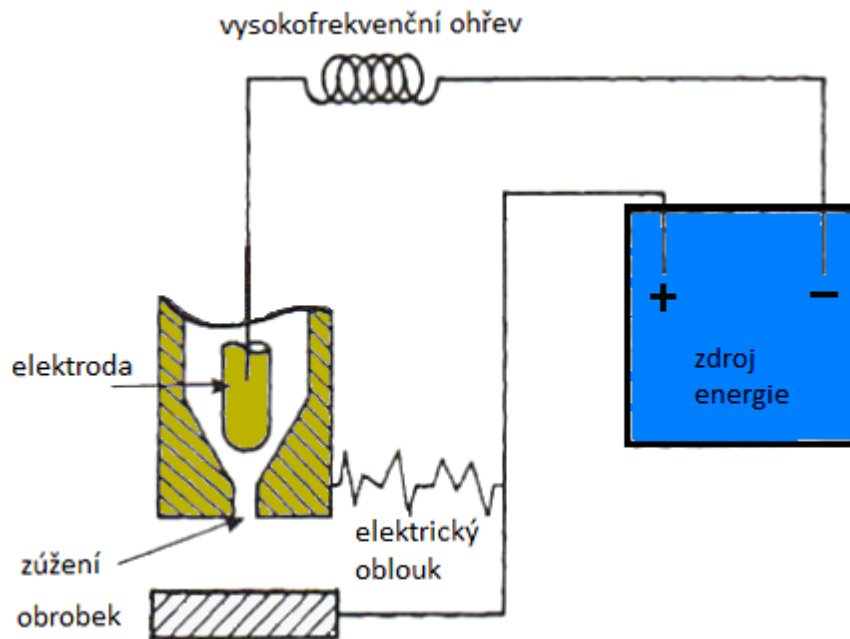
Při používání technologie plazmového obrábění se využívá řada plynů, které mají zásadní vliv na obráběcí proces. Podle funkce můžeme plyny rozdělit na:

- plazmové plyny – argon (Ar), argon a vodík (Ar +H₂), helium (He), dusík (N₂), oxid uhličitý (CO₂), vzduch – tyto plyny jsou přiváděny přímo do elektrického oblouku a následně vytvářejí plazmu,

- fokusační plyny – tyto plyny slouží k zúžení plazmového paprsku. Nejčastěji se používá argon (Ar), argon a vodík (Ar + H₂), argon a dusík (Ar + N₂), dusík (N₂),
- ochranné plyny – složí k ochraně plazmového paprsku a místa řezu před účinky atmosféry. Nejčastěji se používá argon (Ar). [10]

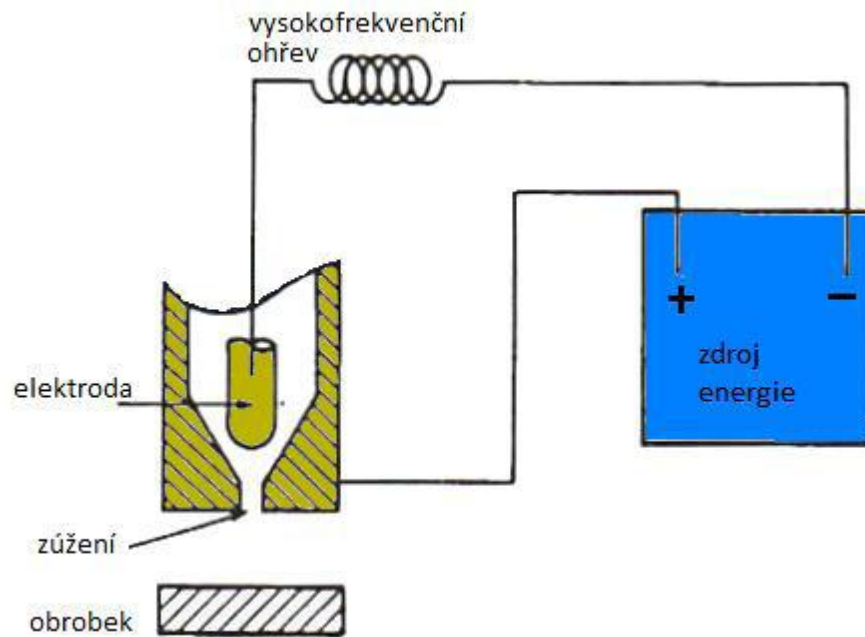
Plazmové zařízení se skládá ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky. V dnešní době se běžně využívá NC nebo CNC řízení. Plazmové zařízení se dělí na dva typy:

- Zařízení využívající přenesený (transferovaný) oblouk (Obr. 5) – oblouk se tvoří mezi wolframovou elektrodou uvnitř plazmového hořáku a obráběným materiálem. Používá se pro vodivé materiály.



Obr. 5. Transferovaný oblouk [10]

- zařízení využívající nepřenesený (netransferovaný) oblouk (Obr. 6) – oblouk se tvoří mezi dvěma elektrodami uvnitř plazmového hořáku. Používá se na nevodivé materiály.



Obr. 6. Netransferovaný oblouk [10]

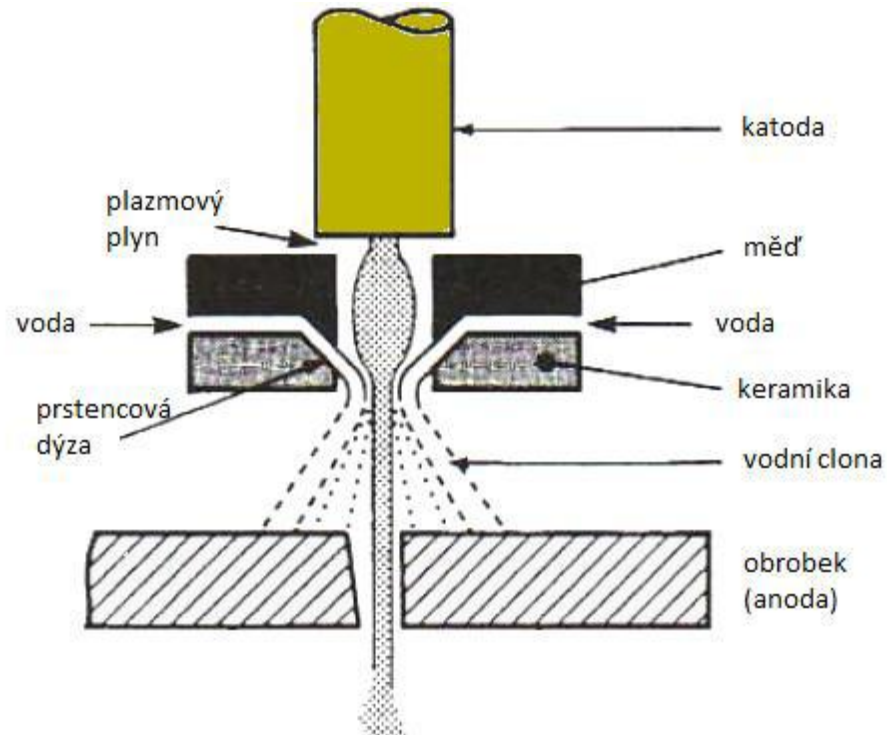
Plazmový hořák zabezpečuje:

- přívod proudu na elektrodu,
- přívod všech pracovních plynů,
- tvarování plazmového paprsku a usměrňuje paprsek do místa obrábění.

Plazmové hořáky se dají členit podle výkonu, způsobu chlazení, složení plazmového plynu, druhu materiálu katody, pracovního systému hořáků či použití (ruční, strojní). Chlazení hořáků je velmi důležitá funkce v oblasti technologie plazmového obrábění. Chlazení bývá zabezpečeno právě konstrukcí hořáků. Může být chlazen vodou buď přímo anebo nepřímo. Chlazení může být zabezpečeno i proudícím plynem.

Pro stabilizaci plazmového oblouku se používá voda nebo směs plynů. Nejčastěji se používá směs argonu, dusíku, vodíku a stlačeného vzduchu. Nevýhodou tohoto způsobu stabilizace je vznik dýmu, prachu, hluku a ultrafialového záření. Při stabilizaci směsí plynů se také uvolňuje velké množství zdraví škodlivých oxidů dusíku, které se musejí odsávat. To znamená další náklady na zařízení.

Stabilizace pomocí vody (Obr. 7), je tak méně nákladnější. Voda zde nahrazuje fokusační plyn a je vstříkována do plazmového paprsku. Voda vytváří také ochrannou vrstvu kolem místa řezu. Ovlivňuje tak příznivě šířku řezu a samotnou kvalitu řezu.



Obr. 7. Stabilizace plazmového oblouku vodou [10]

Výhody stabilizace plazmového oblouku vodou oproti stabilizaci směsí plynů je:

- vyšší stability oblouku,
- vyšší trvanlivost trysky,
- zvýšení rychlosti řezání,
- zvýšení kvality řezu.

1.5.3 Mechanismus plazmového řezání

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. [13]

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. [10]

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. [13]

Výhody plazmového řezání:

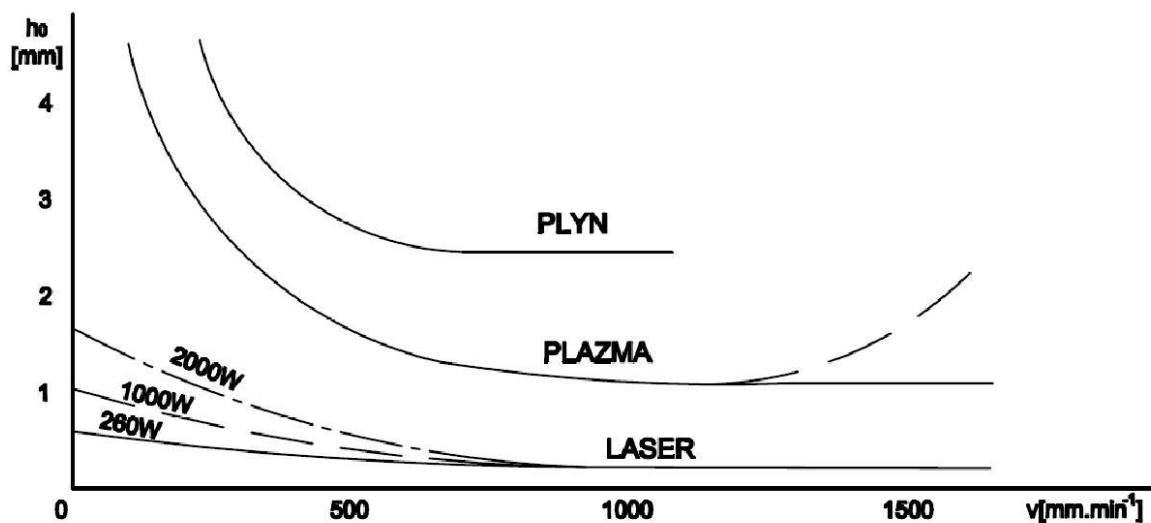
- řezání všech elektricky vodivých materiálů,
- vysoká rychlost rezání,
- menší teplem ovlivněná oblast,
- velká přesnost u moderních typů plazmových zdrojů a hořáků.

Nevýhody plazmového řezání:

- vysoké náklady,
- omezené používání při větších hloubkách materiálů,
- širší řezná spára
- vysoký přívod tepla.

2 TEPELNÉ OVLIVNĚNÍ MATERIÁLU

Míra tepelného ovlivnění pro různé způsoby dělení materiálů je zvýrazněna níže (Obr. 8). Proto je nutno počítat s obdobnými problémy, například s možností vzniku trhlin, se zakařením, vyžháním, rekrytalizací nebo ztrátou korozní odolnosti. V tomto směru je nutno každý materiál posuzovat obdobně, jako při svařování. V řadě případů je nutno předepsat určitý teplotní režim. Někdy se ovlivněná oblast obrábí, často však zbytečně, zvláště pokud se takto připravoval materiál pro svařování. [8]



Obr. 8. Míra tepelného ovlivnění pro různé dělení materiálů [8]

K tepelnému ovlivnění materiálu dochází v oblasti místa řezu. Jde prakticky o zakalení součásti do určité hloubky od místa řezu. Při tomto zakalení dochází ke změně struktury a povrchu materiálu.

2.1 Tvrdost povrchu

Tvrdost je jednou ze základních fyzikálních vlastností každého materiálu. Pojem tvrdost definujeme jako schopnost materiálu vníkat cizích těles. I mimo strojírenství je tvrdost důležitým fyzikálním ukazatelem o stavu materiálu nebo součásti. Proto se musí sledovat hodnota tvrdosti během technologických procesů, tak aby nedocházelo k nežádoucímu růstu či poklesu její hodnoty.

Tvrdost materiálu zjišťujeme na základě jednoduchého principu založeného na vníkaní cizího tělíska do materiálu v kolmém směru a to určitou zatěžující silou a pod zadaný čas. K určení tvrdosti používáme tyto základní statické zkoušky makrotvrdosti:

- podle Brinella,
- podle Vickerse,
- a podle Rockwella.

2.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Principem této zkoušky je, že vnikající těleso (tvrdokovová kulička o průměru D) se zatlačuje do povrchu zkušební tělesa a po odlehčení zkušební zátížení F se měří průměr vtisku d , který zůstane na povrchu (Obr. 9).

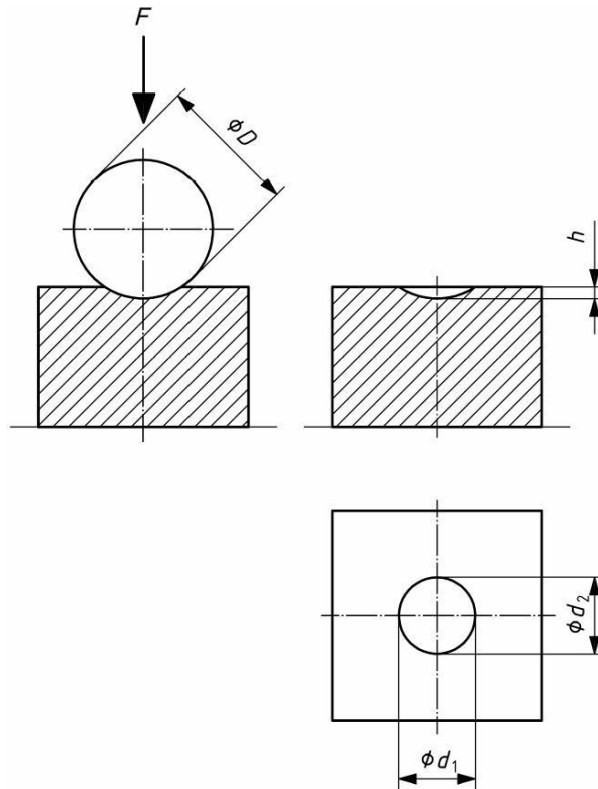
Tvrdot podle Brinella je úměrná poměru získaného podělením zkušební zařízení plochou zaobleného povrchu vtisku. Předpokládá se, že vtisk si zachová tvar koule a plocha jeho povrchu se vypočte ze středního průměru vtisku a průměru kuličky. [1]

Výpočet tvrdosti dle Brinella:

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Legenda:

- d je aritmetický průměr vtisku v mm
- D je průměr zkušební kuličky v mm
- F je zkušební zátížení v N
- 0,102 je konstanta



Obr. 9. Princip zkoušky [1]

2.1.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Princip je založen, že diamantové vnikající těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s předepsaným vrcholovým úhlem 136° mezi protilehlými stranami se zatlačuje do povrchu zkušebního tělesa. Následně se měří délka úhlopříčky vtisku, která v povrchu zůstane po odlehčení zkušebního zatížení, F (Obr. 10).

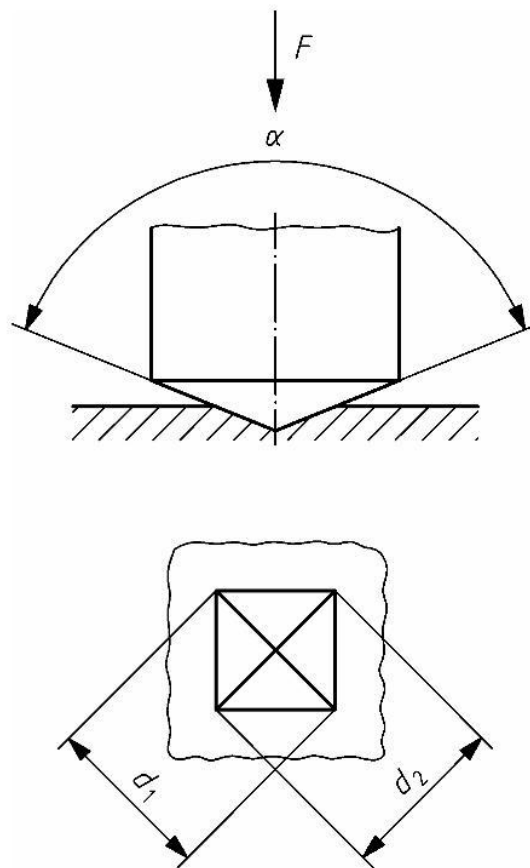
Tvrdot podle Vickerse je úměrná podílu zkušebního zatížení plochy vtisku, který se považuje za pravidelný čtyřboký jehlan o čtvercové základně se shodným vrcholovým úhlem jako vnikající těleso. [2]

Výpočet tvrdosti dle Vickerse:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Legenda:

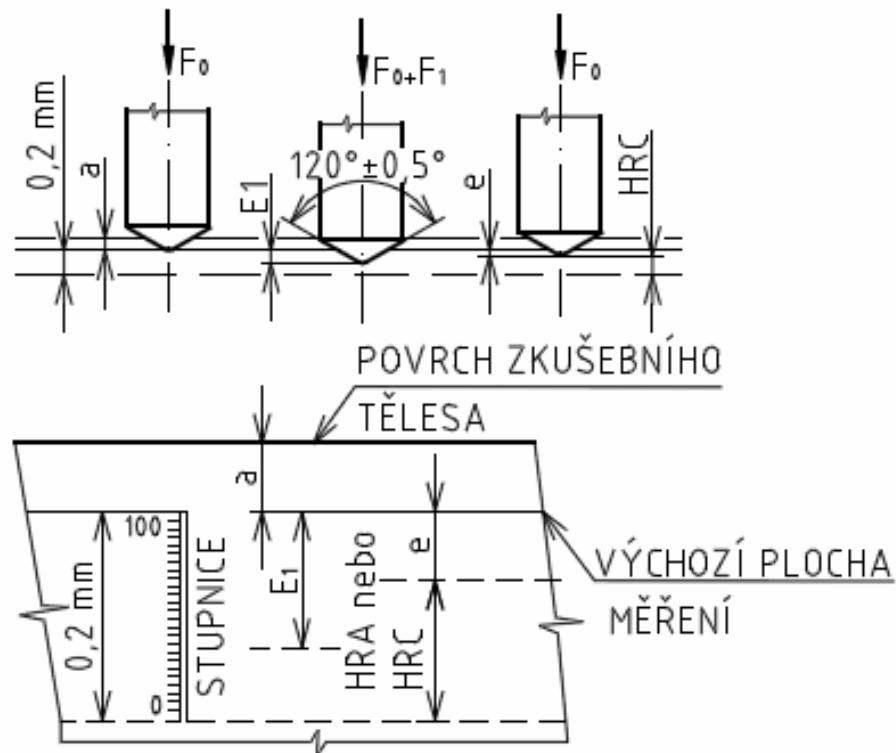
- d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček v mm
- F je zkušební zatížení v N
- 0,102 je konstanta



Obr. 10. Princip zkoušky [2]

2.1.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Principem této zkoušky je vnikající těleso stanoveného rozměru, tvaru a materiálu se zatlačuje do povrchu zkušebního tělesa ve dvou krocích za předepsaných podmínek. Po odlehčení přídatného zkušebního zatížení se měří trvalá hloubka vtisku h při předběžném zkušebním zatížení (Obr. 11). [3]



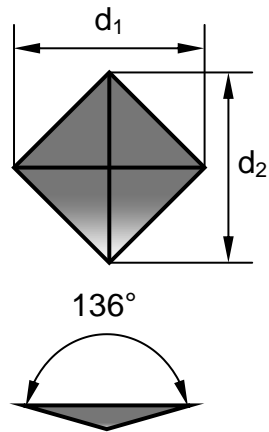
Obr. 11. Princip zkoušky (kužel)

2.1.4 Zkoušky mikrotvrlosti

Zkoušky mikrotvrlosti jsou na stejném principu jako statické zkoušky makrotvrlosti. Rozdíl je především ve velikosti zkušebního zatížení, které se pohybuje maximálně do 2N a délky příčného ostří indentoru. Délka příčného ostří indentoru je max. 0,0005 mm.

Vnikajícím tělesem je diamantový jehlan buď se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° (dle Vickerse) nebo s kosočtverečnou základnou s úhlopříčkami v poměru 7:1 a vrcholovými úhly 130° a $176^\circ 30'$ (dle Knoopu).

U Vickersovy metody (Obr. 12) se změří velikost úhlopříček d_1 a d_2 a u Knoopovy metody (Obr. 13) se změří délka vtisku L .



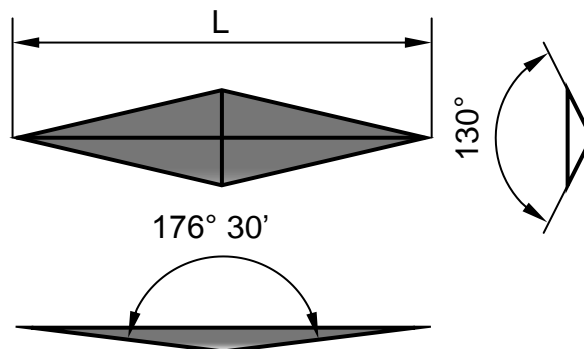
Obr. 12. Vtisk podle metody Vickerse

Výpočet mikrotvrlosti dle Vickerse:

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

Legenda:

- d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček v mm
- F je zkušební zatížení v N
- 1,854 je konstanta



Obr. 13 Vtisk podle metody Knoopa

Výpočet mikrotvrlosti dle Knoopa:

$$KHN = \frac{F}{0,07028 \cdot L^2} \quad (4)$$

Legenda:

- L je délka vtisku
- F je zkušební zatížení v N
- 0,07028 je konstanta

3 INTEGRITA POVRCHU

Z hlediska výroby má zásadní význam znalost mechanismu vytváření nového povrchu součástí, protože umožňuje pochopit povahu a vlastnosti takto vytvořeného povrchu, dává možnost pro zlepšení použitých procesů a případně umožňuje vytvoření obrobených ploch bez poruch. Všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součástí, lze shodně posuzovat jako změny jakosti. Tyto změny se potom mohou dávat do vztahu s budoucí funkcí dokončené plochy a využívají se pro hodnocení její integrity. Integrity povrchu je proto odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Problém i obsah integrity funkčních ploch součástí byl definován již začátkem sedmdesátých let, kdy bylo ukázáno, že je nutné dávat do souvislosti podmínky technologických operací s požadavky jakosti, spolehlivosti a životnosti součástí i zařízení. První práce na tomto úseku byly zaměřeny na opracování vysoce pevných ocelí. Zatím neexistuje způsob, kterým lze komplexním způsobem zhodnotit nově vytvořenou plochu z hlediska její integrity. Řada údajů o obrobené ploše se sice již běžně zjišťuje, pro jiné jsou zpracovány postupy a navrhována potřebná zařízení. Zatím nejspolehlivější zkouškou integrity je vlastní provoz.

Integritu povrchu tvoří:

- geometrická přesnost,
- drsnost povrchu,
- zbytková napětí v povrchové vrstvě,
- změny tvrdosti v povrchové vrstvě,
- změny struktury v povrchové vrstvě,
- tepelné změny – opaly,
- trhliny.

3.1 Geometrická přesnost

Geometrická přesnost je spolu s již zmíněnou drsností povrchu a jeho profilem další složkou integrity povrchu, která je ve strojírenské praxi a průmyslových podnicích při kontrole součástí vyhodnocována. Povinnost měřit a hodnotit geometrickou přesnost vychází z pod-

staty samotné konstrukce a tvaru součástí, dodržení předepsaného stupně přesnosti a tvaru, včetně povolených odchylek.

Strojní součásti jsou převážně rotační nebo rovinné. Z tohoto také vychází hodnocení odchylek geometrického tvaru. Pro součásti rotační jsou to kruhovitost, válcovitost, souosost a soustřednost, čelní obvodové a celkové házení. Pro rovinné plochy potom rovinnost, kolmost a rovnoběžnost. Požadavky na geometrickou přesnost jsou definovány ISO normami. [4]

3.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je popsána podle normy ČSN EN ISO 4287. Dle této normy je i v současné době nejčastěji používán parametr R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, dále norma definuje největší výšku profilu R_z popřípadě celkovou výšku profilu R_t a průměrnou výšku profilu R_c . Drsnost povrchu je určena zejména řeznou rychlostí, velikostí posuvů a hloubkou třísky, dále použitou technologií (definována nástrojem a jeho geometrií, typem pohybů, způsobem řezání atd.), použitým prostředím probíhajícího procesu, obráběným materiálem. Profil drsnosti povrchu je vytvářen pravidelným odběrem třísky, obráběcím nástrojem a nepravidelnostmi, které způsobuje určitá drsnost povrchu nástroje, lomí a opotřebení nástroje, změny na nástroji, tvrdé částice třísky, které působí abrazivně na obráběný povrch. [4]

3.3 Zbytková napětí

Než se z materiálu stane hotová součást, projde celou řadu operací, postupů a zpracování. Pokud je materiál jakkoliv přetvářen, je ve většině případů použito vnější síly. Její velikost a smysl je pro každou technologickou operaci jiný. Co všechny okolnosti spojuje je vznik napětí v materiálu. Je přirozené, že materiál reaguje na vnější podněty od působící síly. Tato podstata vychází ze třetího Newtonova pohybového zákona, kde každá akce vyvolá reakci. Tedy působením vnějších sil se v materiálu vyvolává napětí, od kterého jsou pak odvozovány elastické či plastické deformace. [4]

Cílem je tedy snaha minimalizovat velikosti napětí, neboť materiál je ve většině případů vstupním činitelem pro další zpracování a tím pádem nastává další působení vnějších sil na materiál se všemi výše popsány účinky.

Zbytková napětí jsou napětí, která v materiálu existují i bez působení vnějších sil. Jak již bylo zmíněno, velikost a smysl zbytkových napětí může být různý. V podstatě rozeznáváme dva druhy napětí, a to tahová nebo tlaková. Tahová jsou kladná, tlaková jsou záporná. Jakýmkoliv procesem, kdy je materiál vystaven působení vnějších sil dochází k výskytu napětí, které se vždy sčítají. Napětí se sčítají v absolutních hodnotách, takže dochází ke kumulaci napětí a proto jsou velmi nebezpečná.

Zbytková jsou velmi důležitou a často v praxi opomíjenou záležitostí. V praxi je většinou kontrola materiálu nebo součásti spojena s kontrolou tvrdosti, geometrického tvaru a drsnosti. Kontrola a měření zbytkových napětí je časově náročná a proto je v pozadí zájmu kontroly. Nicméně při výzkumu integrity povrchu nemůže být opomíjena. Vzhledem ke vzniku zbytkových napětí působením mechanického zatížení a tepla je úzce spojena s tvrdostí. Pokud je tedy při kontrole zjištěna výrazná změna tvrdosti po obrábění, je nutné provést i měření zbytkových napětí. Výsledek ukáže, jestli se jednalo pouze o změnu strukturálního charakteru nebo zda došlo k vytvoření nežádoucích zbytkových napětí. [4]

3.3.1 Měření zbytkových napětí

Pro měření zbytkových napětí se používá jak destruktivních tak i nedestruktivních metod. Mezi destruktivní metody řadíme:

- odleptávání povrchu (vlivem chemického narušení povrchu se sleduje vzniklá deformace uvolněné vrstvy),
- vrtání povrchové vrstvy (pomocí tenzometrické růžice snímáme a registrujeme změny napětí v oblasti vytvářeného otvoru),
- rozpouštění povrchu (tahová napětí se projeví trhlinkami důsledkem chemického rozrušení povrchu, jsou vizuálně hodnocena).

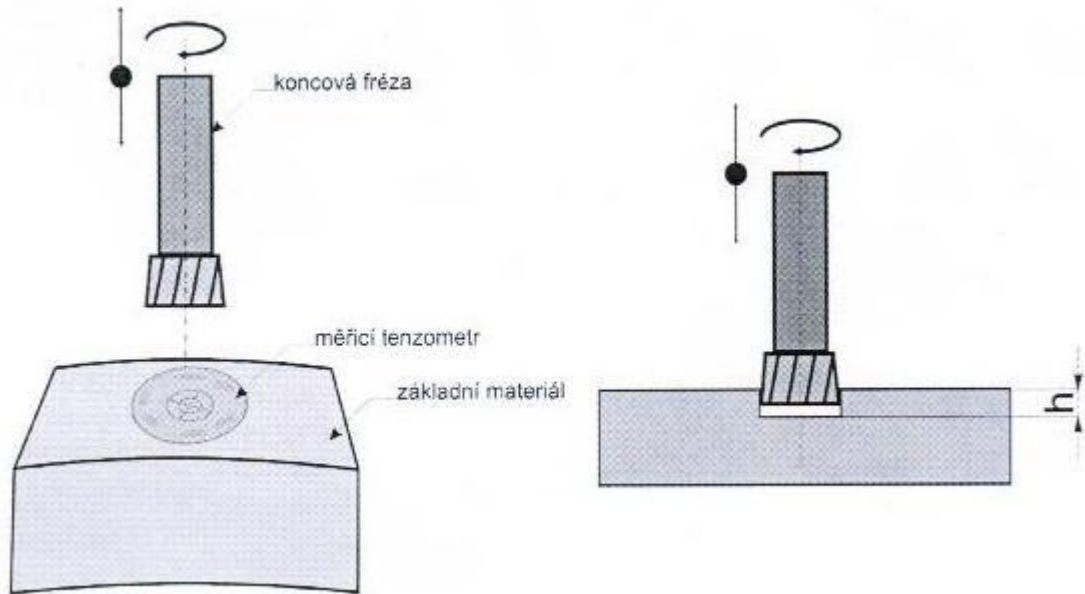
Mezi nedestruktivní metody řadíme:

- rentgenová tenzometrie (použití gama paprsků pro zjištění velikosti zbytkových napětí),
- další metody (spíše v oblasti vývoje).

Podstatou tohoto měření je, že na zkoušenou součást jsou napevno připevněny dva tenzometry, jeden měřící a druhý kompenzační. Oba tenzometry jsou připojeny pomocí napájecích kontaktů do přístroje, který přes počítač a daný software vyhodnocuje velikost a smy-

sl napětí. Tato velikost a směr je určena tak, že se koncová fréza (Obr. 14), postupně zafrézuje do předem zadané hloubky, která je 0,3 mm v zadaných krocích, co krok to nový přírůstek hloubky a nová hodnota napětí, které jsou zaznamenávány.

S takto zaznamenaných hodnot se určí křivka napětí, tedy pro každou hloubku je jedna hodnota napětí. V případě přechodu tahových na tlaková napětí a obráceně nás také zajímá hloubka přeměny. [4]



Obr. 14. Ukázka měření zbytkových napětí [4]

3.4 Změny tvrdosti

Změna tvrdosti v povrchové vrstvě je dána jak mechanickým, tak tepelným zatížením povrchu při obrábění. V praxi se vyskytují tři základní průběhy tvrdosti v povrchové vrstvě:

- vysoká tvrdost povrchu s poklesem na tvrdost jádra (zakalení povrchové vrstvy, plastická deformace, vznik chemických sloučenin – kysličníků),
- vysoká tvrdost povrchu s poklesem tvrdosti pod tvrdost jádra a následným růstem na tvrdost jádra součásti (sekundární zakalení, popuštění následující vrstvy, zpevnění vrstvy a následné popuštění),
- nízká tvrdost povrchu, která postupně roste na tvrdost jádra (popuštění vrstvy).

Změny tvrdosti mohou být v uvedených případech doprovázeny změnou struktury, případně způsobem tepelného zpracování povrchu (žihání, popouštění za nízkých teplot). V praxi

dochází často ke složitějšímu průběhu tvrdost v povrchové vrstvě v závislosti na fyzikálních vlastnostech materiálu, jeho struktuře a podmínkách obrábění. [4]

3.5 Změny struktury

Každý kovový materiál je přesně určen svou vnitřní stavbou, uspořádáním a orientací zrn. V rámci tepelných procesů lze tyto podstaty u materiálu cíleně měnit podle našich požadků a potřeb. Jedná se zejména o následné zotavující procesy, jako rekrystalizační žíhání a normalizační žíhání. Snaha je o dosažení v materiálu rovnovážného stavu a potřebné struktury zrn. Při obrábění je materiál namáhán mechanicky a tepelně. To může vyvolávat změny ve struktuře materiálu, což je z podstaty procesu nepřipustné. Měl by platit ekvivalent zákona o zachování vlastností, tedy struktura materiálu před a po procesu obrábění by měla být zachována.

Ovlivněním vnitřní struktury materiálu může právě docházet k ovlivnění i následných užitečných vlastností součástí v různých aplikacích a prostředích. Změna struktury materiálu se projeví současně se změnou tvrdosti materiálu, změně velikosti a orientace zbytkových napětí. Dochází tak k iniciaci a šíření trhlin, urychlení degradačních procesů, opotřebení součástí abrazivním účinkem, pittingem a dalšími negativními složkami.

Se změnou struktury souvisí:

- druh použitého materiálu obrobku a jeho tepelné zpracování,
- řezné podmínky při obrábění,
- řezné prostředí.

U materiálů náchylných na tepelné rázy, je o to větší nebezpečí změny struktury vznikajícím teplem z procesu obrábění a současným ochlazujícím účinkem od chladicích kapalin. Na povrchu materiálu vznikne vrstva, která je tvrdá a pod ní leží další vrstva, která nebyla ovlivněna. Tento mechanismus změn vede ke vzniku zbytkových napětí, neboť tato vrstva se snaží vrátit do rovnovážného stavu a to může způsobit vznik trhlinek v materiálu. [4]

3.6 Tepelné změny

Tepelné změny (opaly) jsou změny strukturního charakteru, které jsou vyvolány gradienty tepla vzniklých během procesu obrábění. Zjednodušeně řečeno, dojde vlivem určitých specifických teplot k tzv. spálení povrchu nebo povrchové vrstvy. Tyto změny nejsou tako-

vými, které je možné určit pouhým pohledem. Pro detekci je nutná chemická cesta, konkrétně odleptání povrchu a pro určení druhu opalů, jejich velikosti, oblasti zasažení použijeme optické přístroje.

Rozlišujeme dva druhy opalů a to nízkoteplotní (detekce v barvě žluté) a vysokoteplotní (detekce v barvě modré). Vysokoteplotní opaly vznikají při překročení křivky teploty A_{c1} . Vznik opalů je spojen s velikostí tepla, rozložení teplotního pole během obrábění a dalších okolností spojených s obráběcím nástrojem a materiálem obrobku. Významnou roli také hraje řezné prostředí při obrábění, neboť eliminuje množství vzniklého tepla. Dále pak celková tepelná bilance řezného procesu.

Stejně jako u zbytkových napětí je detekce opalů časově náročná a ve výrobě i kontrole je opomíjena. Může nastat případ, že součást je podrobena klasickým kontrolám drsnosti povrchu, geometrické přesnosti a tvrdosti. Vše je v povolených a předepsaných tolerancích. Součást je namontována do zařízení, kde pracuje. Po určité době náhle začne docházet k tvorbě vibrací, hluku, nepřesnostem v chodu zařízení, což následně vede k destrukci součásti a havárii stroje. Poté je zjišťována příčina destrukce a provádí se všechny možné zkoušky. Dostane se i na to, že ve struktuře materiálu náhle objevíme oduhličenou vrstvu v povrchové vrstvě, dále pak nežádoucí zbytková napětí a pokud se dostaneme i na chemickou detekci, tak zjistíme opaly. [4]

3.7 Trhliny

Při obrábění vytváříme nový povrch. Tento povrch je tvořen určitou topologií. Právě množství a velikost nerovností a existence zbytkových napětí vedou ke vzniku trhlin. Trhliny se vyskytují u povrchových nerovností na okrajích opalů a jsou spojeny s výskytem koroze a opotřebení.

Mechanismus vzniku trhlin je prakticky totožný u všech případů, působením vnějších sil jsou v materiálu vyvolána napětí, která se koncentrují právě v nerovnostech, mikrotrhlinách, tepelných přechodech a ve struktuře materiálu. Když jsou překročeny určité mezní stavy, dochází k růstu nebo šíření této trhliny. Ta se pak zvětšuje do různých směrů a orientace, váže na sebe změny mechanických vlastností, zejména pevnost a tak dochází k různým opotřebením, únavovým lomům a destrukci součásti.

Největší napětí je vždy ve špici trhliny, tam působí největší koncentrace napětí a z tohoto místa se také šíří. Postupné zeslabování průřezu součásti je spojeno s abrazivním opotřebe-

ním, pittingem a šířením trhlin. Toto nebezpečí roste s množstvím opakovaného používání, nesprávně působícími silovými a momentovými účinky, agresivním prostředím, kde je součást používána. Všechny tyto aspekty urychlují iniciace a šíření trhlin v součástech. [4]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

4.1 Hlavní cíle praktické části diplomové práce

1. Popsat zařízení plazmového řezacího stroje vyvíjeného na UTB ve Zlíně.
2. Popsat materiál vzorků.
3. Připravit metalografické preparáty.
4. Provést hodnocení struktury materiálu před a po tepelném ovlivnění.
5. Provést měření mikrotvrdomosti materiálu a vyhodnotit vzdálenost od povrchu, která je zakalená vlivem řezání plazmovým obloukem.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části byly vybrány tři vzorky dělené plazmovým obloukem a tři vzorky dělené laserem. Na těchto vzorcích bylo zkoumáno tepelné ovlivnění materiálu měřením mikrotvrdomosti v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Dále byla zjišťována změna struktury materiálu před a po dělení plazmovým obloukem.

Všechny vzorky, které sloužily k experimentu, poskytnuly externí společnosti. Parametry vzorků jsou:

Vzorek č. 1 - materiál 11 373, tloušťka 25 mm (konstantní výkon stroje)

Vzorek č. 2 - materiál 11 373, tloušťka 15 mm (konstantní výkon stroje)

Vzorek č. 3 - materiál 11 373, tloušťka 6 mm (konstantní výkon stroje)

Vzorek č. 4 - materiál 11 600, tloušťka 3 mm (výkon stroje 1000 W)

Vzorek č. 5 - materiál 11 600, tloušťka 3 mm (výkon stroje 1600 W)

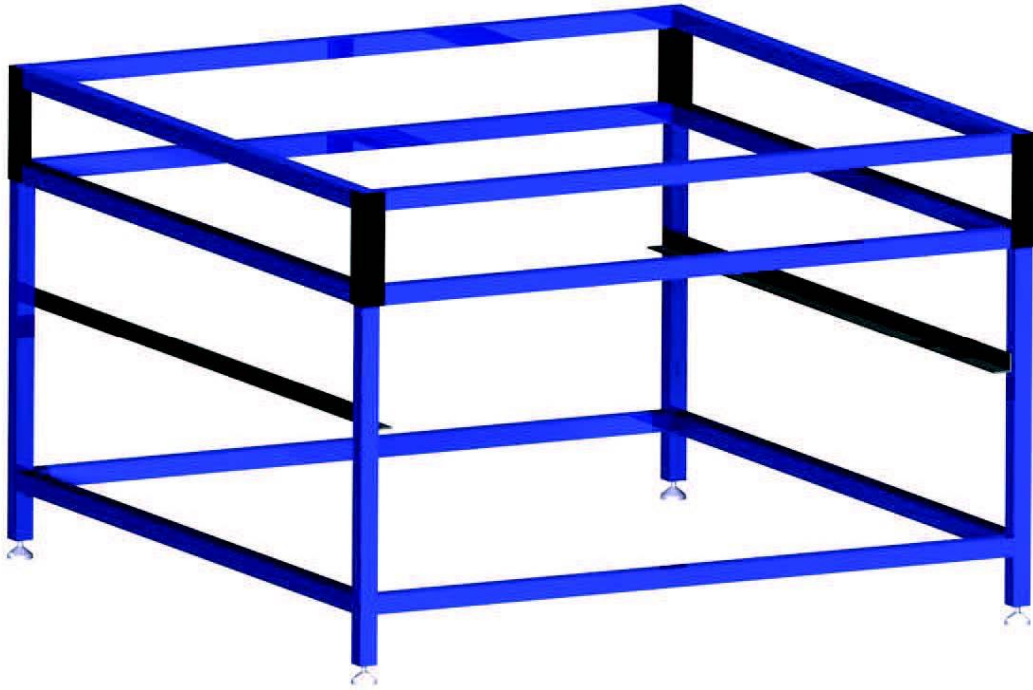
Vzorek č. 6 - materiál 11 600, tloušťka 3 mm (výkon stroje 2200 W)

5.1 Popis konstrukce plazmového řezacího stroje

Samotná konstrukce plazmového řezacího stroje je složena z pevného rámu z konstrukčních materiálů, pracovního stolu o rozměru 1200 x 1200 mm, plazmového hořáku, posuvových mechanismů a hardwarového zařízení. Portálová konstrukce zaručuje dokonalou tuhost stroje pro správné fungování plazmového řezání.

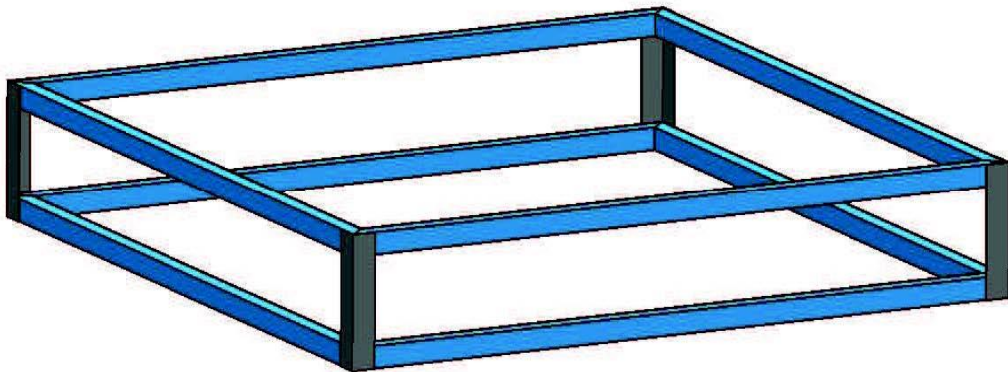
5.1.1 Rám stroje

Rám stroje (Obr. 15) je vyrobený z čtvercových trubek o rozměru 30 x 30 mm s tloušťkou stěny 2 mm. Materiál trubek je z konstrukční oceli 11 373 s velmi dobrou svařitelností. Rám je rozdělen na tři základní části.



Obr. 15. První část rámu

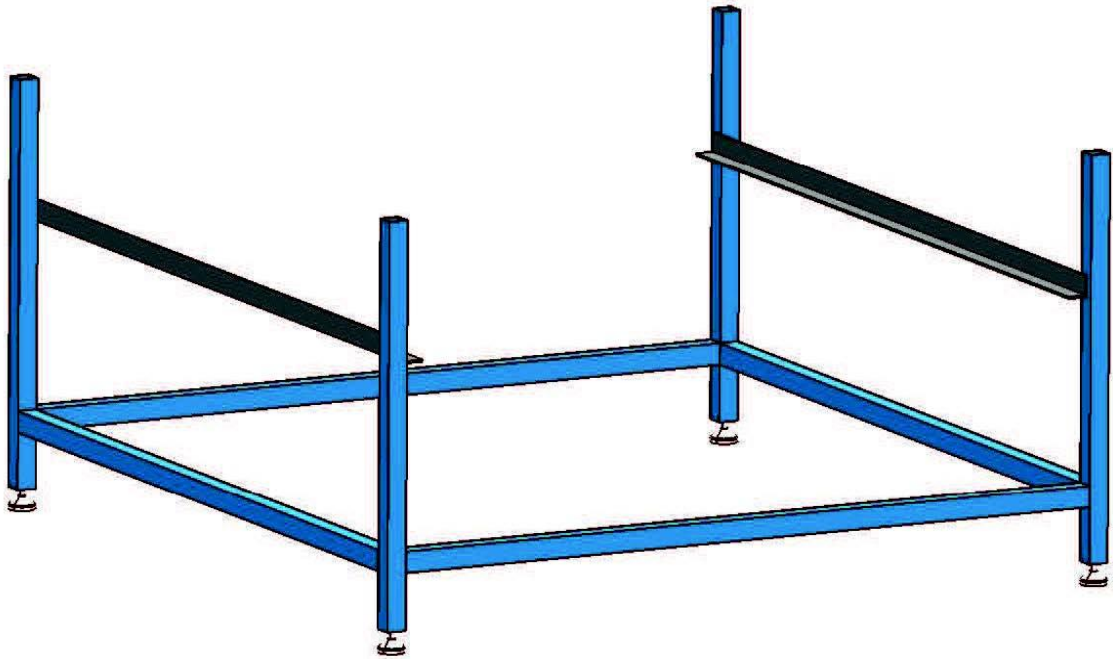
V první základní části rámu (Obr. 13) jsou uloženy všechny funkční prvky pro osu X. Konstrukce této části je složena ze dvou svařenců ve tvaru obdélníku. Tyto svařence jsou spojeny L profily, díky čemuž tvoří pevnou konstrukci rámu.



Obr. 16. První část rámu

Dle normy je pozice druhé části rámu (Obr. 16) 780 mm od země po pracovní stůl plazmové řezačky. Tato část je opatřena seřizovacími podstavci, kterými je stroj vyrovnán do vodorovné polohy.

Třetí část rámu (Obr. 17) je složená ze dvou L profilů, na kterém je usazený sběrač odpadních produktů, které vznikají při plazmovém řezání. Celá třetí část rámu zpevňuje konstrukci.



Obr. 17. Druhá a třetí část rámu

5.1.2 Prvky vodících systémů

Mechanismus stroje je založený na lineárním pohybu ve směru osy X, Y, Z. Osa X je konstrukčně svázaná s rámem stroje. Osa Y je svázaná s osou X a osa Z je konstrukčně spjatá s osou Y. Vedení osy X se skládá z vodících tyčí (Obr. 18) W20 o průměru 20 mm.



Obr. 18. Vodící tyče W20

Tyto vodící tyče jsou indukčně kalené na cca 62 HRC do hloubky 1,2 až 1,6 mm. Mají průměr broušený v toleranci h6, což zaručuje dostatečnou přesnost a vysokou životnost. Pro nízké tření a spolehlivý chod vedení jsou vodící tyče osazené dvojitým uzavřeným linearsetem SMA20L (Obr. 19) se dvěma kuličkovými pouzdry.



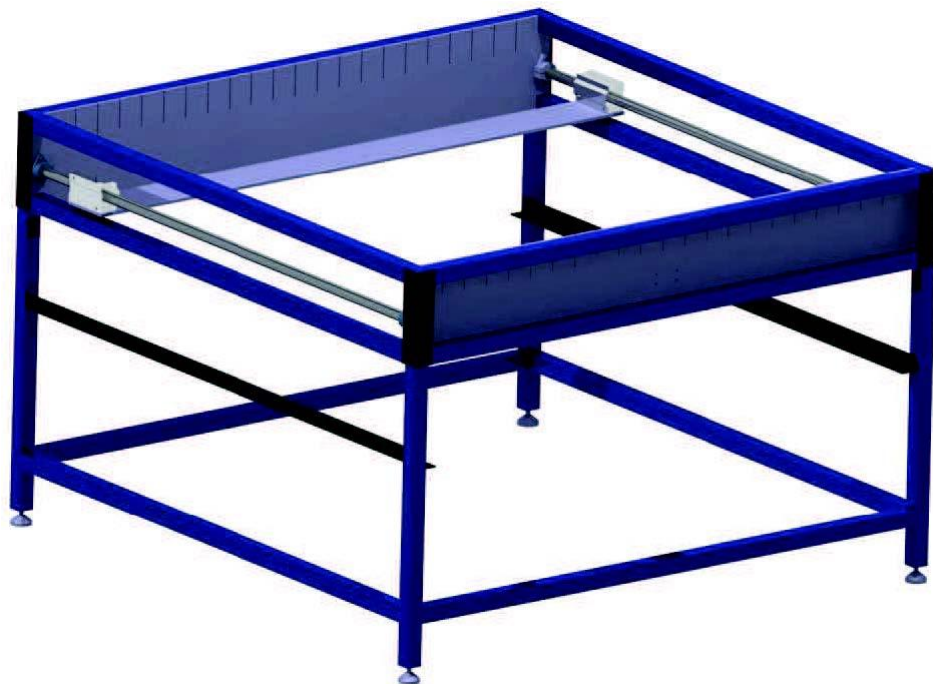
Obr. 19. Linearset SMA20L

Tyto pouzdra zaručují stabilitu konstrukce osy X. Typ linearsetu je uzavřený, čímž zamezuje vnikání prachových a opalových částic do vodícího systému. Vodící tyče jsou upnuté v úchytech SHF20 (Obr. 20), které jsou přimontované na kotevní desky rámu stroje.



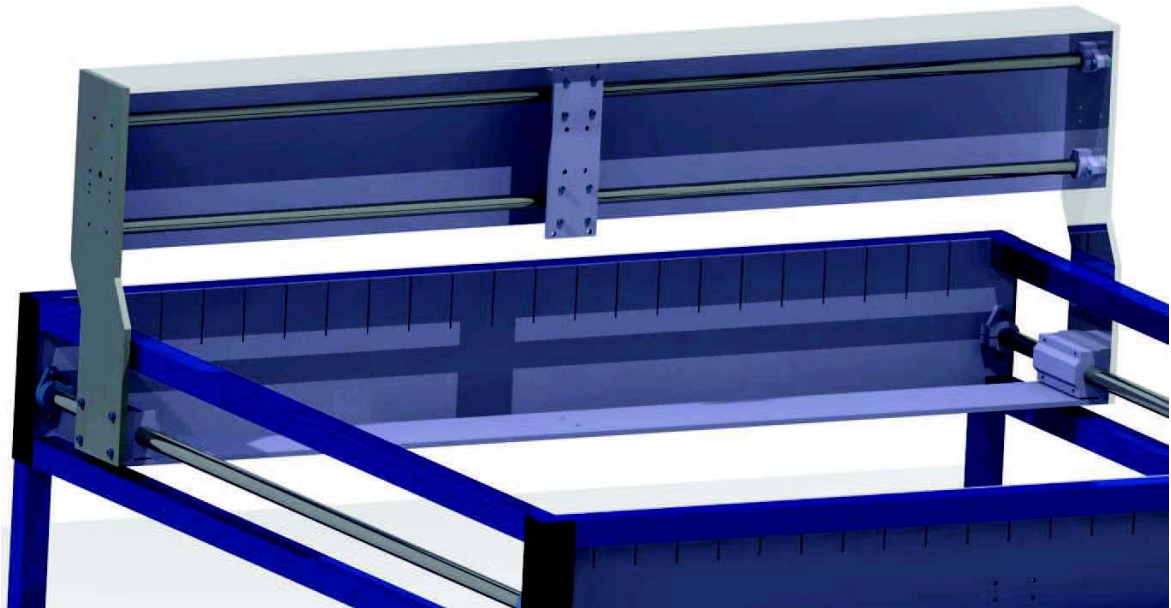
Obr. 20. Úchyt SHF20

Vedení osy X (Obr. 21), je ukotvené dvěma kotevními deskami. Přimontované k rámu řezacího stroje. Tyto desky jsou vyrobené ze slitiny hliníku o tloušťce 6 mm. Pro zaručení dostatečné tuhosti a zároveň nízké hmotnosti.



Obr. 21. Vedení osy X

Vedení osy Y (Obr. 22) je konstruované ze stejných prvků jako osa X.



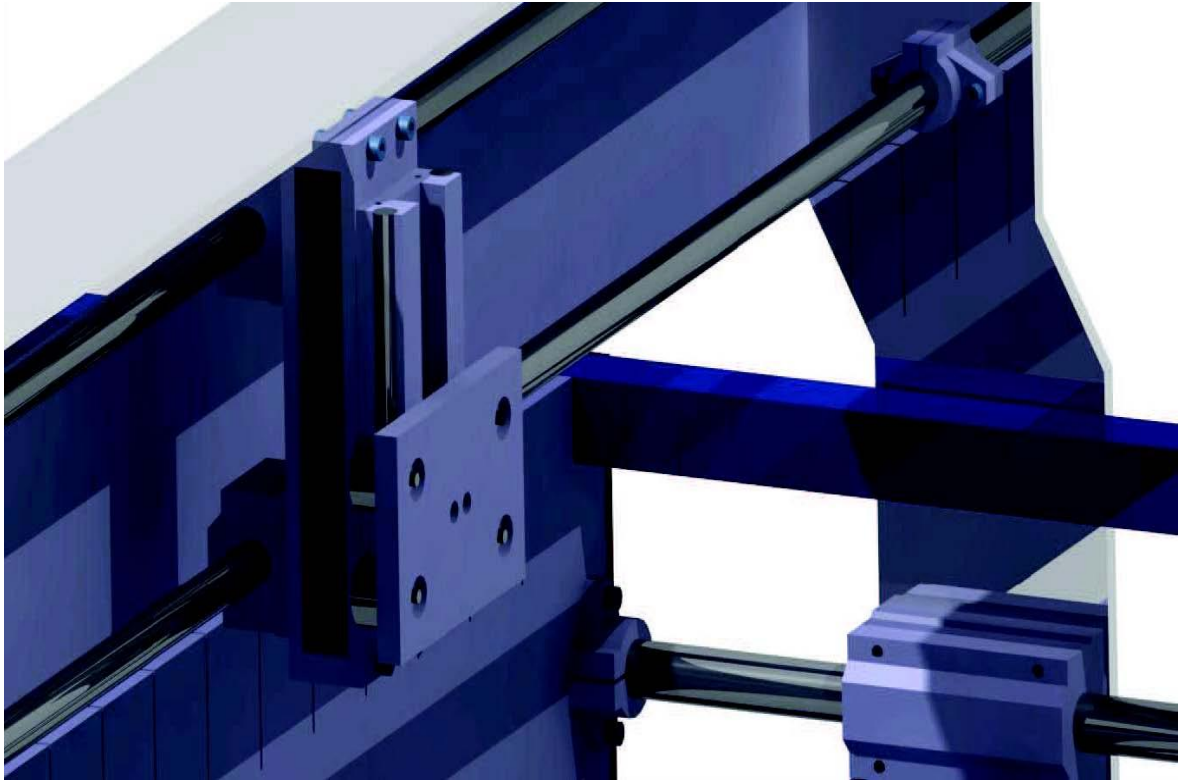
Obr. 22. Vedení osy Y

Na osu Y ale není vyvíjené tak velké zatížení, proto mají vodící tyče průměr 16 mm s tvrdostí cca 62 HRC do hloubky 1 až 1,5 mm. Tolerance průměru je totožná s tyčí W20. Na těchto vodících tyčích W16 jsou uzavřené linearsey SMA16 (Obr. 23) s jedním kuličkovým pouzdem.



Obr. 23. Linearset SMA16

Tyto linearsey jsou blíže u sebe než na ose Y. Vodící tyče W16 jsou uchycené úchytem SHF16. Tyto upínače jsou ukotvené v bočních deskách osy X a tvoří tak kolmost os X a Y. Pro vedení osy Z (Obr. 24) je použitý lineární modul AUROL.



Obr. 24. Vedení osy Z

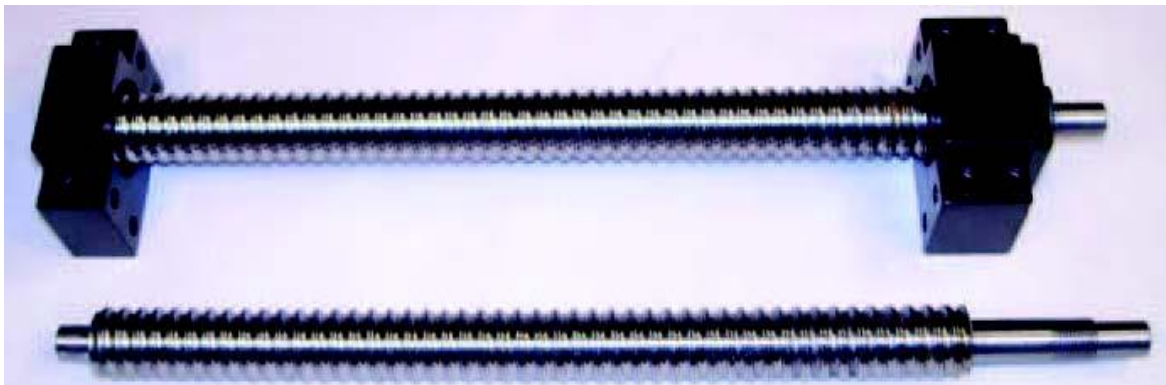
Tento modul se skládá z hliníkového profilu, ve kterém jsou upnuté tvrdě chromované vodící tyče s přesností h7, po kterých se odvalují rolly. V kotevní desce jsou tyto rolly ukotvené s excentrickými čepy. Lineární modul osy Z AUROL (Obr. 25) je ukotvený na desce a je přimontovaný na vedení osy Y přes dvě distanční kostky.



Obr. 25. Lineární modul osy Z AUROL

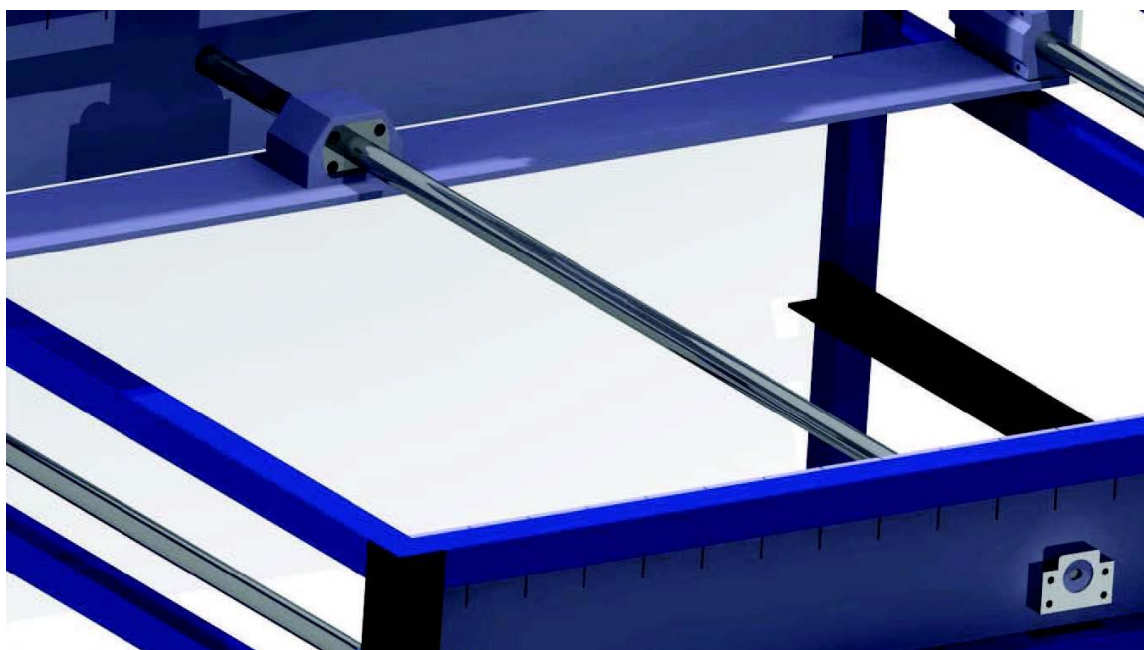
5.1.3 Posuvy

Kuličkové šrouby (Obr. 26) s kuličkovou maticí slouží pro posuv osy X a Y.



Obr. 26. Kuličkové šrouby

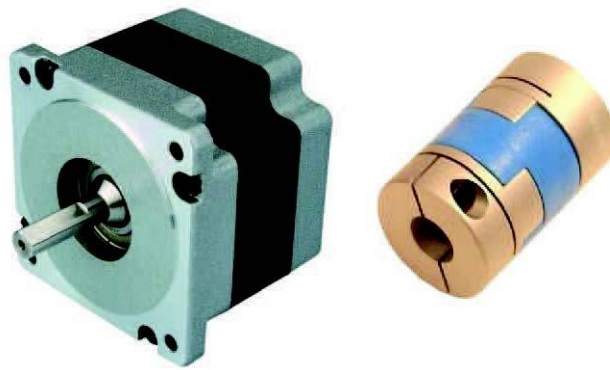
Tyto šrouby jsou konstrukčními prvky pohybových ústrojí, které převádějí s vysokou účinností rotační pohyb na přímočarý. Mají vysokou tuhost, přesnost a trvanlivost. Rovnoběžnost uložení kuličkového šroubu a vodících ploch je do 0,02 mm/1000 mm. Uložení maticové jednotky zajišťuje kolmost k podélné ose šroubu do 0,02 mm/1000 mm. Maticové jednotky jsou zatěžovány pouze v axiálním směru. Na ose Z je posuvový šroub značky KERK. Pro pohon všech os slouží krokové motory. K posuvu osy X (Obr. 27) slouží ukotvený kuličkový šroub s ložiskovými jednotkami BK12 a BF12.



Obr. 27. Posuv osy X

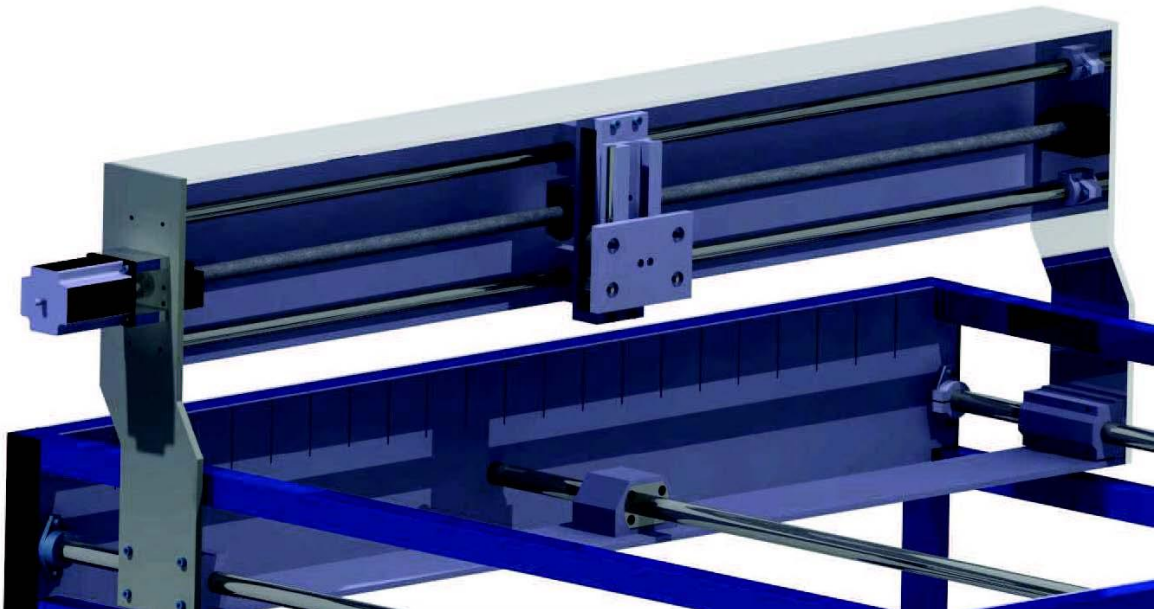
Průměr kuličkového šroubu SF2005 osy X je 20 mm se stoupáním šroubu 5 mm. Kuličková matice je zabudovaná do kostky ze slitiny hliníku. Tato kostka je ukotvena k desce, která spojuje vodící systém na levé a pravé straně osy X, čímž otáčením šroubu dochází k přenosu pohybu na vedení. Tuto osu pohání dvojfázový krokový motor 86HS45 (Obr.

28) s krouticím momentem 4,5 Nm. Úhel kroku motoru je $1,8^\circ$. Krouticí moment z krokového motoru se přenáší na kuličkový šroub pomocí pružné bezslové spojky LK25C, která je složená ze dvou hlavice a plastového středu. Spojka kompenzuje nesouost a radiální vůle mezi hřídelí motoru a pohybového šroubu. Dále tlumí přenos vibrací a omezuje rezonanci.



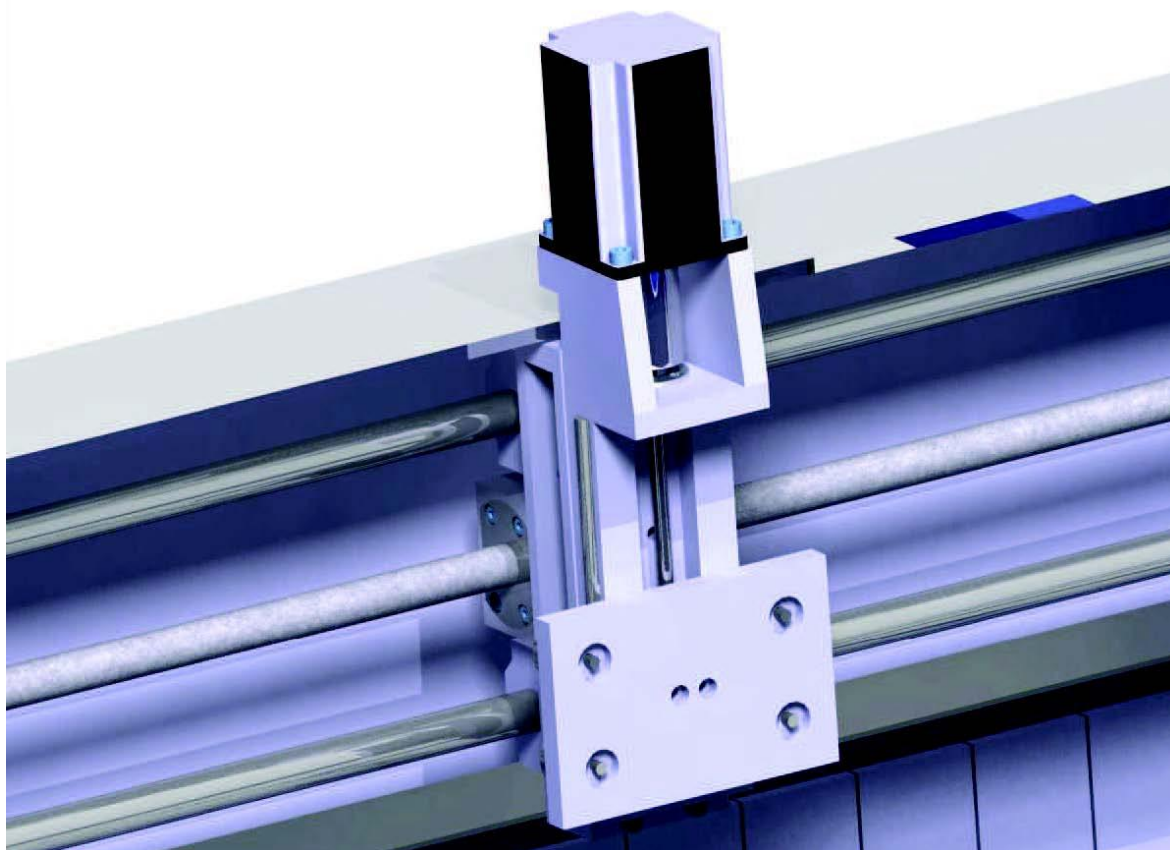
Obr. 28. Krokový motor 86HS45 a spojka LK25C

Pro posuv osy Y (Obr. 29) slouží také kuličkový šroub, který má průměr pouze 16 mm, protože na této ose působí menší zatížení. Šroub má označení SFI1605 se stoupáním 5 mm. Na tomto šroubu je jednoduchá kuličková matice FSI1605-4 bez vymezovače vůle. Ložiskové jednotky BK10 a BF10 jsou ukotvené v bočních deskách osy X.



Obr. 29. Posuv osy Y

Kuličková matice je zapuštěná do kostky vyrobené ze slitiny hliníku a je ukotvená k nosné desce osy Z. Tímto propojením je pomocí otáčení krokového motoru docílený pohyb posuvu osy Y. Posuv pohání dvoufázový krokový motor 60STH88 s krouticím momentem 3 Nm. Úhel kroku motoru je $1,8^\circ$. K přenosu krouticího momentu z krokového motoru na kuličkový šroub slouží spojka LK25C. Posuvový šroub značky KERK řady NTB je na ose Z (Obr. 30). Tento komplet s maticí NTB se vyznačuje vysokou axiální tuhostí s minimálními třecími momenty, tichým chodem a dlouhou životností. Konec šroubu je usazen do kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem. Vrchní část šroubu prochází kuličkovým ložiskem, kde je propojen s krokovým motorem přes spojku LK25C. Tento krokový motor 57HS22 má krouticí moment 2,2 Nm. Je to dvoufázový motor s úhlem kroku $1,8^\circ$.



Obr. 30. Posuv osy Z

5.1.4 Plazmový hořák

V ose Z je umístěný hořák plazmového zdroje. Samotný zdroj plazmového řezání je umístěný mimo řezací stroj. Jde o Telwin plazmovou řezačku Tecnica plazma 41 (Obr. 31). Tento zdroj neobsahuje samostatný zdroj stlačeného vzduchu. Stlačený vzduch se odebírá z kompresorovny, která dodává požadované objemové množství vzduchu pro chod

plazmové řezačky. Plazmová řezačka Tecnica plazma 41 dělí kovy z oceli, nerezové oceli, pozinkované oceli, hliníku, mědi, mosazi a další materiály s maximálním prořezem 12 mm. Plazmová řezačka má kontaktní invertorové zapalování s pilotním startem. Při každém startu se musí dotknout hořákem země stroje tak, aby došlo k zapálení plazmového oblouku. Plazmový hořák je upnutý na desku objímkou. Tato deska je přimontovaná na desku s rolnami vedení AUROL osy Z.



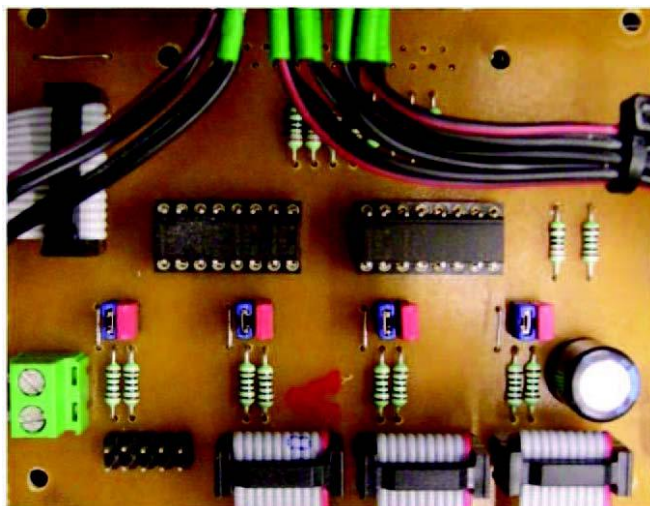
Obr. 31. Telwin Tecnica plazma 41

5.1.5 Řídící elektronika

Řídící elektronika provádí na popud signálu z PC požadované úkony jako je sepnutí plazmového zdroje nebo pohyb posuvů. Elektronika zvládá i zpětnou komunikaci s PC z důvodu použití bezpečnostního okruhu s tlačítkem E – Stop, koncových spínačů, spínačů nulových souřadnic, odměřování polohy posuvů aj. Software Mach3 primárně komunikuje přes LPT port.

5.1.6 Vstupní deska z PC s optickým oddělením portu LPT

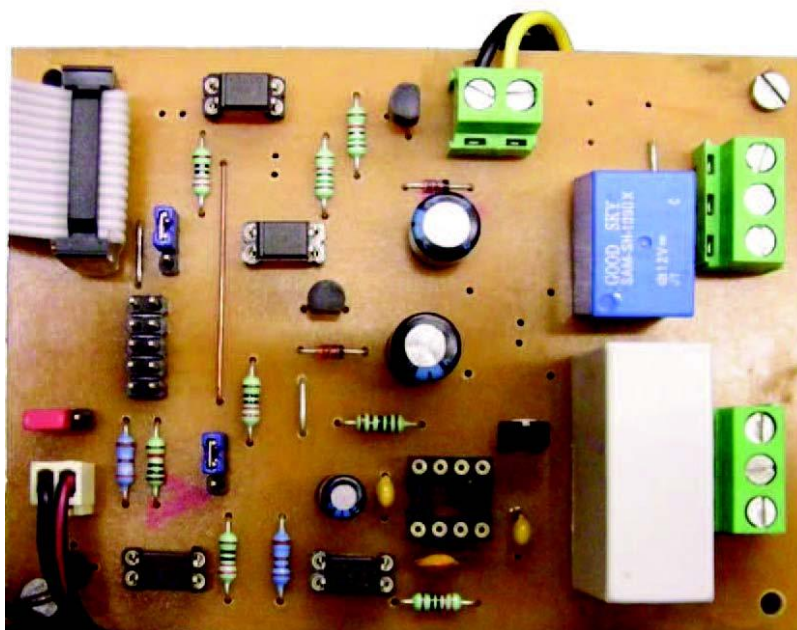
Vstupní deska (Obr. 32) odděluje LPT port od výkonové motorové elektroniky pomocí optočlenů. Desky jsou vzájemně propojeny plochými vodiči a konektory. DPS je univerzální a umožňuje pomocí jumperů záměnu signálů STEP a DIR. Deska plošných spojů je napájena napětím +5V, které je z této desky rozvedené i do DPS spínání plazmy.



Obr. 32. Vstupní deska s optickým oddělením

5.1.7 Deska spínání plazmy a dalších obvodů

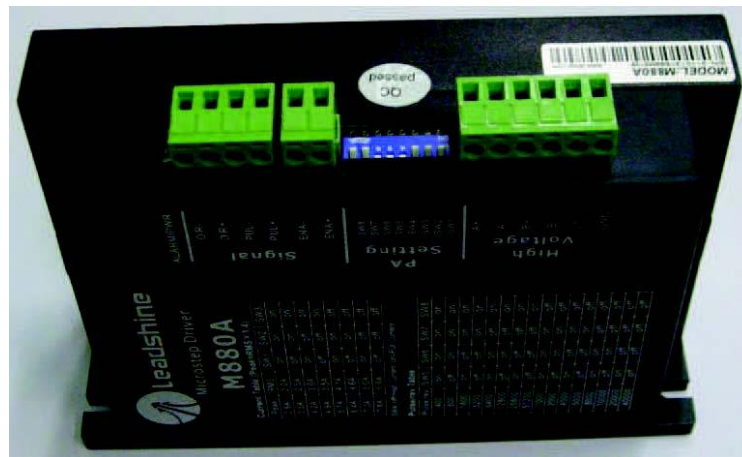
Ke spínání jednoho nebo dvou relé pro start plazmové řezačky a chlazení zdroje, popřípadě krokových motorů je určena samostatná deska (Obr. 33). Napájecí paměť je 5V ze základní desky a 12V po sepnutí relé. Spínané napětí je 230V AC, 12V DC. Proud je 16A/230V AC, 6A/12V DC. Spínané obvody jsou oddělené optočleny z důvodu ochrany portu LPT. Deska je osazena časovačem s obvodem NE555, který slouží ke generaci impulzů pro krokové motory. Motory se mohou ovládat manuálně bez použití PC. Frekvence impulzů ovlivňující rychlost otáčení motorů se reguluje trimrem.



Obr. 33. Deska spínání plazmy a dalších obvodů

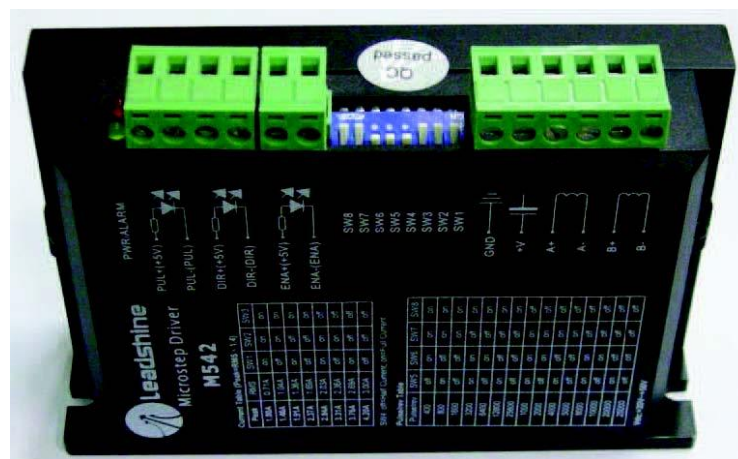
5.1.8 Drivery krokových motorů

K řízení krokových motorů pomocí PC se používá driver. Pro krokový motor HS45 osy X je driver M880A (Obr. 34). Tento driver obsahuje 16 volitelných rozlišení kroků a to až do 51200 kroků/ot s maximální vstupní frekvencí 300 kHz.



Obr. 34. Driver M880A

Vstupy jsou opticky izolované a driver je chráněn proti zkratu na výstupu. Dále je chráněn také proti podpětí a přepětí napájecího napětí. Je zde i funkce automatické redukce proudu po zastavení motoru. Driver M542 (Obr. 35) je určený pro krokové motory osy Y a Z, které mají menší proud protékající cívkou.



Obr. 35. Driver M542

5.1.9 Napájecí zdroj řídicí elektroniky

K napájení řídicí elektroniky slouží zdroj PS330/45 (Obr. 36). Napájecí zdroj poskytuje dva výstupní vzájemně galvanicky oddělené napětí, nestabilizované pro připojení driverů a stabilizované 12V/1A pro připojení oddělovací desky, ventilátoru a podobně. Zdroj se

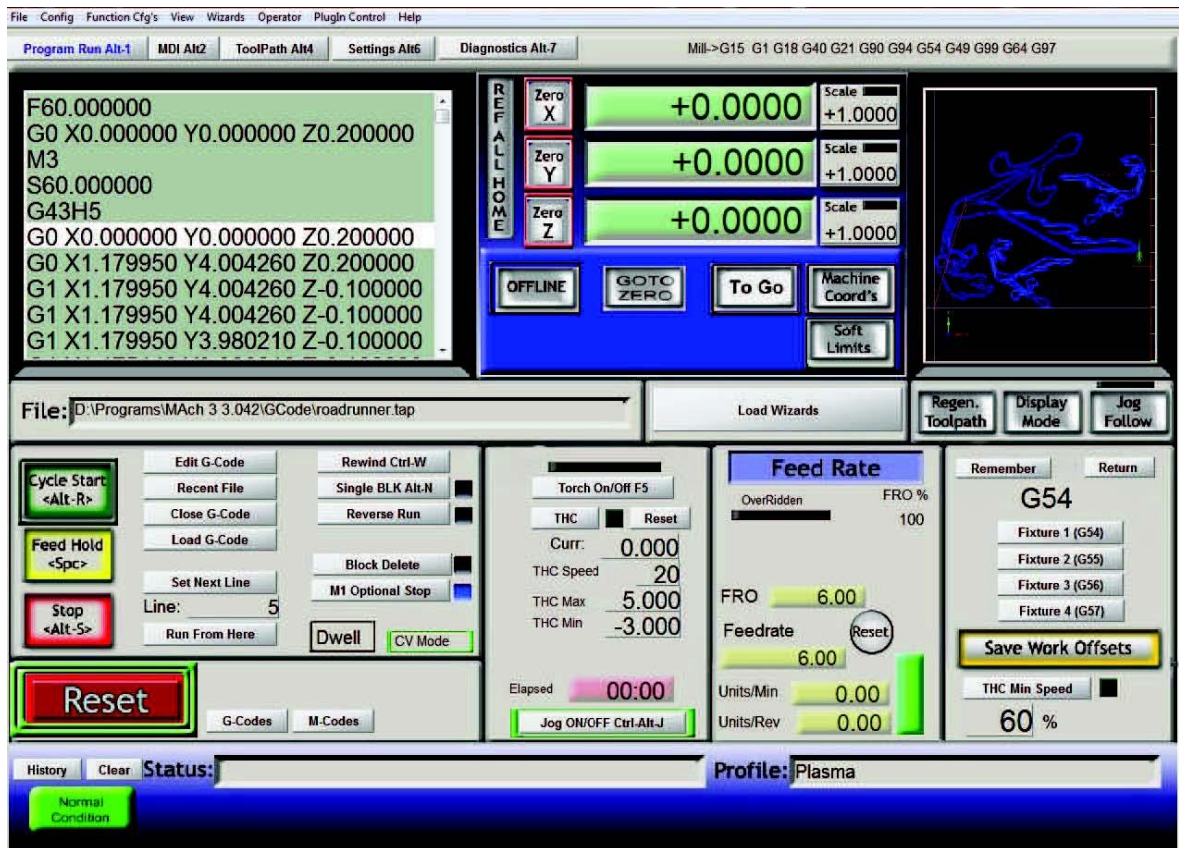
skládá z toroidního transformátoru a modulu zdroje. Na modulu jsou umístěny tři pojistky v pojistkových pouzdrech. Jedna síťová pojistka a dvě pojistky pro výstupní napětí. Obě výstupní napětí jsou signalizována LED diodami. Síťové i výstupní střídavé napětí transformátoru je odrušené fóliovými kondenzátory. Výstupní stejnoměrná napětí jsou blokována kombinací keramických a fóliových kondenzátorů.



Obr. 36. Zdroj PS330/45

5.1.10 MACH3 CONTROLLER

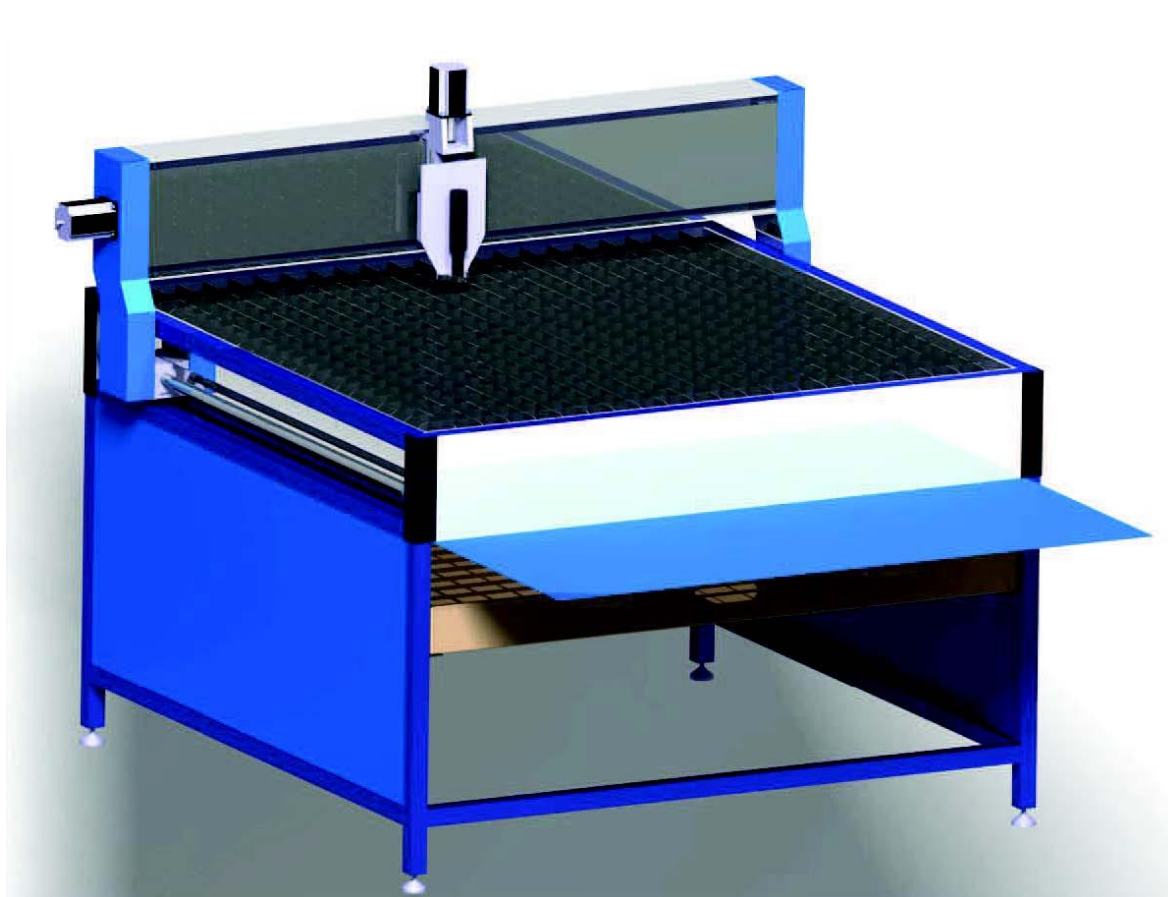
Řízení plazmové řezačky ovládá software Mach3 (Obr. 37) vytvořený společností ArtSoft. Komunikace s řídicí elektronikou probíhá pomocí pinů LPT. Port PC má 20 výstupních a 20 vstupních pinů. K dispozici jsou i funkce spínání zdroje plazmy, chlazení, odsávání a nastavení limitů posuvů včetně referenčního bodu. Software má implementovaný modul Plasma.



Obr. 37. Software Mach3

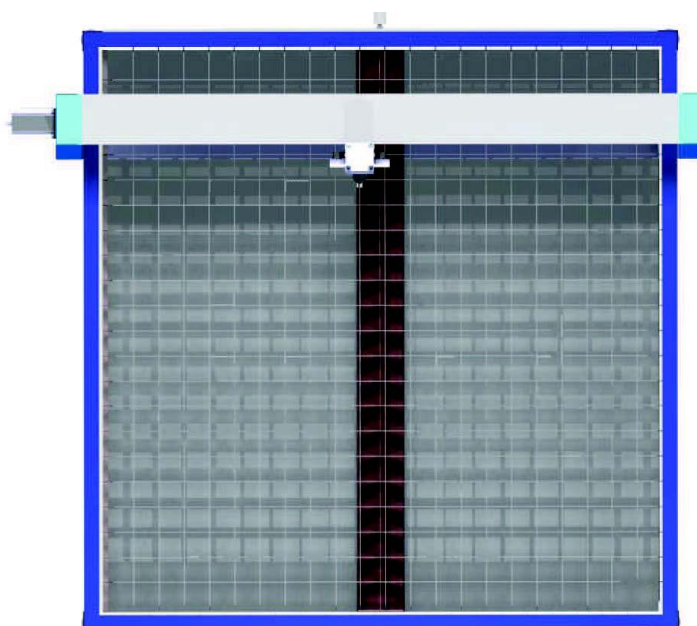
5.1.11 Krytování stroje

Stroj je vybavený kryty, které chrání prvky stroje před poškozením. Jde například o měděný kryt chránící kuličkový šroub posuvu osy X před opaly padající přes pracovní stůl do sběrače. (Obr. 38) K estetickému vzhledu stroje jsou použité plechy upevněné na bocích rámu stroje.



Obr. 38. Otevřený kryt pro vyjmutí sběrače

Pracovní plocha stroje je tvořená roštem (Obr. 39), který je vyrobený z jednotlivých pásů plechu. Tyto části roštu do sebe zapadají pomocí drážek a jsou i snadno vyměnitelné.



Obr. 39. Rošt

V současné době vývoj zařízení plazmového řezacího stroje (Obr. 40) je ve fázi rozpracovanosti. Všechny potřebné díly k montáži jsou zakoupeny, ale bohužel ekonomická situace brání jeho konečné kompletaci.



Obr. 40. Vývoj zařízení plazmového řezacího stroje

5.2 Materiál vzorků

Vzorky dělené plazmou byly zhotoveny z oceli 11 373. Ocel můžeme charakterizovat jako neušlechtilou konstrukční ocel obvyklé jakosti vhodnou ke svařování. Používá se převážně pro součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek namáhané staticky i mírně dynamicky. Patří mezi ně vtokové objekty vodních turbín, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a jezové konstrukce. Dále jsou to pak součásti svařované kovářsky.

Vzorky řezané laserem byly vyrobeny z oceli 11 600. Jedná se o neušlechtilou konstrukční ocel vhodnou na strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž se nevyžaduje svařitelnost. Používá se především pro součásti, které jsou vystavené velkému měrnému tlaku, jako jsou hřídele, ozubená kola, řetězová kola, páky, čepy, pístnice, kolíky, podpěry,

šrouby, matice, pera, klíny, spojky, distanční kroužky, upínací elementy, segmenty a vložky axiálních ložisek.

5.2.1 Chemické složení

Předepsané chemické složení (rozbor tavby) materiálů v procentech vyjadřuje Tab. 1.

Tab. 1. Chemické složení

Prvek Mat.	C	Mn	Si	P	S	N	Al
11 373	max. 0,170			max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007	
11 600				max. 0,045	max. 0,045	max. 0,009	

5.2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti jsou zaznamenány v Tab. 2.

Tab. 2. Mechanické vlastnosti

Materiál	Mechanické vlastnosti	Provedení	
		tepelně nezpracované	normalizačně zpracované
11 373	Pevnost v tahu R_m [MPa]	min. 370	min. 350
	Mez kluzu R_e [MPa]	min. 250	min. 220
	Tažnost A_{80} [%]	min. 7	min. 20
11 600	Pevnost v tahu R_m [MPa]	570-710	
	Mez kluzu R_e [MPa]	min. 325	
	Tažnost A_{80} [%]		

5.3 Příprava metalografických preparátů

Světelná mikroskopie patří sice mezi nejstarší metody hodnocení struktury kovů, ale i dodnes má stále největší vypovídající schopnost. Příprava metalografických preparátů má určitá pravidla a to především zajistit, aby se struktura vzorků v průběhu preparace nezměnila a aby nebyla jednotlivými operacemi ovlivněna.

Důležitá je také fáze přípravy vzorků a jejich odběry z výrobků, které mají být metalograficky posouzeny.

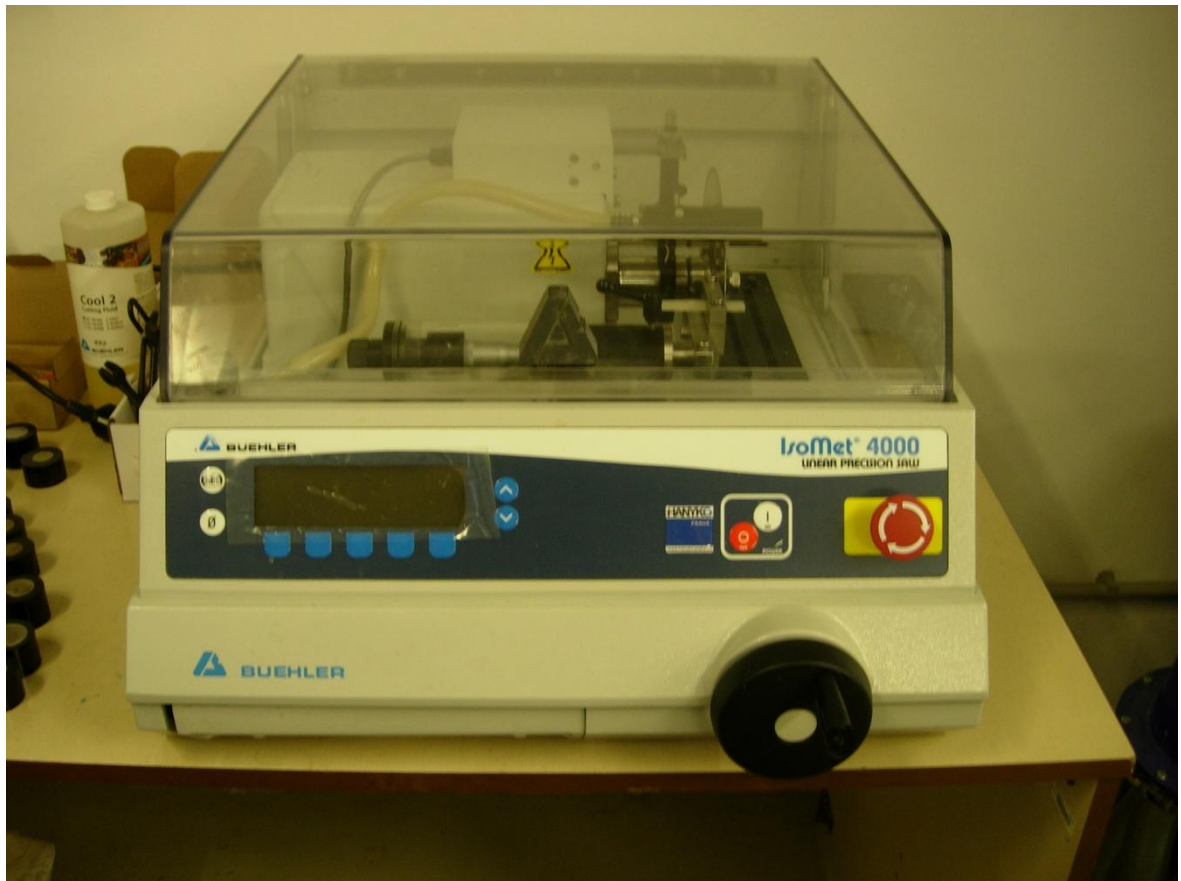
5.3.1 Odběr vzorků

Způsob a místo odběru vzorků bylo nutné pečlivě uvážit, protože na nich záleží objektivita posouzení struktury výrobku. Technologie oddělení vzorků od materiálu výrobků by mohlo strukturu částečně nebo zcela změnit. Bylo nezbytné držet se zásady, že vzorky se nesmí zahřát na teplotu případných fázových přeměn. Velikost vzorků byla závislá na rozměru komory lisu a použitého mikroskopu. Pro odběr vzorků bylo nutné dodržet následující zásady:

- odebírat z takového místa, aby bylo dosaženo věrného vystižení celkové struktury materiálu,
- respektovat směr toku materiálu,
- nezměnit strukturu materiálu.

5.3.2 Způsob odběru vzorků

Pro odběr vzorků byla použita metalografická rozbrušovací pila s diamantovým kotoučem Isomet 4000 (Obr. 38). Místo odběru bylo zvoleno v oblasti řezu, kde je patrné tepelné ovlivnění materiálu.



Obr. 41. Metalografická rozbrušovací pila Isomet 4000

5.3.3 Preparování vzorků

Do teplotní komůrky lisu Simplimet 1000 (Obr. 42) byly vloženy jednotlivé vzorky a zasypány pryskyřicí ve formě granulí značky Resin Powder.

Parametry preparace:

- teplota 100°C
- tlak 30 kN



Obr. 42. Lis Simplimet 1000

5.3.4 Značení vzorků

Každý vzorek byl označen číslem, které přesně identifikuje daný zalisovaný vzorek. Pro označení zalisovaných vzorků se použil nesmazatelný popisovač.

5.3.5 Broušení vzorků

Broušení vzorků bylo zhotoveno na vodou chlazené metalografické brusce, kde se postupně vyměňovaly brusné papíry s označením P 120 (velikost zrna 125-100 μm) až po brusný papír s označením P 600 (velikost zrna 15-10 μm). Při broušení se dávalo pozor, aby se vzorky při broušení nevyhřáli na vyšší teplotu. Všechny vzorky byly vybroušeny do dokonalé roviny s minimální povrchovou nerovností.

5.3.6 Leštění vzorků

Leštění vzorků bylo provedeno na leštičce BUEHLER EcoMet 250 PRO (Obr. 40). Vzorky byly leštěny v několika krocích, nejprve pomocí brousících kotoučů a s různými zrnitostmi

a následně doleštění vzorku bylo pomocí textilního plátka a diamantové suspenze s velikostí brousících zrn 3 μm .

Parametry leštění:

- přitlačná síla – 25 N,
- otáčky vzorků – 30 ot/min,
- otáčky plátka – 300 ot/min.



Obr. 43. Leštička BUEHLER EcoMet 205 PRO

5.3.7 Leptání vzorků

Povrch výbrusu vzorků byl plošně naleptán chemickým leptadlem Nital (3% roztok HNO_3 v etanolu), aby byla struktura materiálu co nejlépe zobrazena na metalografickém světelném mikroskopu. Pro pozorování byl použit metalografický světelný mikroskop NEOPHOT 21 v externí laboratoři ZPS Slévárna.

5.4 Instrumentovaná zkouška mikrotvrdomosti

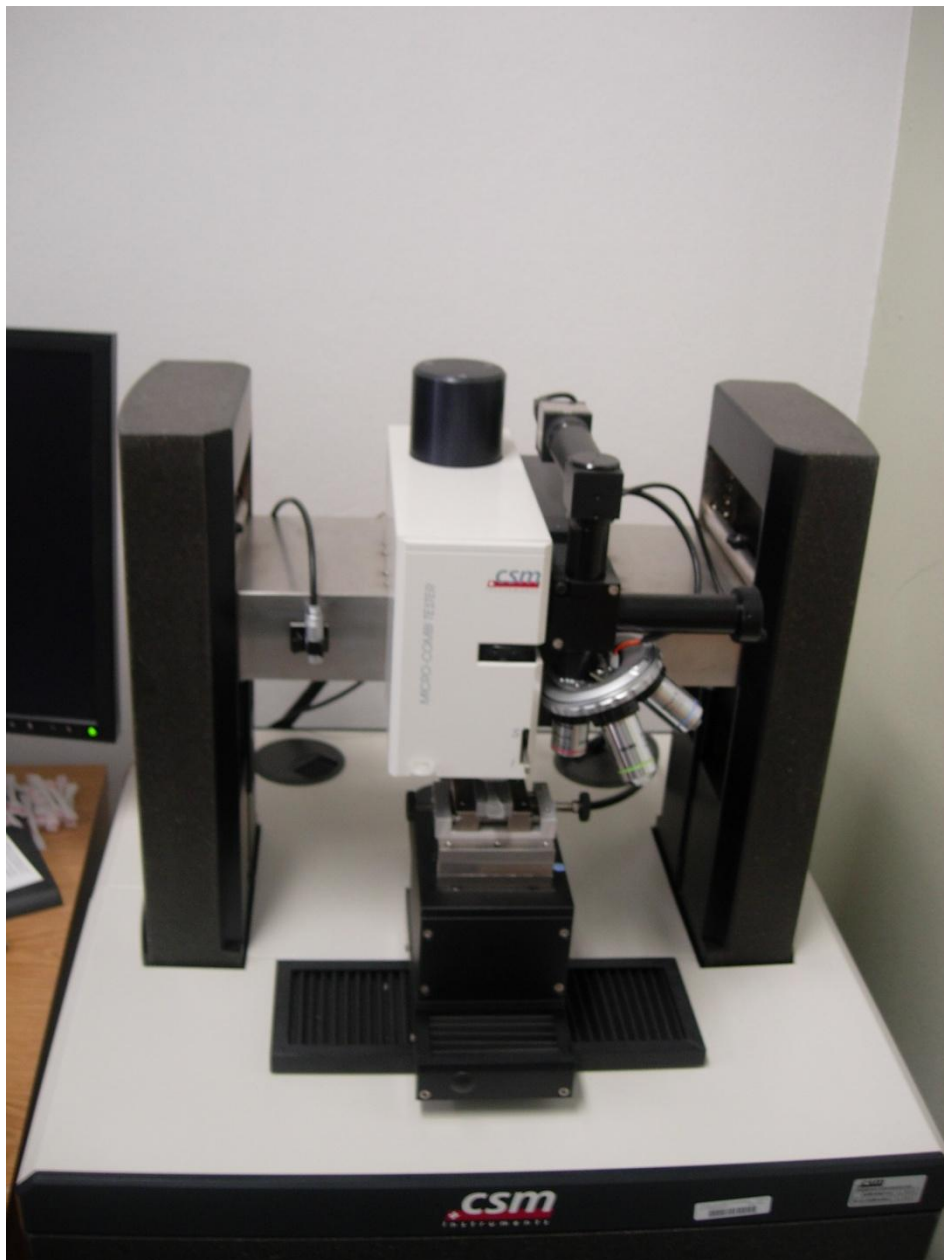
Měření instrumentované zkoušky mikrotvrdomosti bylo provedeno na přístroji Micro Combi Tester od společnosti CMS Instruments dle normy ČSN EN ISO 14577-1.

Zvolené parametry zkoušky:

- aplikované zatížení – 0,5 N,

- výdrž na maximální zatížení – 10 s,
- zatěžující a odtěžující rychlost – 1 N/min,
- Poissonovo číslo – 0,3.

Jako vnikající tělísko byl použit čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136° . Měření byla provedena metodou DSI a vyhodnocení mikro-mechanických vlastností bylo provedeno metodou Oliver & Pharr.



Obr. 44. Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester

5.5 Fáze a strukturní složky

Pomocí výsledných hodnot mikrotvrdomosti lze docela přesně identifikovat jednotlivé fáze a strukturní složky jako je železo, ferit, austenit, perlit, bainit a martenzit. Tyto složky a jejich tvrdost dle Vickerse zobrazuje Tab. 3.

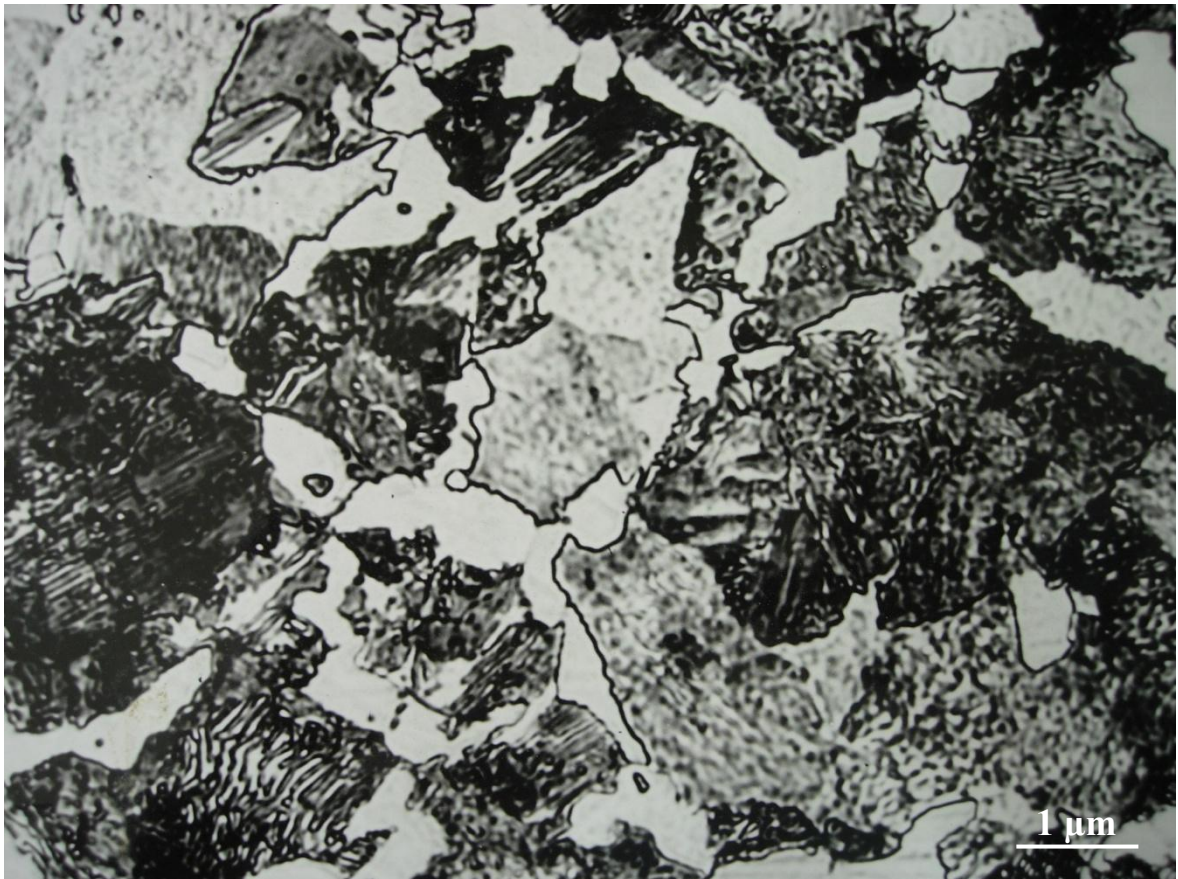
Tab. 3. Strukturní složky a tvrdost dle Vickerse

Fáze a strukturní složky	Tvrdost dle Vickerse
Fe	85
Ferit	85-130
Austenit	120-180
Austenit zpevněný	až 800
Perlit hrubý	200-250
Perlit jemný	250-300
Bainit horní	300-400
Bainit nízkouhlíkový	400-550
Martenzit nízkouhlíkový	600-700
Martenzit vysokouhlíkový	700-850

6 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

6.1 Hodnocení struktury výchozího materiálu

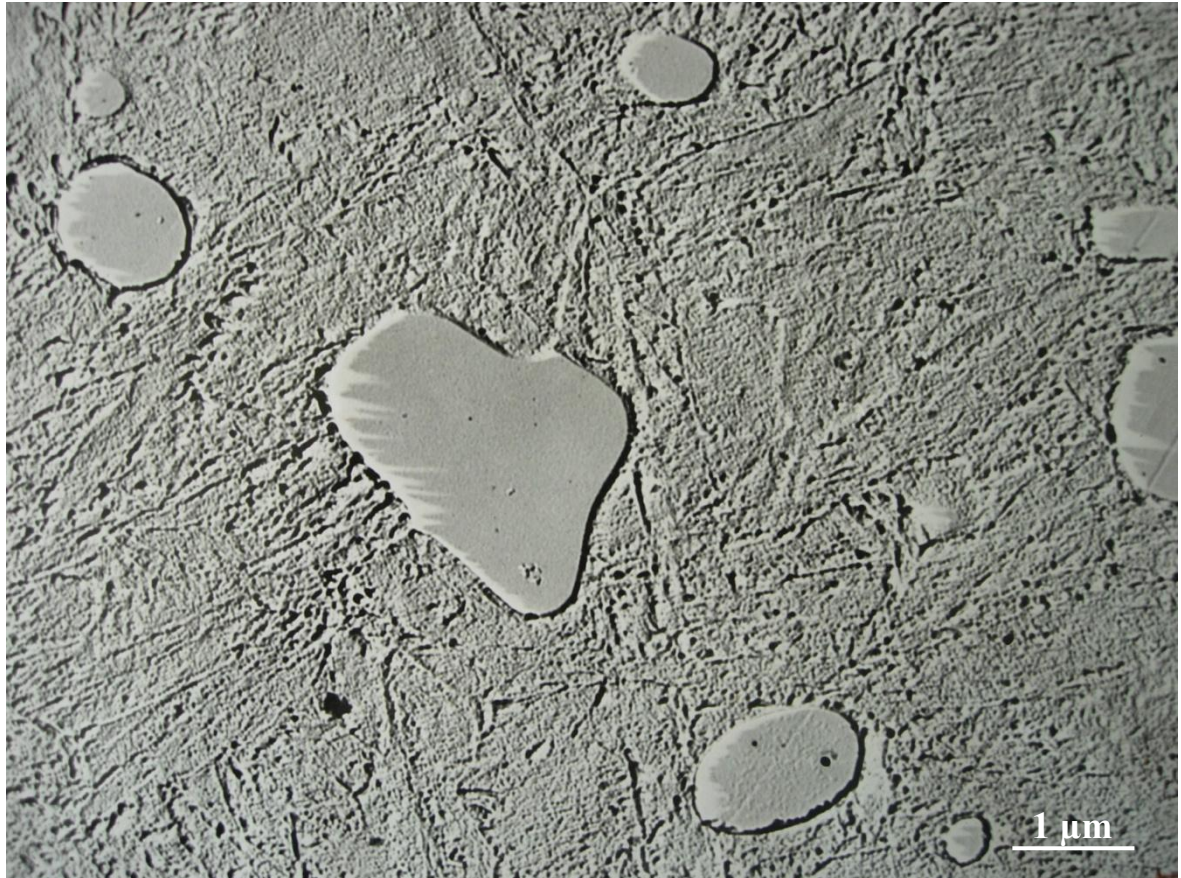
Nejprve byla zkoumána struktura výchozího materiálu před tepelným ovlivněním (zakalením). Na snímku (Obr. 45) byla zobrazena struktura laminárního a síťového perlitu. Perlit je eutektoid z feritu a cementitu, vylučovaných střídavě vedle sebe v podobě lamel.



Obr. 45. Feriticko-perlitická struktura

6.2 Hodnocení struktury materiálu po dělení

Potom byla pozorována struktura po tepelném ovlivnění (dělení plazmou). Feriticko-perlitická struktura se změnila v martenzitickou strukturu s eulidy (Obr. 46). Tmavé části zobrazují zbytkový austenit.



Obr. 46. Martenzitická struktura

6.3 Vyhodnocení měření mikrotvrlosti

Naměřené hodnoty mikrotvrlosti:

- vzorek č. 1 (Tab. 4)
- vzorek č. 2 (Tab. 5)
- vzorek č. 3 (Tab. 6)
- vzorek č. 4 (Tab. 7)
- vzorek č. 5 (Tab. 7)
- vzorek č. 6 (Tab. 9)

Tab. 4. Vzorek č. 1 - Hodnoty mikrotvrdomosti a vzdálenosti od povrchu

Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrdomost [HV]	Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrdomost [HV]
1	50	286,81	21	1050	199,37
2	100	250,3	22	1100	219,31
3	150	215,69	23	1150	192,15
4	200	207,86	24	1200	193,74
5	250	207,91	25	1250	207,26
6	300	208,95	26	1300	207,52
7	350	209,91	27	1350	214,9
8	400	231,29	28	1400	210,14
9	450	192,85	29	1450	203,74
10	500	187,06	30	1500	201,94
11	550	196,29	31	1550	188,56
12	600	188,13	32	1600	202,45
13	650	196,14	33	1650	183,07
14	700	201,65	34	1700	210,38
15	750	235,26	35	1750	200,83
16	800	207,43	36	1800	194,42
17	850	208,28	37	1850	204,16
18	900	203,44	38	1900	234,38
19	950	215,08	39	1950	216,97
20	1000	233,91	40	2000	207,58

Tab. 5. Vzorek č. 2 - Hodnoty mikrotvrlosti a vzdálenosti od povrchu

Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]	Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]
1	50	324,43	21	1050	274,54
2	100	299,76	22	1100	284,46
3	150	274,08	23	1150	301,61
4	200	279,58	24	1200	294,02
5	250	283,88	25	1250	301,12
6	300	291,93	26	1300	297,89
7	350	310,86	27	1350	308,58
8	400	299,95	28	1400	294,32
9	450	312,12	29	1450	311,18
10	500	313,23	30	1500	287,29
11	550	309,39	31	1550	296,16
12	600	286,2	32	1600	284,56
13	650	293,62	33	1650	285,04
14	700	309,93	34	1700	291,03
15	750	269,88	35	1750	300,33
16	800	285,38	36	1800	294,32
17	850	312,07	37	1850	286,67
18	900	296,26	38	1900	298,47
19	950	302,99	39	1950	307,87
20	1000	276,8	40	2000	325,54

Tab. 6. Vzorek č. 3 - Hodnoty mikrotvrdomosti a vzdálenosti od povrchu

Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrdomost [HV]	Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrdomost [HV]
1	50	467,07	21	1050	287,47
2	100	419,94	22	1100	279,09
3	150	330,9	23	1150	306,41
4	200	297,5	24	1200	313,49
5	250	278,86	25	1250	295,99
6	300	280,13	26	1300	301,54
7	350	294,76	27	1350	315,12
8	400	293,48	28	1400	307,63
9	450	301,34	29	1450	299,23
10	500	271,84	30	1500	285,74
11	550	299,02	31	1550	281,47
12	600	290,6	32	1600	293,11
13	650	292,4	33	1650	279,12
14	700	293,24	34	1700	271,18
15	750	302,67	35	1750	298,52
16	800	278,19	36	1800	264,69
17	850	304,93	37	1850	286,92
18	900	290,27	38	1900	287,47
19	950	308,71	39	1950	-
20	1000	289,9	40	2000	-

Tab. 7. Vzorek č. 4 - Hodnoty mikrotvrlosti a vzdálenosti od povrchu

Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]	Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]
1	50	520,89	11	550	232,95
2	100	335,37	12	600	220,01
3	150	267,93	13	650	209,49
4	200	242,21	14	700	227,36
5	250	226,09	15	750	235,08
6	300	242,21	16	800	231,97
7	350	237,53	17	850	233,53
8	400	219,91	18	900	229,86
9	450	214,96	19	950	231,14
10	500	216	20	1000	230,5

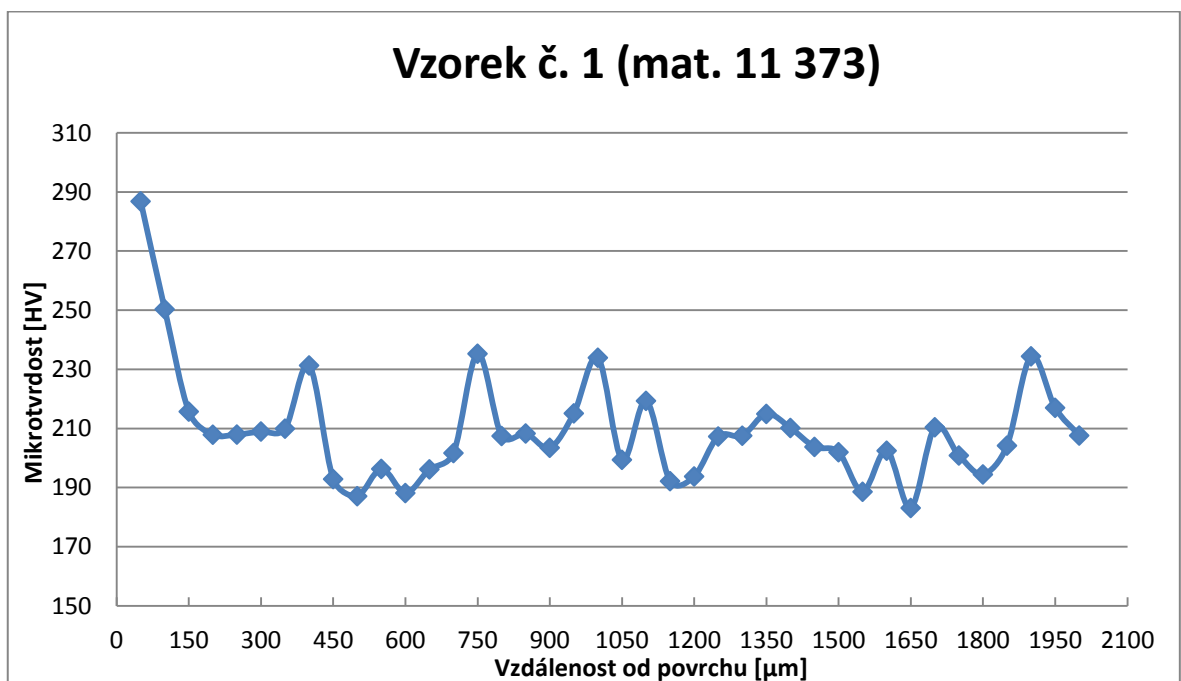
Tab. 8. Vzorek č. 5 - Hodnoty mikrotvrlosti a vzdálenosti od povrchu

Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]	Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]
1	50	594,26	11	550	225,57
2	100	342,35	12	600	229,78
3	150	297,92	13	650	227,77
4	200	257,49	14	700	235,99
5	250	219,75	15	750	255,88
6	300	242,04	16	800	245,77
7	350	253,41	17	850	240,96
8	400	279	18	900	241,5
9	450	231,25	19	950	244,86
10	500	243,63	20	1000	248,81

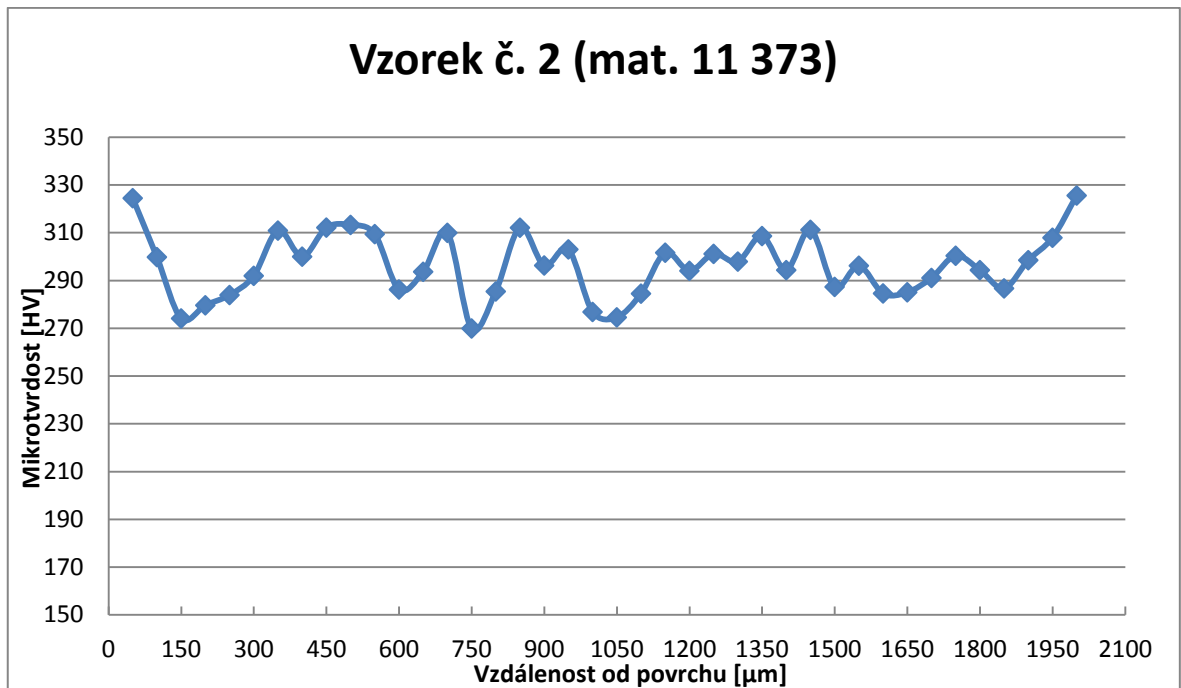
Tab. 9. Vzorek č. 6 - Hodnoty mikrotvrlosti a vzdálenosti od povrchu

Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]	Č. vtisku	Vzdálenost od povrchu [μm]	Mikrotvrlost [HV]
1	50	552,05	11	550	221,01
2	100	525,26	12	600	225,09
3	150	313,03	13	650	221,69
4	200	243,56	14	700	216,19
5	250	233,94	15	750	226,66
6	300	226,14	16	800	202,31
7	350	209,74	17	850	212,49
8	400	213,96	18	900	232,82
9	450	231,56	19	950	224,68
10	500	221,57	20	1000	224,68

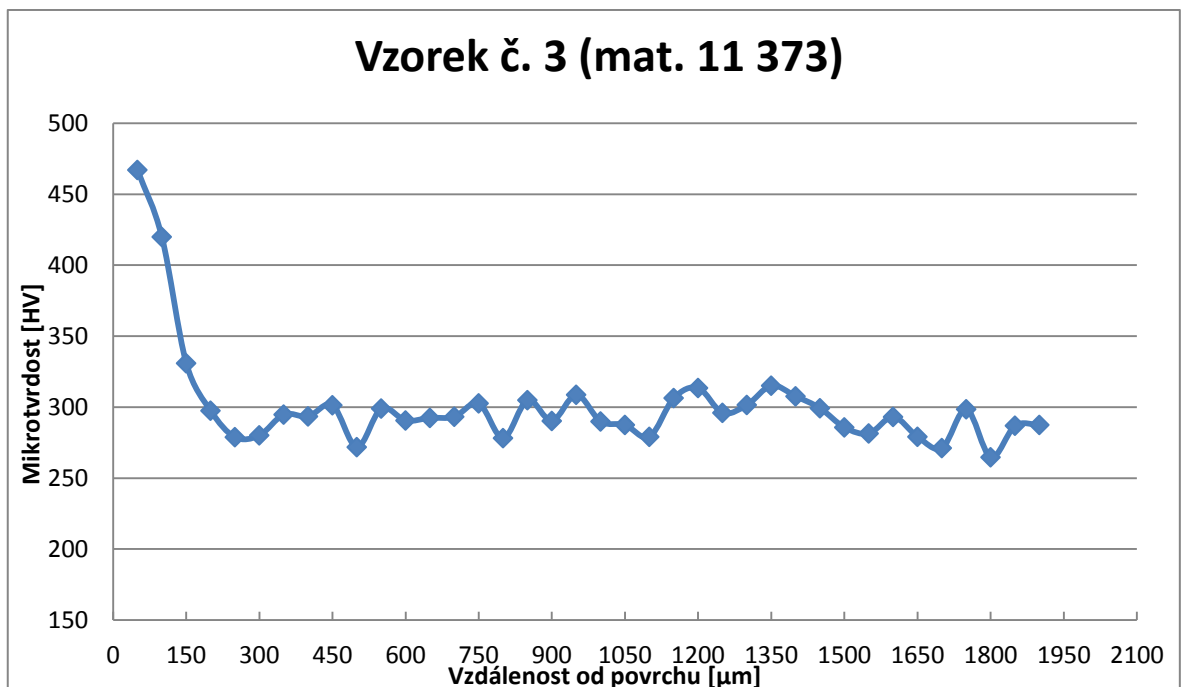
6.3.1 Grafické závislosti



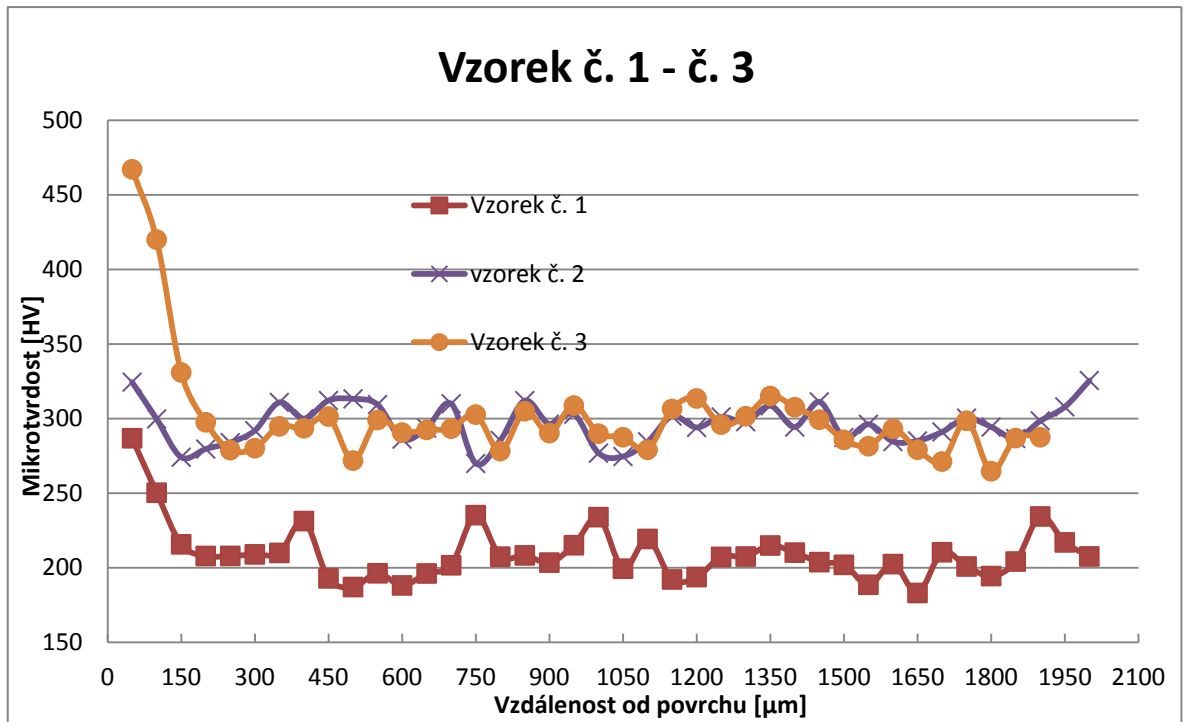
Obr. 47. Graf závislosti mikrotvrlosti na vzdálenosti od povrchu



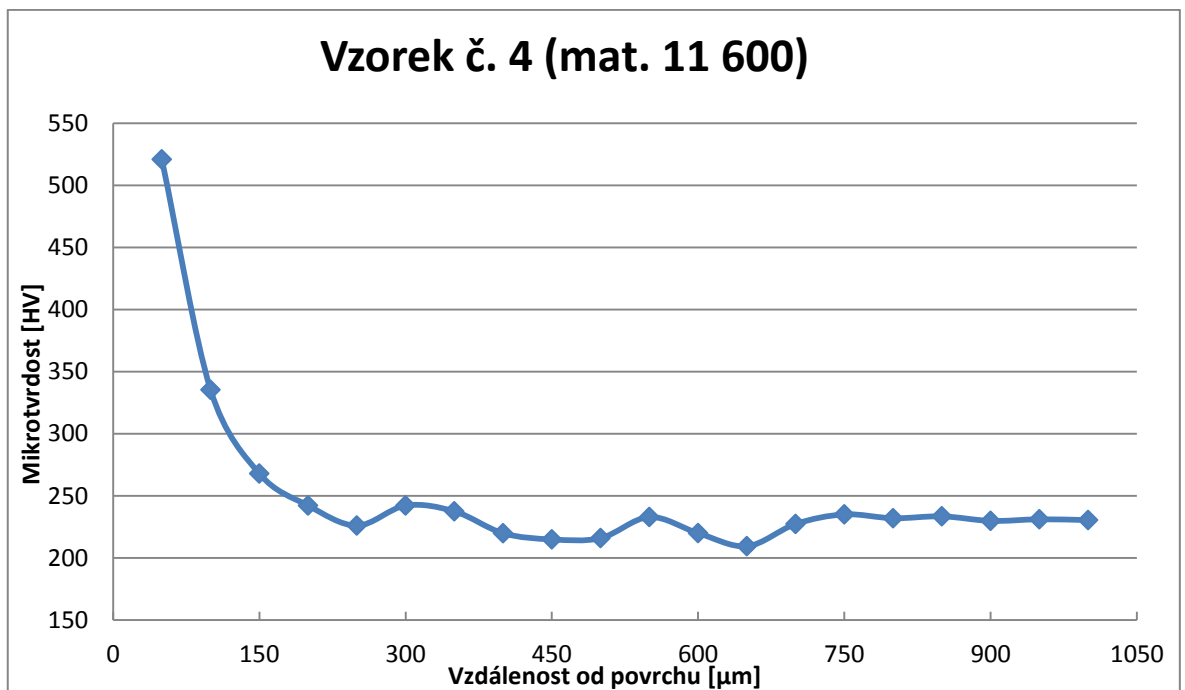
Obr. 48. Graf závislosti mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu



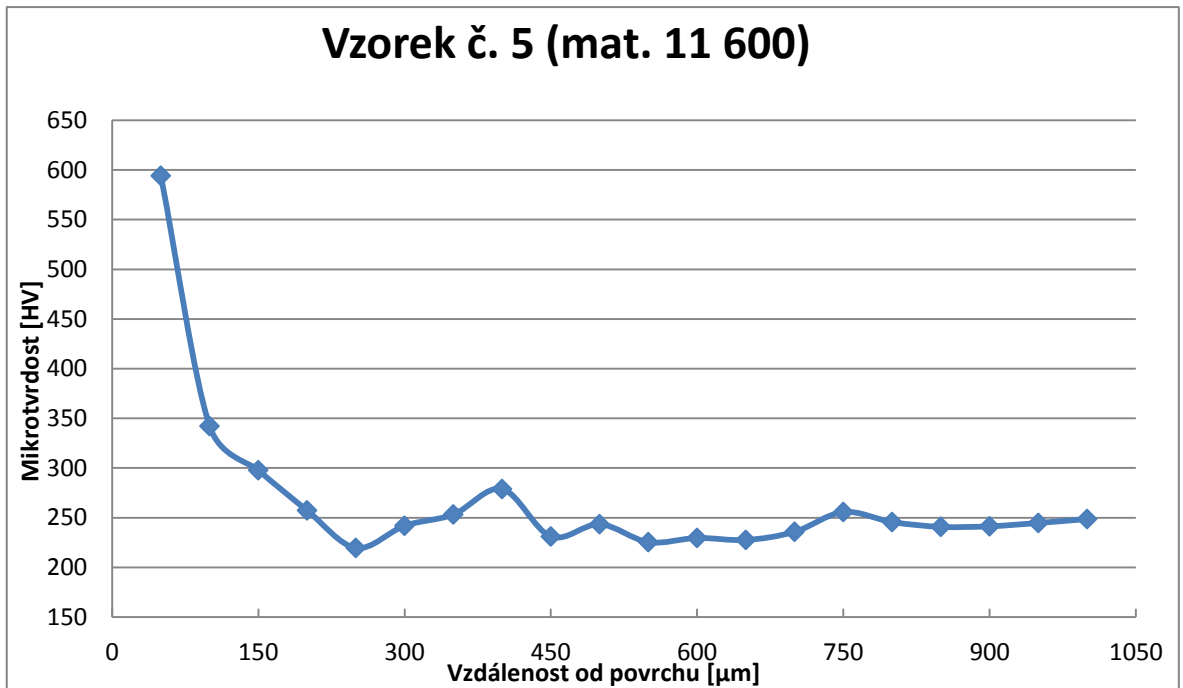
Obr. 49. Graf závislosti mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu



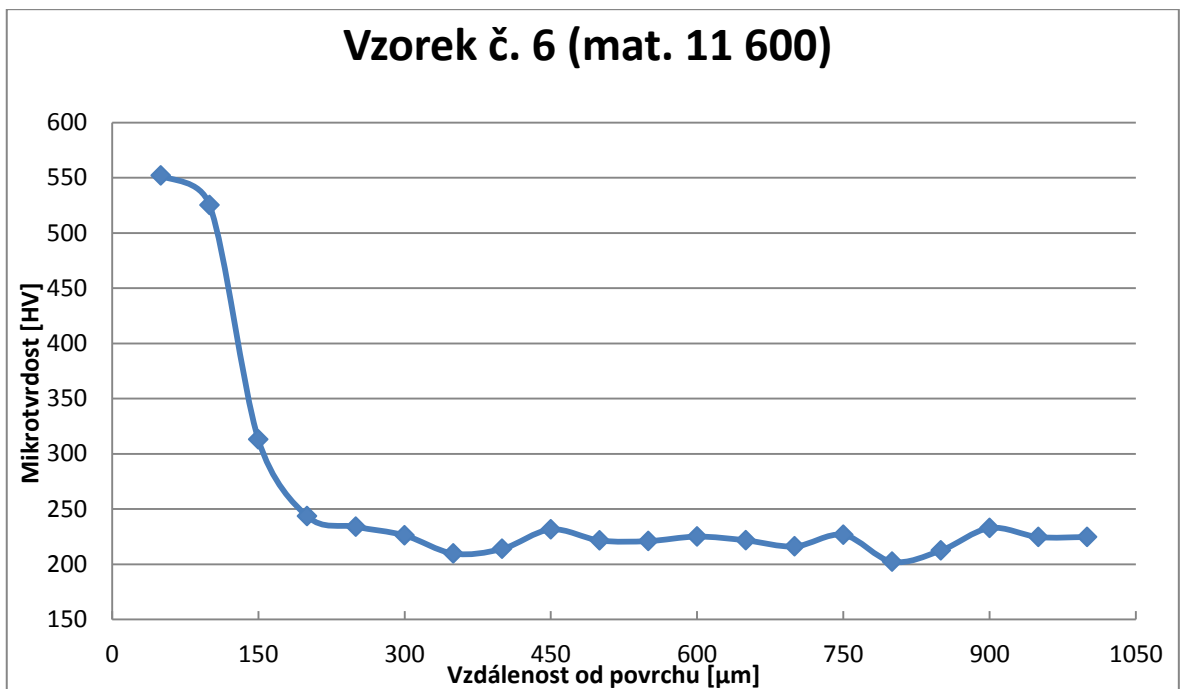
Obr. 50. Graf závislosti mikrotvrlosti na vzdálenosti od povrchu



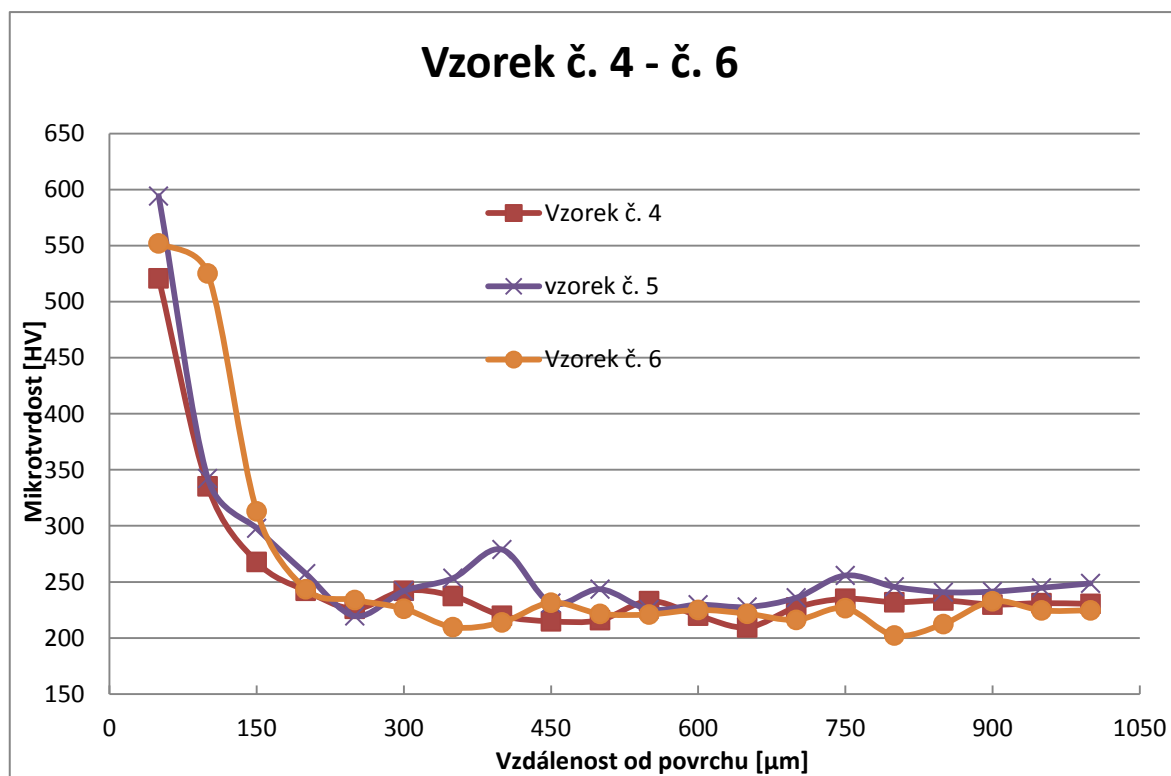
Obr. 51. Graf závislosti mikrotvrlosti na vzdálenosti od povrchu



Obr. 52. Graf závislosti mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu



Obr. 53. Graf závislosti mikrotvrdości na vzdálenosti od povrchu



Obr. 54. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenosti od povrchu

ZÁVĚR

Vzhledem k tomu, že nebyla z ekonomických důvodů dokončena montáž plazmového řezacího stroje a nebylo tak možné uvést stroj do provozu v požadovaném termínu, musely se požádat o pomoc externí společnosti, které nám pro tento experiment poskytly zbytky materiálů pro naše vzorky. Vzorky dělené plazmou byly z materiálu 11 373 a vzorky řezané laserem z materiálu 11 600.

Při řezání plazmou byla teplota řezání 20 000 °C s konstantním výkonem. Vzorky materiálu měly různé tloušťky (25, 15 a 6 mm). Takto zhotovené vzorky byly následně vybroušeny a připraveny na zkoušku mikrotvrdomosti. Z naměřených výsledků lze konstatovat, že tloušťka materiálu ovlivňuje odvod tepla a tím pádem i změnu povrchové vrstvy. Z grafu (Obr. 50) vyplynulo, že nejvíce byl zakalen vzorek č. 3 o tloušťce 6 mm, který dosahoval tvrdosti ve vzdálenosti 50 µm od povrchu 467,07 HV. Odhadovaná maximální mikrotvrdomost v místě řezu by byla až 500 HV. Toto byl jasný důkaz, že tento povrch vzorku byl nejvíce tepelně ovlivněn. Naopak u vzorku č. 1 s tloušťkou stěny 25 mm by byla odhadovaná mikrotvrdomost jen 310 HV, protože u této tloušťky materiálu už nedochází k takovému zakalení povrchu. Všechny tři vzorky dosahovaly zvýšené mikrotvrdomosti přibližně ve vzdálenosti 150 – 200 µm od povrchu. V delší vzdálenosti od povrchu už materiál není ovlivněn zakalením a hodnoty se pohybují v průměru kolem 280 HV s výjimkou vzorku č. 1.

Parametry dělení u laseru byly zvoleny dle tabulkových hodnot stroje. Při řezání se po jednotlivých vzorcích měnil výkon laseru (1000, 1600 a 2200 W). Vzorky byly vybroušeny a připraveny na zkoušku mikrotvrdomosti. Z grafu (Obr. 54) vyplynulo, že u vzorku č. 4 došlo k zakalení povrchu materiálu na hodnotu 520,89 HV ve vzdálenosti 50 µm od povrchu. U vzorku č. 5 došlo ve stejné vzdálenosti od povrchu k zakalení materiálu na hodnotu 594,26 HV a u vzorku č. 6 se zakalil povrch materiálu na hodnotu 552,05 HV. Všechny tři vzorky dosahovaly zvýšené mikrotvrdomosti ve vzdálenosti 200 – 250 µm od povrchu. Tento experiment bohužel nepotvrdil teoretickou zásadu, že při zvýšení výkonu stroje, dojde k většímu zakalení a tím pádem ke zvýšení mikrotvrdomosti na povrchu materiálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [3] ČSN EN ISO 6508-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda (stupnice A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [4] HOLEŠOVSKÝ, F. a MÁDL, J.: *Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností*. UJEP Ústí nad Labem. 2008.
- [5] JECHAN, J.: *Řezání plechů CO₂ laserem na zařízeních Trumatic*. In Sborník referátů – Mladá Boleslav 28. – 29. 5. 1986 „Průmyslové aplikace laserů“. Dům techniky ČSVTS Pardubice.
- [6] KARAFIÁTOVÁ, S. a LANGER, I.: *Nekonvenční technologie*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: nakladatelství FRAGMENT, 1998. ISBN 80-7200-296-1.
- [7] *Laserové dělení materiálu* [online]. [cit. 2014-1-15]. Dostupný z WWW: <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>
- [8] LUKOVICS, I.: *Konstrukční materiály a technologie*. VUT Brno. 1990. ISBN 80-214-0399-3.
- [9] MAKOVEC, M.: Uplatnění nekonvenčních metod pro opracování těžkoobrobitelných materiálů. In Sborník referátů „Progresivní a nekonvenční technologie obrábění“. Dům techniky ČSVTS Praha, 1987.
- [20] MAŇKOVÁ, I.: *Progresivné technológie*. Vienala Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430-4.
- [31] MILIKIČ, D.: *Nekonvenacionalni postupci obrate*. Sremska Kamenica, Novi Sad. 2002.
- [42] MORÁVEK, R.: *Nekonvenční metody obrábění*. Západočeská Univerzita. 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [53] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. [cit. 2014-1-15]. Dostupný z WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenčni-metody-obrabeni-8-díl.html>
- [64] POWEL, J.: *CO₂ Laser Cutting*. Plenum Press. New York 1993.

- [75] PTÁČEK, L. aj.: *Nauka o materiálu*. CERM Brno, 2005. ISBN 80-7204-193-2.
- [86] *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem* [online]. [cit. 2014-1-15]. Dostupný z WWW: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>.
- [97] *Trendy tepelného dělení materiálů* [online]. [cit. 2014-1-15]. Dostupný z WWW: <http://www.airliquide.cz/cs/tisko/odborne-publikace/lanky.html>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PVC	Polyvinylchlorid
ISO	Mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem
PC	Osobní počítač
LPT	Paralelní port
E - Stop	Bezpečnostní tlačítko
DPS	Deska plošných spojů
STEP	Krok
DIR	Směr
LED	Polovodičový světelný zdroj
DSI	Metoda hloubkového snímání

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Porovnání charakteristik hořlavých plynů [17]</i>	15
<i>Obr. 2. Řezací hlavice [5]</i>	17
<i>Obr. 3. Schéma principu řezání čistým vodním paprskem [12]</i>	23
<i>Obr. 4. Schéma principu řezání vodním paprskem s příměsí abraziva [6]</i>	24
<i>Obr. 5. Transferovaný oblouk [10]</i>	28
<i>Obr. 6. Netransferovaný oblouk [10]</i>	29
<i>Obr. 7. Stabilizace plazmového oblouku vodou [10]</i>	30
<i>Obr. 8. Míra tepelného ovlivnění pro různé dělení materiálů [8]</i>	32
<i>Obr. 9. Princip zkoušky [1]</i>	34
<i>Obr. 10. Princip zkoušky [2]</i>	35
<i>Obr. 11. Princip zkoušky (kužel)</i>	36
<i>Obr. 12. Vtisk podle metody Vickerse</i>	37
<i>Obr. 13 Vtisk podle metody Knoop</i>	37
<i>Obr. 14. Ukázka měření zbytkových napětí [4]</i>	41
<i>Obr. 15. První část rámu</i>	48
<i>Obr. 16. První část rámu</i>	48
<i>Obr. 17. Druhá a třetí část rámu</i>	49
<i>Obr. 18. Vodící tyče W20</i>	49
<i>Obr. 19. Linearset SMA20L</i>	50
<i>Obr. 20. Úchyt SHF20</i>	50
<i>Obr. 21. Vedení osy X</i>	50
<i>Obr. 22. Vedení osy Y</i>	51
<i>Obr. 23. Linearset SMA16</i>	51
<i>Obr. 24. Vedení osy Z</i>	52
<i>Obr. 25. Lineární modul osy Z AUROL</i>	52
<i>Obr. 26. Kuličkové šrouby</i>	53
<i>Obr. 27. Posuv osy X</i>	53
<i>Obr. 28. Krokový motor 86HS45 a spojka LK25C</i>	54
<i>Obr. 29. Posuv osy Y</i>	54
<i>Obr. 30. Posuv osy Z</i>	55
<i>Obr. 31. Telwin Tecnica plazma 41</i>	56
<i>Obr. 32. Vstupní deska s optickým oddělením</i>	57

<i>Obr. 33. Deska spínání plazmy a dalších obvodů.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 34. Driver M880A.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35. Driver M542</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 36. Zdroj PS330/45.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37. Software Mach3.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 38. Otevřený kryt pro vyjmutí sběrače</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 39. Rošt.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 40. Vývoj zařízení plazmového řezacího stroje</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 41. Metalografická rozbrušovací pila Isomet 4000.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 42. Lis Simlimet 1000</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 43. Leštička BUEHLER EcoMet 205 PRO.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 44. Mikrotvrdoměr – Micro Combi Tester</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45. Feriticko-perlitická struktura</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 46. Martenzitická struktura</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 47. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 48. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 49. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 50. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 51. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 52. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 53. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 54. Graf závislosti mikrotvrdosti na vzdálenost od povrchu</i>	<i>80</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Chemické složení</i>	63
<i>Tab. 2. Mechanické vlastnosti.....</i>	63
<i>Tab. 3. Strukturní složky a tvrdost dle Vickerse</i>	69
<i>Tab. 4. Vzorek č. 1 - Hodnoty mikrotvrdosti a vzdálenosti od povrchu.....</i>	72
<i>Tab. 5. Vzorek č. 2 - Hodnoty mikrotvrdosti a vzdálenosti od povrchu.....</i>	73
<i>Tab. 6. Vzorek č. 3 - Hodnoty mikrotvrdosti a vzdálenosti od povrchu.....</i>	74
<i>Tab. 7. Vzorek č. 4 - Hodnoty mikrotvrdosti a vzdálenosti od povrchu.....</i>	75
<i>Tab. 8. Vzorek č. 5 - Hodnoty mikrotvrdosti a vzdálenosti od povrchu.....</i>	75
<i>Tab. 9. Vzorek č. 6 - Hodnoty mikrotvrdosti a vzdálenosti od povrchu.....</i>	76