

Vliv technologických podmínek na jakost povrchu při WEDM

Bc. Petr Hvězda

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

nascannované zadání s. 2

*** naskenované Prohlášení str. 1***

*** naskenované Prohlášení str. 2***

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá nekonvenčními metodami obrábění, zvláště pak metodou WEDM, neboli obrábění drátovou elektrodou, dále pak jakostí povrchu a způsoby jejího měření. V praktické části pak zjišťuje vlivy technologických podmínek na jakost obrobené plochy a hledá nejvhodnější nastavení parametrů obrábění pro konkrétní případy

Klíčová slova: Nekonenční metody obrábění, WEDM, programování, jakost povrchu.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the non-conventional machining technologies, especially by the method WEDM, in other words a machining by wire electrode. The thesis also deals with the quality of the surface and methods of its measurement. In the practical part of the thesis are detected influences of technological conditions on the quality of the machined surface and it looks for the most suitable setting of machining parameters for specific cases.

Keywords: Non-Conventional Machining Technologies, WEDM, Programming, Quality of the Surface.

Poděkování:

Děkuji vedoucímu panu Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za odborné vedení a za jeho věcné připomínky k vypracované diplomové práci.

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

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně
.....

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	12
1.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění podle využívaného fyzikálního principu	13
1.2 MECHANICKÝ PRINCIP ÚBĚRU MATERIÁLU	14
1.2.1 Obrábění ultrazvukem USM	14
1.2.2 Obrábění proudem brusiva AJM, AFM	15
1.2.3 Obrábění vodním paprskem WJM, AWJM	16
1.3 CHEMICKÉ PROCESY	17
1.3.1 Chemické obrábění CM	17
1.3.2 Fotochemické obrábění PCM.....	17
1.4 ELEKTROCHEMICKÉ A ELEKTRICKÉ PROCESY.....	18
1.4.1 Elektrochemické obrábění ECM	18
1.4.2 Elektromechanické obrábění ECG	18
1.5 ELEKTROTEPELNÉ A TEPELNÉ PROCESY	19
1.5.1 Obrábění paprskem koncentrované energie	19
1.5.1.1 Obrábění paprskem laseru.....	19
1.5.1.2 Obrábění elektronovým paprskem EBM	20
1.5.1.3 Obrábění iontovým paprskem IBM	21
1.5.1.4 Obrábění paprskem plazmy PAM.....	22
1.5.2 Elektroerozivní obrábění EDM	23
1.6 ŘEZÁNÍ DRÁTOVOU ELEKTRODOU WEDM.....	23
1.6.1 Rozdělení strojů WEDM.....	28
1.6.2 Popis drátové rezačky.....	29
2 PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ	31
2.1 TVORBA PROGRAMU.....	31
2.1.1 Absolutní programování.....	31
2.1.2 Příkladové programování	31
2.1.3 Programování konturové	32
2.1.4 Ruční programování	32
2.1.5 Strojní programování.....	32
2.1.6 Programování dílenské.....	33
2.2 STRUKTURA PROGRAMU	33
2.3 PROGRAMOVÁNÍ – POUŽITÍ NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH FUNKCÍ G, M.....	35
2.3.1 Obrábění v rovinách souřadnicové soustavy.....	36
3 JAKOST POVRCHU	37

3.1	PROFIL NEROVNOSTI POVRCHU	37
3.2	FILTRY PROFILU	39
3.3	PARAMETRY STRUKTURY POVRCHU	39
3.3.1	Výškové parametry	40
3.3.2	Délkové parametry	41
3.3.3	Tvarové parametry	42
3.3.4	Křivky a odpovídající parametry	42
3.4	PRAVIDLA PRO HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU	42
3.4.1	Uplatnění „pravidla 16 %“	42
3.4.2	Uplatnění „pravidla maxima“	42
3.5	OZNAČOVÁNÍ STRUKTURY POVRCHU V TECHNICKÉ DOKUMENTACI.....	43
3.6	MĚŘENÍ PARAMETRŮ STRUKTURY POVRCHU	44
3.6.1	Princip měření struktury povrchu dotykovými profilometry (dotykovými hrotovými přístroji).....	44
3.6.2	Další metody měření struktury povrchu	46
4	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRÁCE	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
5	VÝZNAM PRAKTICKÉ ČÁSTI PRO TECHNICKOU PRAXI.....	52
6	TECHNICKÉ A MATERIÁLOVÉ ZABEZPEČENÍ	53
6.1	AGIE AGIECUT EXCELLENCE 2	53
6.2	TYPY DRÁTOVÝCH ELEKTROD	54
6.2.1	Mosazný drát BercoCut Pro H CuZn37	54
6.2.2	Povlakovaný rychlořezný drát CobraCut A.....	55
6.3	MATERIÁL VZORKŮ	55
6.4	DRSNOMĚR MITUTOYO	55
7	VÝROBA VZORKŮ	57
7.1	TVORBA V POUŽITÝCH PROGRAMECH.....	57
7.2	PRÁCE NA DRÁTOVÉ ŘEZAČCE AGIECUT EXCELLENCE 2.....	58
7.2.1	Samotná výroba jednotlivých vzorků.....	61
8	MĚŘENÍ DRSNOSTI	67
8.1	MĚŘENÍ VZORKŮ	69
9	SHRNUTÍ A URČENÍ VHODNÝCH PODMÍNEK	82
	ZÁVĚR	84
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	85
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	87
	SEZNAM OBRÁZKŮ	89
	SEZNAM TABULEK.....	92
	SEZNAM PŘÍLOH.....	93

ÚVOD

Stále větší uplatnění nekonvenčních metod úběru materiálu na úkor klasických obráběcích metod, vyplývá ze stále se zvyšujících nároků na rychlost, přesnost a celkově kvalitu hotového výrobku. Význam těchto metod stále roste, jelikož je možné dosahovat vysoké přesnosti, které by jinými metodami nešlo dosáhnout, jako např. u WEDM, kde jeho zavedení do výrobních procesů znamenalo významný pokrok ve výrobě lisovacích a střížných nástrojů.

Metoda WEDM patří do nekonvenčních metod obrábění, konkrétně elektrotepelných metod úběru materiálu. Tato metoda bude více přiblížena v následující práci, kde bude detailně popsán její princip úběru materiálu. Dále budou také popsány a rozděleny ostatní nekonvenční metody úběru materiálu.

Praktická část se věnuje vlivům technologických podmínek na jakost povrchu při WEDM, pro konkrétní případ z praxe. Hledají se nejvhodnější podmínky obrábění na zkušebních vzorcích tak, aby bylo dosaženo požadované kvality povrchu. Povrchy vzorků jsou měřeny v dílnách univerzity na dotykovém profilometru. Výsledky jsou shrnuty, vyhodnoceny a je určen nejvhodnější postup pro daný případ.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Obrábění můžeme rozdělit na mechanické metody odstraňování materiálu soustružením, frézováním, broušením atd., dále pak nekonvenční metody a jejich kombinace. Základní rozdělení viz. tab. 1.

Tab. 1. Klasifikace procesu obrábění

Obrábění		
Řezání	Broušení	Netradiční / progresivní metody obrábění.
Nástroje s definovanou geometrií.	Nástroje s nedefinovanou geometrií.	
Rotační plochy	S vázaným brusivem	Mechanické
• soustružení	• broušení	• vodní paprsek
• vrtání	• honování	• ultrazvuk
• vyvrtávání	• superfinišování	• abrazivní paprsek
• ...	• ...	Chemické
Tvarové a rovinné plochy	S volným brusivem	Elektrochemické
• frézování	• lapování	Elektrotepelné
• hoblování	• leštění	• elektroerozivní
• obrážení	• omílání	• laserový paprsek
• protahování	• abrazivní paprsek	• elektronový paprsek
• výroba ozubených kol	• ultrazvuk	• iontový paprsek
• výroba závitů	• ...	• plazmový paprsek
• ...		

Nekonvenční metody obrábění se vyznačují tím, že pro úběr materiálu používají jiné formy energie než mechanické. Využívá energii chemickou, fyzikální elektrickou i jejich kombinace. Nebo jsou také používány v kombinaci s klasickými metodami. Další odlišností je, že v místě řezu nevzniká řezný odpor a k oddělení materiálu dochází jednorázově. Povrch materiálu není deformován nástrojem, tudíž nedochází k změně jeho struktury, jak tomu je u metod konvenčních – klasických. V porovnání s klasickými metodami zde nehrají roli pojmy jako je obrobitelnost, houževnatost, pevnost, tvrdost atd. Nevýhodou ovšem je značná ekonomická náročnost v porovnání s metodami klasickými.

Nekonvenční metody jsou uplatňovány stále více a to zejména tam, kde nelze použít metody klasické. A to z důvodu, že by to technicky bylo obtížně proveditelné anebo kvůli materiálovým vlastnostem – těžko obrobitelné materiály. Dalším faktorem uplatnění

nekonvenčních metod, je dosažení vysoké kvality výsledného výrobku, ať už rozměrového nebo jakosti povrchu. [1, 2]

1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Jednotlivé nekonvenční metody se odlišují zejména dle fyzikálních účinků použitých pro obrábění. Níže je rámcové rozdělení NMO na základě využívaného principu nebo způsobu využití energie. Uvedené názvy jsou běžně používány v praxi.

NMO s elektro-tepelným principem využívá převážně teplo pro řízení odtavování materiálu. Elektromechanické obrábění kovů je založeno na intenzivní elektrolýze známé z galvanických procesů. S ohledem na přímé působení elektrického proudu na úběr materiálu zahrnujeme elektroerozivní elektromechanické obrábění pod společný název elektrické metody obrábění.

Podstatou NMO s chemickým principem je přímé využití chemických reakcí pro obrábění (chemické obrábění a termické odstraňování otřepů).

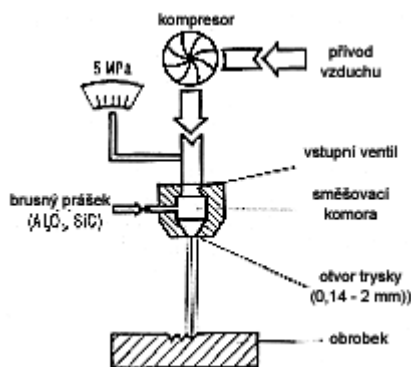
Mechanické (abrazivní) metody obrábění jsou založeny na stimulaci abrazivních nebo erozivních účinků vhodných látek, např. brusiv a kapalin. [2]

1.1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění podle využívaného fyzikálního principu

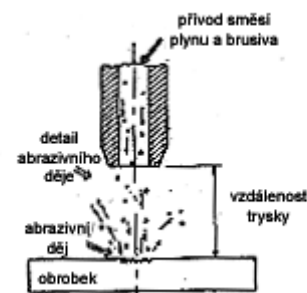
- Elektrotepelné a tepelné procesy
 - Elektroerozivní obrábění EDM
 - Obrábění paprskem koncentrované energie
 - A. Obrábění paprskem laseru LBM
 - B. Obrábění elektronovým paprskem EBM
 - C. Obrábění iontovým paprskem IBM
 - D. Obrábění paprskem plazmy PAM
- Elektrochemické a elektrické procesy
 - A. Elektrochemické obrábění ECM
 - B. Elektromechanické broušení ECG

1.2.2 Obrábění proudem brusiva AJM, AFM

AJM je opracování povrchu mechanickým nárazem částic, kde k úběru materiálu dochází po dopadu vysokorychlostního proudu abrazivních částic. Tato metoda využívá stlačený plyn, nejčastěji vzduch pro urychlení proudu částic brusiva. Rychlost paprsku je mezi 150-300 m/s. Je využíván pro obrábění těžko obrobitelných křehkých materiálů např. sklo a keramika. Doporučuje se také pro dokončování povrchu. Nevýhodou je prašnost a malá účinnost.

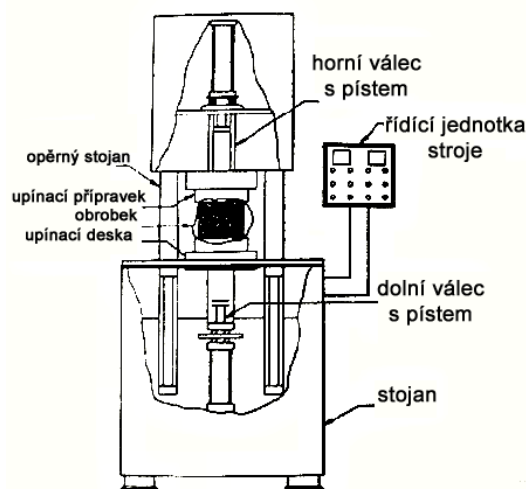


Obr. 2. Princip obrábění abrazivním paprskem



Obr. 3. Detail procesu abrazivního paprsku

AFM představuje pokrokový proces dokončování povrchů pomocí polotuhého viskózního abrazivního média, které je protlačováno mezi obrobkem a přípravkem. Vytváří vysokou úroveň dokončeného povrchu, úzké tolerance a geometrického tvaru. Tudiž se hlavně používá na dosažení přesných a rovnoměrných povrchů, dále také na ojeňování a zaoblování. [1]



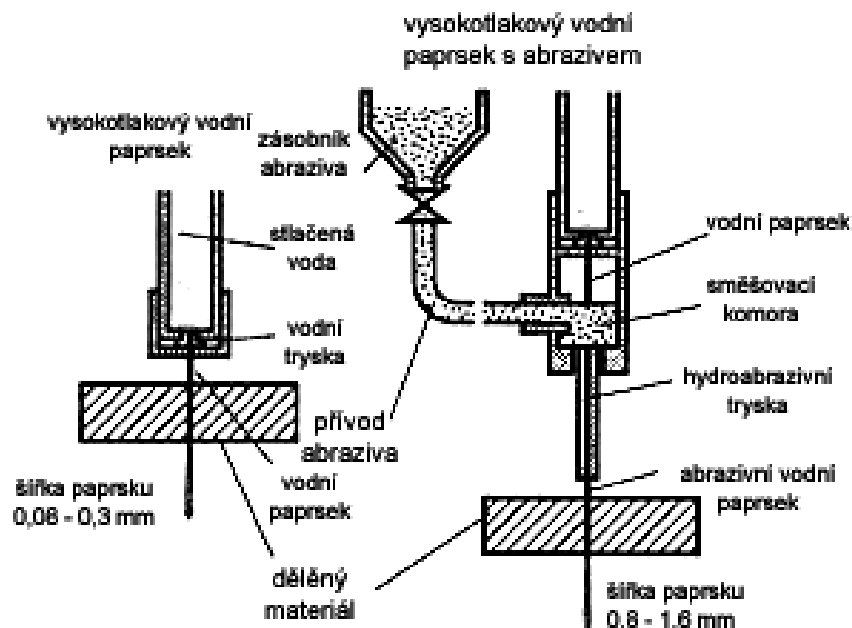
Obr. 4. Schéma zařízení pro AFM proces

1.2.3 Obrábění vodním paprskem WJM, AWJM

Metoda spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého vodního proudu s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Technologický proces využívá úzký vysokotlaký a vysokorychlostní proud vody (tlak vody okolo 400 MPa) jako řezný nástroj. Přidáním jemného brusiva se zvyšuje účinek řezání, což rozšiřuje možnosti využití vodního paprsku.

Tato metoda nachází široké uplatnění při opracování kovových a nekovových materiálů jako např. litiny, antikorozi oceli, nástrojové oceli, hliníku, mědi, titanu, betonu a keramiky i kompozitních materiálů. Z hlediska použitého pracovního média se rozlišují dvě základní metody:

- WJM – čistý vodní paprsek nebo tzv. hydrodynamické obrábění.
- AWJM – obrábění abrazivním vodním paprskem – vodní paprsek s přísadou jemného brusiva. [1]



Obr. 5. Zjednodušený model principiálního rozdílu mezi technologií čistého vodního paprsku a abrazivního paprsku

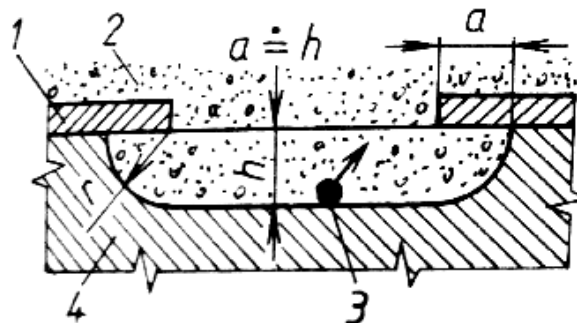
1.3 Chemické procesy

Chemické obrábění je proces, který využívá chemické reakce jako primární zdroj energie na úběr (odstranění) materiálu.

1.3.1 Chemické obrábění CM

Podstatou této technologie je využití chemických reakcí mezi obrobkem a chemickou látkou pro obrábění. Jedná se v podstatě o řízené odleptání vrstev materiálu o tloušťce několika setin milimetru až několika milimetrů z povrchu obrobku. Plochy, které nechceme obrábět, se chrání speciálním povlakem (maskou), chemicky odolnými látkami nebo speciálními povlaky (maskování).

Hlavní nevýhoda metody spočívá v tom, že výsledek procesu leptání je závislý na experimentálních zkušenostech a vyžaduje vysokou zkušenost personálu. Uplatnění je zejména u odstranění tenkých vrstev a chemické leptání elektronických součástek atd. Výsledný povrch značně závisí na povrchu polovýrobku a na tloušťce odleptané vrstvy, který má kráterový profil. [1, 2, 3]



Obr. 6. Princip chemického obrábění.

1-masko, 2-nástroj (chemická leptací látka), 3-odebrané (odleptané) části materiálu obrobku, 4-obrobek

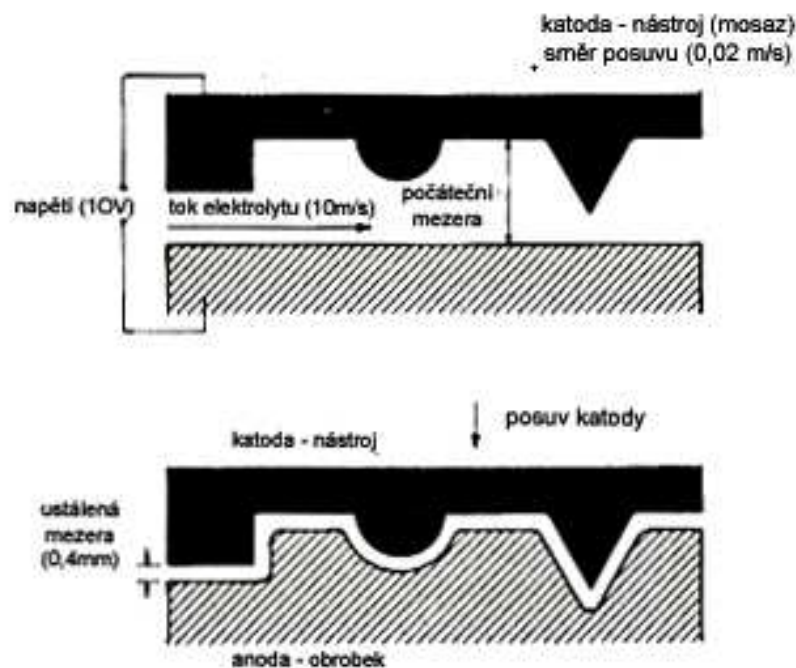
1.3.2 Fotochemické obrábění PCM

Fotochemické obrábění neboli leptání je modifikace chemického obrábění, při kterém je materiál odebraný z povrchu fotografickou technikou. Je vhodné pro přesné tvarování kovových i nekovových materiálů. [1]

1.4 Elektrochemické a elektrické procesy

1.4.1 Elektrochemické obrábění ECM

ECM je metoda beztržiskového obrábění elektricky vodivých materiálů. Využívá poznatků o působení elektrického proudu na elektrolyt, podstatou metody je fyzikální jev zvaný elektrolýza. Je to tedy řízený lokalizovaný úběr materiálu jeho anodickým rozpouštěním v elektrolytu, kde obrobek je anoda a nástroj katoda. Přičemž tvar se kopíruje na obráběný povrch. Elektrolyt protéká v mezeře mezi elektrodami zapojeným do obvodu jednosměrného napětí. Charakteristickým jevem je, že opotřebení (úbytek) nástrojové elektrody (katody) je nepatrný, nedochází k výrazné změně tvaru nástrojové elektrody. Uplatnění metody je široké, jako např. hloubení tvarů a otvorů, dělení materiálu atd. [1, 2, 3]

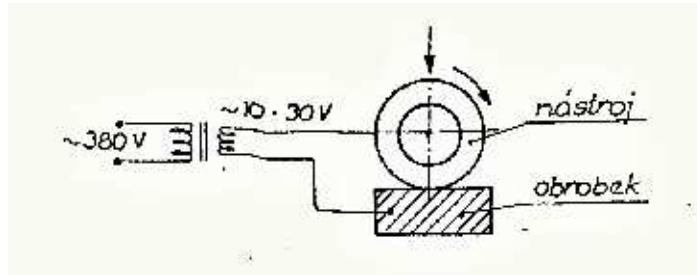


Obr. 7. Základní princip elektrochemického obrábění a konfigurace nástroj-obrobek na začátku procesu a na konci procesu

1.4.2 Elektromechanické obrábění ECG

Při elektromechanickém neboli elektrokontaktním obrábění dochází k úběru materiálu elektrickými nestacionárními kontaktními oblouky - výboji. Elektrody, tj. nástroj a ob-

robek jsou napájeny ze zdroje střídavého napětí. Nástroj vykonává rotační, případně přímočarý (jako pásová pila) pohyb. Pohyb vytváří předpoklady pro mechanické buzení výbojů a vznik elektrotepelného procesu využívajícího obloukového výboje a tepla při kontaktu elektrod. [2]



Obr. 8. Princip elektromechanického obrábění

1.5 Elektrotepelné a tepelné procesy

Elektrotepelné anebo tepelné procesy využívají na úběr materiálu jako primární zdroj tepelnou energii, kterou poskytují vysokoenergetické paprsky elektronů, fotonů iontů a plazmy. [1]

1.5.1 Obrábění paprskem koncentrované energie

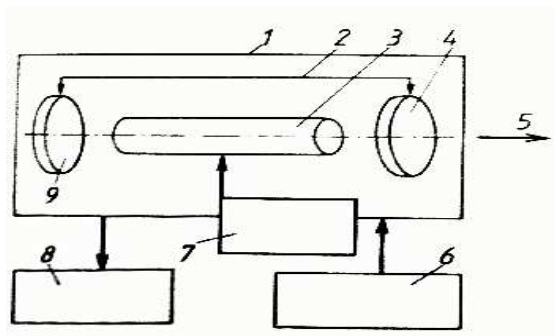
Charakteristika těchto procesů je, že úběr materiálu se děje zvyšováním vnitřní energie atomů v povrchu obrobku. Odebírání materiálu je výsledkem reakce elementární částice energetického paprsku (atom, elektron, ...) na částici (atom) materiálu nebo účinkem shluku částic (atomů) na shluk částic (atomů). [1]

1.5.1.1 Obrábění paprskem laseru

Je to princip obrábění založený na přeměně světelné energie na tepelnou. Děje se tak při styku paprsku laseru s povrchem obrobku, kdy se materiál obrobku vlivem vzniklé vysoké teploty ohřívá, taje a odpařuje se. Princip funkce laseru je možné objasnit na základě pojmů kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laser je tedy kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku, který má tyto základní vlastnosti:

- Monochromatický – má jednu vlnovou délku (jednobarevný)
- Koherentní – uspořádaný
- Má malou divergenci – rozbíhavost.

V technologii se laser používá pro popisování, řezání, svařování, pájení, vrtání, frézování atd. [1, 3]



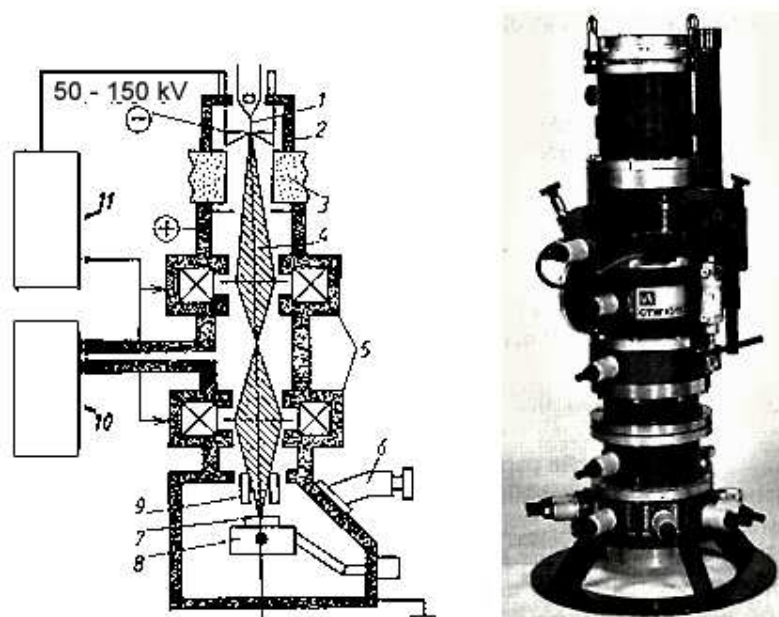
Obr. 9. Schéma laseru.

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

1.5.1.2 Obrábění elektronovým paprskem EBM

Je to obrábění svazkem elektronů, uplatnitelné především v oblasti mikroobrábění. Podstatou zařízení je elektronové dělo, které slouží ke generaci, urychlení a zaostření svazku elektronů. Nevýhodou je, že pro zachování parametrů elektronového paprsku při průchodu pracovní komorou je nutno v zařízení vytvořit vakuum. Svazek paprsků předá při dopadu na povrch materiálu svoji kinetickou energii ve formě tepla. Dochází k lokálnímu přehřátí, natavení, případně i k odpaření materiálu.

Aplikace pro obrábění tenkých materiálů s hloubkou obrábění 0,5 – 1 mm pro kovy a 2 -3 mm pro dielektrické materiály, při šířce řezu 0,01 mm. Lze provádět operace jako vrtání otvorů, dělení materiálu, děrování, značkování atd. [1, 2, 3]



Obr. 10. Zařízení pro obrábění elektronovým paprskem.

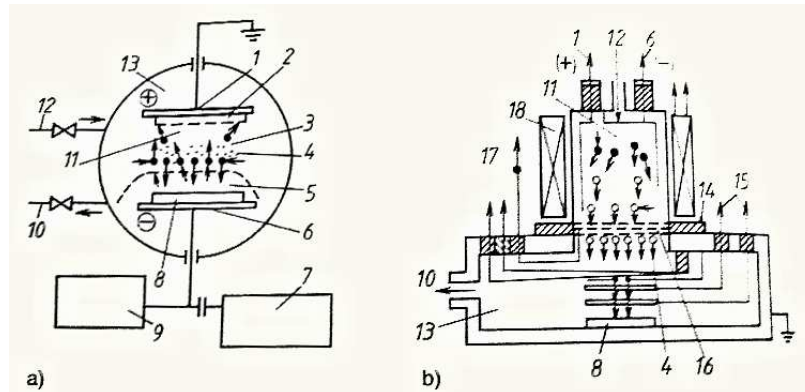
a) Schéma, b) zdroj elektronů (elektronové dělo)

1-wolframový drát, 2-elektronové dělo, 3-izolátor, 4-elektronový paprsek, 5-
elektromagnetické čočky, 6-průzor, 7-obrobek, 8-pracovní stůl, 9-elektrostatické vychylování
elektronového paprsku, 10-vývěvy, 11-napájecí zdroj

1.5.1.3 Obrábění iontovým paprskem IBM

Obrábění je založeno na účinku kinetické energie iontů působících ve vakuu na opracovávaný materiál. Velikost úběru materiálu je závislá na hustotě proudu iontů. Zdrojem proudu iontů je obvykle argon, který je ionizován elektrony vyzařovanými z katody. Ionty s vysokou kinetickou energií působí na povrch obrobku a vytlačují atomy materiálu. Při této metodě se vytváří teplo a nevzniká mechanická deformace povrchové vrstvy.

Tato technologie se používá pro přípravu matric při výrobě integrovaných obvodů a při čištění a hlazení povrchů. Lze obrábět prakticky všechny materiály včetně optického skla a diamantu. [2, 3]



Obr. 11. Schéma iontového obráběcího zařízení.

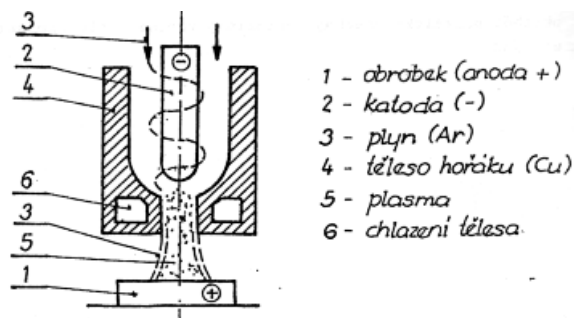
a) Anizotropní leptání polovodičů, b) iontové leptání

1-anoda, 2-depozitní vrstva, 3-elektrony, 4-ionty, 5- krycí maska, 6-katoda, 7-oscilátor, 8-obrobek, 9-voltmetr, 10-vývěvy, 11-plazma, 12-přívod argonu, 13-vakuum, 14-izolátor, 15-snímač iontů, 16-elektroda, 17-potlačení elektrod, 18-indukční cívka

1.5.1.4 Obrábění paprskem plazmy PAM

Obrábění plazmou je založeno na ohřevu nebo tavení materiálu extrémně vysokou teplotou (nad 10 000 °C), které vznikají rozkladem molekul plynu při jejich průchodu elektrickým obloukem. V elektrickém oblouku, který hoří mezi tavící se elektrodou (katoda) a řezaným materiálem (anoda), dochází k rozkladu molekul plynu s vysokým vývinem tepla. Z hořáku vychází vysokou rychlostí úzký svazek paprsku plazmy (plynného stavu hmoty), který je zionizován a v důsledku toho dobře vodivý pro elektrický proud. Materiál se taví a je kinetickou energií proudu vytlačován z místa řezu.

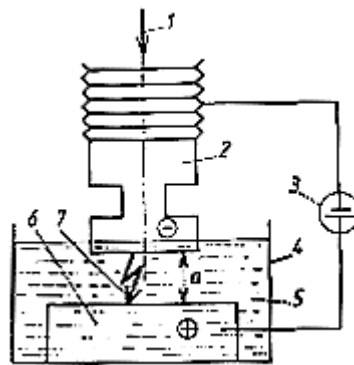
Metoda je široce využitelná v oblasti svařování, dělení materiálů, nanášení povlaků na bázi keramiky. [2, 3]



Obr. 12. Schéma obrábění paprskem plazmy

1.5.2 Elektroerozivní obrábění EDM

Je to elektrotepelný proces, u kterého se dosahuje úběr materiálu elektrickými výboji mezi katodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a anodou (nejčastěji ji tvoří obrobek) ponořenými do tekutého dielektrika, což je většinou kapalina s vysokým elektrickým odporem. Základem úběru materiálu je elektroeroze. Vlivem vysoké koncentrace energie (10^5 až 10^7 W.mm⁻²) materiál taje a odpařuje se. Je důležité zdůraznit, že lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály. Využívání metody dělíme na dvě hlavní oblasti a to na hloubení a drátové řezání. [1, 3, 4]



Obr. 13. Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění.

1-směr posuvu nástrojové elektrody, 2-nástrojová elektroda, 3-generátor, 4-pracovní vana, 5-tekuté dielektrikum, 6-obrobek, 7-elektrický náboj

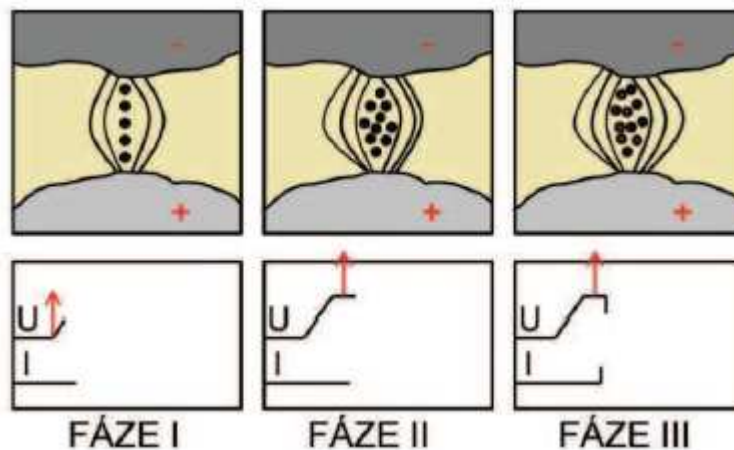
1.6 Řezání drátovou elektrodou WEDM

Elektroerozivní řezání drátovou elektrodou patří k nejrozšířenějším nekonvenčním metodám obrábění a je využíváno zejména při výrobě střížných a lisovacích nástrojů, šablon a řady dalších plochých součástí z kovových materiálů. Metoda umožňuje vyrábět tvarové přímkové plochy, tzv. tvořící čarou těchto ploch je přímka.

Platí zde všechny zákonitosti elektrické eroze uvedené v předešlém odstavci. Nástrojová elektroda je tenký drát, který se postupně odvíjí, postupné odvíjení drátu je potřebné pro vyloučení jeho opotřebení. Rychlost odtahu drátu je řízený NC nebo CNC systémem stroje, podle požadovaného tvaru předmětu. Vysoko efektivní je integrace technologie do CAD/CAM systému. [1, 2, 3, 4]

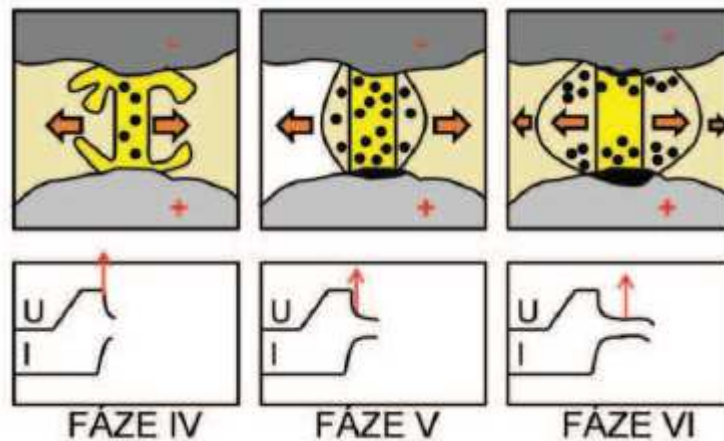
Jednotlivé fáze výboje

- **Fáze I** – V okamžiku přivedení napětí na nástrojovou elektrodu a obrobek se začne vytvářet elektrické pole. V důsledku nerovnosti elektrod se v místě s nejmenší vzdáleností vytváří místo maximálního gradientu. Elektricky vodivé částice (znečištění) obsažené v dielektriku jsou vtahovány do tohoto místa.
- **Fáze II** – Přivedené napětí dosahuje maximální hodnoty, elektricky vodivé částice vytváří můstky, jako základ potřebný k zapálení výboje.
- **Fáze III** - Vlivem elektrického pole dochází k uvolňování elektronů ze záporně nabitě elektrody. Elektrony se sráží v prostoru s neutrálními částicemi a tříští se o sebe. Díky těmto srážkám v pracovní mezeře vznikají kladné i záporné ionty. Tento proces je obecně znám jako ionizace prostředí.



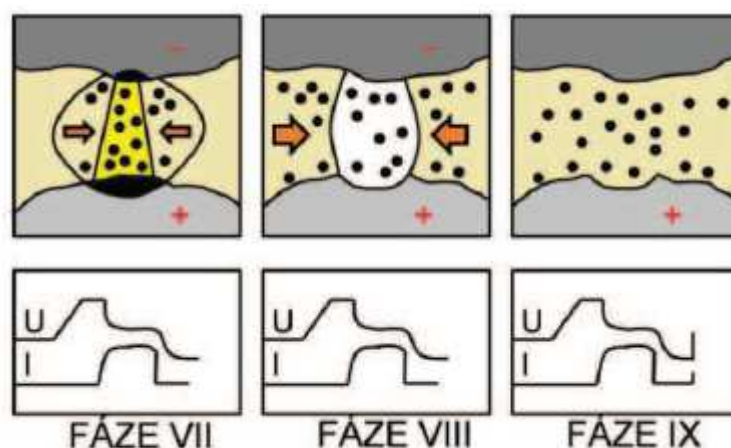
Obr. 14. Jednotlivé fáze elektroeroze I-III

- **Fáze IV** – Budoucí výbojový kanál se začíná obalovat ionty, čímž klesá odpor. Mezi elektrodami začíná protékat proud, roste proudová hustota a vzniká vodivý kanál z plazmy. Roste teplota povrchu elektrod, proud a zároveň klesá napětí.
- **Fáze V** – Začíná odpařování dielektrika a vzniká plynová bublina. V důsledku nárazů částic dochází k uvolňování vysokého množství tepelné energie (teplota až 10000 °C). Nárazy iontů na katodu a elektronů na anodu způsobují ohřev ohraničených míst obou elektrod, dochází k jejich natavení a následnému odpařování. Protékající proud dosahuje maximální hodnoty a napětí se ustaluje na tzv. zápalné hodnotě výboje.
- **Fáze VI** – Dochází k intenzivní expanzi bubliny a intenzivnímu tavení a vypařování materiálu.



Obr. 15. Jednotlivé fáze elektroeroze IV-VI

- **Fáze VII** – V důsledku přerušení přiváděné energie a poklesu proudu mezi elektrodami, dochází ke snížení dodávek tepla do místa výboje. Pokles teploty je příčinou imploze plynové bubliny. Díky síle elektrického pole a poklesu tlaku plynů dochází k vytrhávání taveniny do prostoru.
- **Fáze VIII** - Pracovní proud a napětí mezi elektrodami klesá na nulovou hodnotu. Dochází k zániku bubliny a výboje. Do vzniklého kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje průniku tepla do hlubších vrstev kovu. Odebraný materiál zůstává v dielektriku ve formě spalin a mikročástic ve tvaru kuliček.
- **Fáze IX** – V poslední fázi je dielektrikum znečištěno produkty eroze a obsahuje zbylé ionty, které jsou základem pro vznik nového výbojového kanálu. [1, 2, 5]



Obr. 16. Jednotlivé fáze elektroeroze VII-IX

Cílem je dosažení maximálního možného úběru materiálu a minimálního úběru tedy opotřebení na nástroji, čímž se ovlivňuje jeho životnost. Z tohoto předpokladu je třeba

vycházet při realizaci elektroerozivního obrábění a volit vhodné pracovní podmínky. Ty jsou dány především následujícími údaji:

- vhodným zapojením do elektrického obvodu (způsob dodávání energie), jeho polaritou a elektrickými parametry charakterizujícími jednotlivé výboje a jejich množství
- volbou správného parametru nástrojové elektrody vzhledem k obráběnému materiálu
- vhodně zvoleným pracovním prostředím (dielektrikem)

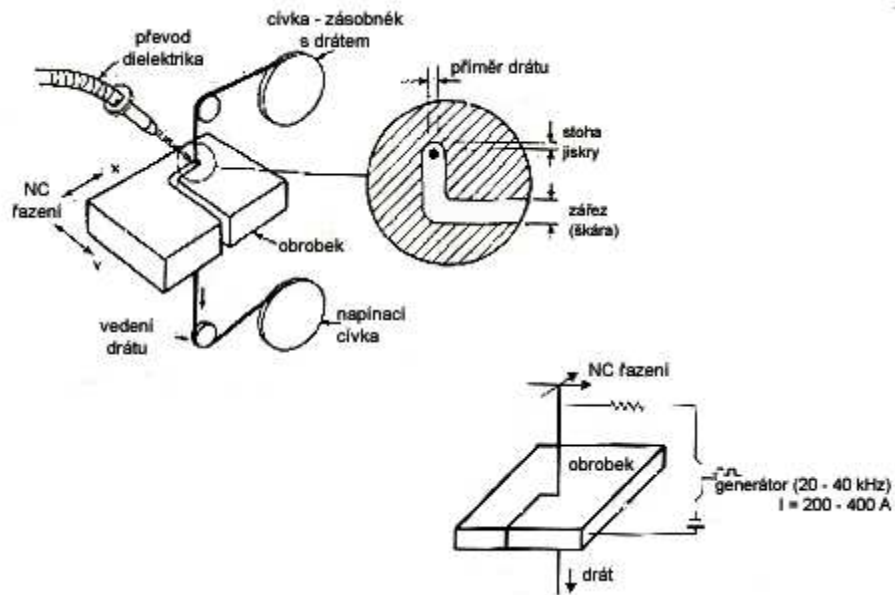
Obráběný předmět je upnut na stole a může se pohybovat v horizontálním směru nebo nevykonává žádný pohyb. Drát se pohybuje ve vertikálním směru podle určené dráhy. Nejrozšířenější jsou měděné a mosazné dráty. Vyznačují se vysokou pevností v tahu a elektrickou vodivostí. Nejnovější trendy využívají povlakované dráty, např. ocelové dráty povlakované mědí. Průměr drátu je v rozmezí 0,03 – 0,3 mm. Plynule nastavitelný sklon drátu bývá $\pm 30^\circ$.

Jako dielektrikum bývá nejčastěji použita deionizovaná voda nebo nízko viskózní kapalina a také lehké oleje. Kapalina musí zabezpečovat dostatečné chlazení v oblasti obrobku a drátové elektrody, jelikož v místě výboje vzniká teplota 3000 °C až 12 000 °C a odplavování erozních zplodin. WEDM vyžaduje plynulé proudění dielektrika do oblasti řezu, síla výplachu je řízená systémem stroje, výsledkem nevhodného výplachu bývá přetržení drátové elektrody. Pro přesné obrábění je stejně důležité důsledné dodržení vzdálenosti mezi elektrodami. Mezera bývá okolo 0,03 mm.

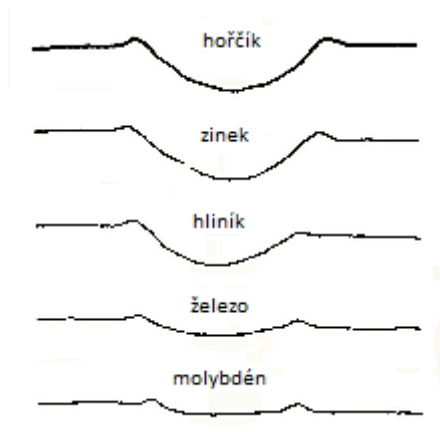
Rychlost úběru materiálu je udávána jako objemový úběr za časovou jednotku a pro starší typy strojů bývá 1 300 mm²/h, novější zabezpečují deset i více násobně vyšší úběr materiálu. Samozřejmě rychlost úběru závisí na materiálových vlastnostech obrobku, přičemž tvrdost a houževnatost jsou zanedbatelné.

Dosahovaná pracovní přesnost se udává okolo 0,013 mm, podle druhu zařízení. Přesnost polohy drátu až do 0,003 mm.

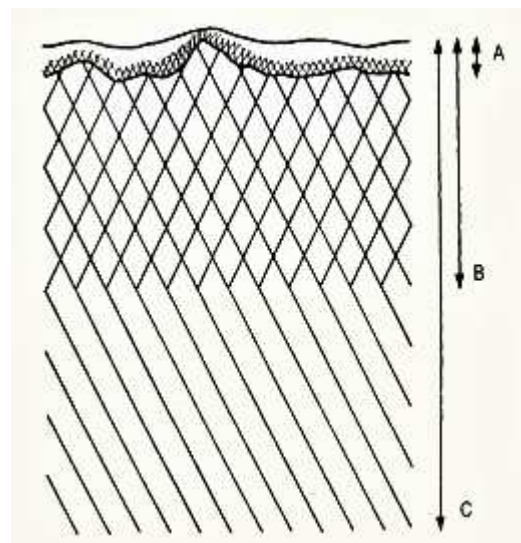
Povrch materiálu po opracování vykazuje typické stopy po tepelném ovlivnění. Dosahuje se drsnosti okolo 0,76 – 1,27 μm. [1, 4]



Obr. 17. Princip elektrojiskrového drátového řezání, vznik řezné mezery a zjednodušené schéma zapojení



Obr. 18. Profily vznikajících kráterů pro různé materiály při stejných podmínkách výboje



Obr. 19. Typický charakter povrchu po elektrojiskrovém opracování.

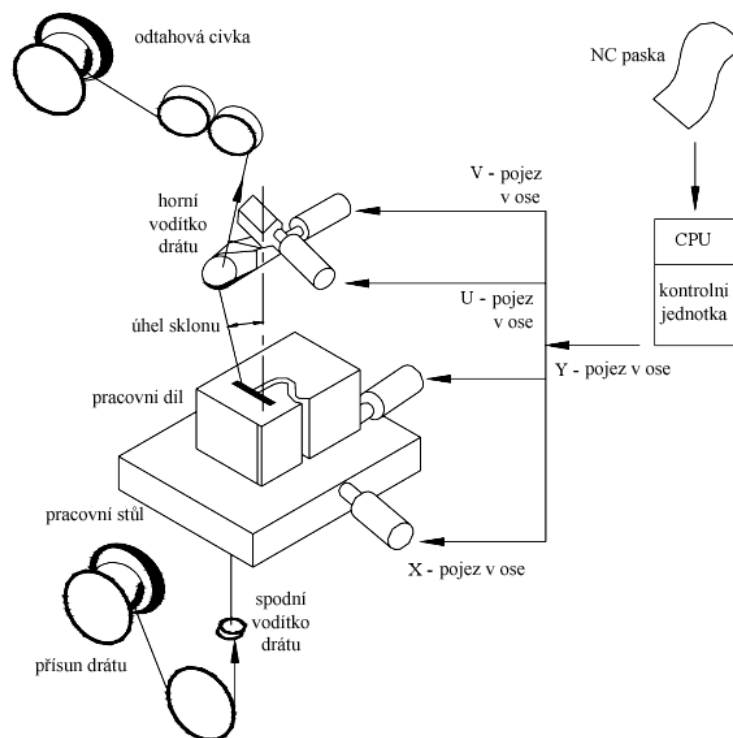
A-vrstva roztaveného kovu 10÷40 μm

B-oblast vykazující znečištění způsobené difuzí materiálu elektrody do hloubky asi 250 μm

C-tepelně ovlivněná vrstva méně než 400 μm

1.6.1 Rozdělení strojů WEDM

Dělit stroje pro WEDM je možné z více hledisek. Jeden z hlavních faktorů je dělení podle velikosti pracovního stolu a s tím i spojená možnost upnutí určitého objemu dílce. Další dělení je pak také podle rozsahu pojezdu horní a dolní hlavy. Dalším a důležitým hlediskem je dělení podle počtu pracovních os, které mohou být 2 – 6, přičemž nejrozšířenější jsou čtyřosé. Počet os má podstatný vliv na cenu stroje. [4, 6, 7, 8]



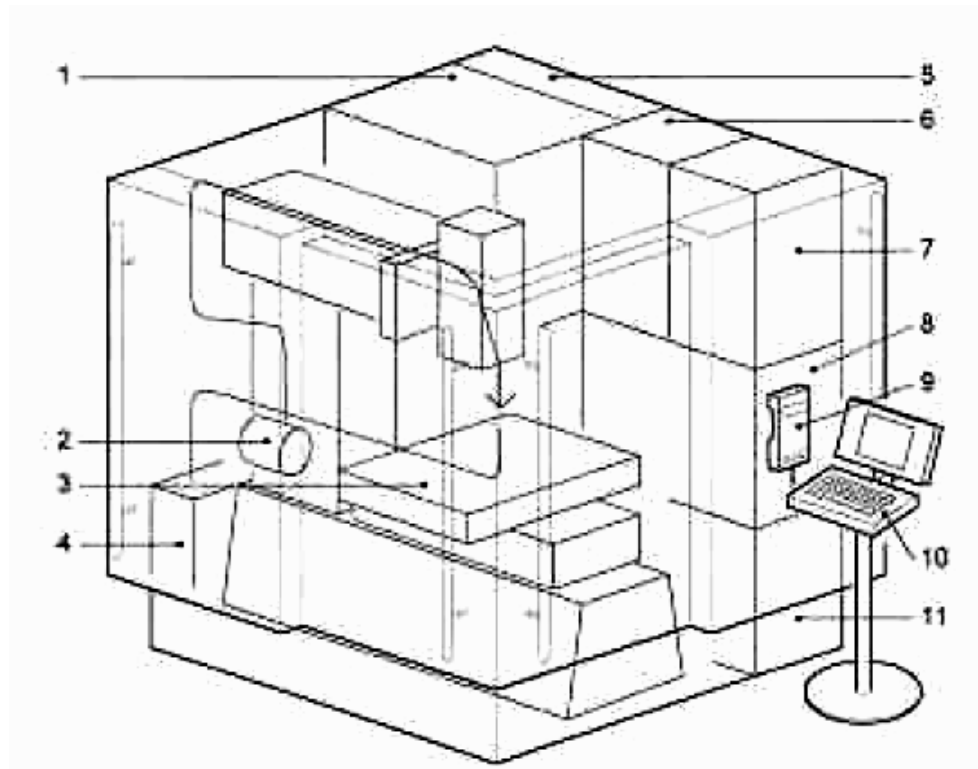
Obr. 20. Schematické znázornění cesty drátu při elektrickém výboji obráběcího procesu

- **Konstrukční vlastnosti**
 - System výplachu
 - ponořený obrobek
 - neponořený obrobek
 - kombinovaný výplach
 - Způsob pohybu drátu
 - pohyb obrobku
 - pohyb vodítky

- **Řezné vlastnosti**
 - Způsob navlékání drátu
 - manuální navlékání
 - automatické navlékání
 - Způsob řízení
 - Software
 - Hardware
 - Maximální rychlost řezání
 - Dosažitelná drsnost
 - Přesnost stroje
- **Technologické vlastnosti**
 - maximální rozměr obrobku
 - maximální hmotnost obrobku
 - rozsah použití průměru drátu
 - maximální možnost úkosu
 - vnitřní rozměr řezného prostoru
- **Pomocné vlastnosti**
 - hmotnost stroje
 - rozměr stroje
 - požadavky na zdroj el. energie (příkon) [4, 6, 7, 8]

1.6.2 Popis drátové řezačky

Celek elektroerozivní drátové řezačky se rozděluje na několik samostatných oblastí, které jsou vzájemně propojeny řídicím systémem stroje. Vlastní konstrukce je důležitá z hlediska celkové tuhosti stroje a záleží především na použitých materiálech. Jsou to litiny (především šedá – dobře tlumí rázy a chvění) a dále pak oceli.



Obr. 21. Schéma elektroerozivní drátové řezačky

1. Impulzní generátor - dodává vybíjecí proud a reguluje vyjiskřovací proces.
2. Systém drátu - který zahrnuje cívku, systém přívodu drátu do pracovního prostoru a likvidaci drátu.
3. Pracovní prostor - je vybaven podložkami a upínacím systémem.
4. Zásobník použitého drátu - shromažďuje použitý drát.
5. Řízení os - elektronika k řízení os.
6. Napájení - jednotka pro připojení do el. sítě.
7. Numerické řízení - provádí výpočty pro řízení os.
8. Agregát dielektrika - zahrnuje filtrační systém, deionizaci, chlazení, čerpadlo a rozdělování dielektrika.
9. Ruční ovládání - umožňuje zadávat příkazy v těsné blízkosti pracovního prostoru.
10. Ovládací konzola obsluhy – zde se zadává a spravuje řídicí program stroje.
11. Zásobník dielektrika – je rozdělen do dvou sekcí, jedna pro znečištěné dielektrikum určené k úpravě v agregátu dielektrika a druhá pro čisté dielektrikum určené pro znovupoužití v řezacím procesu. [4, 6, 7, 8]

2 PROGRAMOVÁNÍ CNC STROJŮ

CNC je zkratkou anglického „Computer Numeric Control“, která se používají i u nás, ve spojení s obráběcím strojem lze používat ekvivalent „počítačem řízený stroj“, tedy obráběcí stroje využívající počítač „CNC řídicí systém“ k tomu, aby dokázaly obrábět výrobek dle předem připravených technologických NC programů. Základní rozdělení obráběcích strojů na soustružnické, frézovací a kombinované a dále na EDM, drátořezy. [9, 10]

2.1 Tvorba programu

Řízení bude řídit nástroj na jednotlivé polohy, zadané v programu. Rozeznáváme dva způsoby programování z hlediska zadávání souřadnic, a to:

- absolutní programování,
- přírůstkové (inkrementální) programování.

Další rozdělení je podle způsobu programování na:

- Ruční
- Strojní (CAM)
- Dílenské [9, 10, 11]

2.1.1 Absolutní programování

Při tomto způsobu programování je koncová poloha bodu zadaná vzhledem na nulový bod programu (resp. nulový bod obrobku, stroje) a je nezávislá od momentální (aktuální, poslední) polohy nástroje. To znamená, že těmito hodnotami je určené místo, kde je třeba přesunout nástroj. [9, 11]

2.1.2 Přírůstkové programování

Řízením možno zadat, do jaké vzdálenosti a jakým směrem je třeba nástroj přemístit. Tyto údaje se vztahují vždy na momentální (aktuální, poslední) polohu nástroje. Řízení rozpozná inkrementální formu polohy buď příkazem „G91“ anebo podle dodatečného písmena „I“ v označení příslušné osy. [9, 11]

2.1.3 Programování konturové

Často se programátoři setkávají s výkresy, kde konstruktér nezakótoval důležité body, které jsou nutné pro programování např. kontury a které musí zapsat do programu. Jde zejména o průsečíky, tečné body přímků kruhových oblouků. Pokud přímků jsou rovnoběžné s osami souřadnic, lze požadované body vypočítat bez větších problémů z výkresu. V případě, kdy oblouky nejsou v celých kvadrantech a přímků nejsou rovnoběžné s osami, to vyžaduje náročné výpočty. Softwarové řešení umožňuje zadáním různých variant spojení základních elementů (které mohou být zadány tečným spojením, úhlem, bodem, sražením, zaoblením) vypočítat požadované body souřadnic a přenést je do programu. [9, 11, 12]

2.1.4 Ruční programování

Ruční programování je typické pro tvorbu NC kódu jednodušších strojních součástí. Tento způsob programování je v poslední době nahrazen strojním programováním, pomocí kterého můžeme obrábět součásti velmi složitých a přesných tvarů. Toto lze rozdělit do dvou základních fází - konstrukční a technologickou přípravu.

Informace musí být zapsány kódem, kterému řídicí systém rozumí a který dovede zpracovat. Nositelem informace je nejčastěji děrná páska, magnetová páska, disketa, CD ROM, flash disk, pevný disk apod.

Ruční programování je odborná činnost náročná jak na znalosti a zkušenosti programátora, tak i na jeho čas. U složitých programů je nebezpečí, že se dopustíme při programování chyby. [9, 13]

2.1.5 Strojní programování

Stále náročnější požadavky ve strojírenství při řízení technologických procesů si vynutilo nové změny v oblasti NC a CNC řízení a programování. Výroba složitějších součástí pomocí klasického programování se stávala neefektivní a pracná, v některých případech i prakticky nerealizovatelná. Nejčastěji nacházejí tyto systémy uplatnění při výrobě různých forem pro vstřikování a lisování, při výrobě elektrod pro nekonvenční technologie elektroerozivního obrábění a v neposlední řadě u součástí velmi složitých tvarů.

Podstata a princip CAD/CAM systémů spočívá v propojení práce konstruktéra a technologa (CAD... počítačová podpora při kreslení, konstruování a modelování součástí,

CAM... počítačová podpora při výrobě součástí). Programování se stává jednodušším, protože geometrie dráhy nástroje je dána výkresem či modelem, čímž odpadá velká část práce programátora. [9,14]

2.1.6 Programování dílenské

Postupem doby a vývojem techniky (výkonnější hardware přímo na stroji) se v některých případech přenáší programování do dílny. Kvalifikovaná obsluha v překrytém čase, kdy provádí pasivní dozor u CNC stroje, který obrábí, využívá čas a připravuje si program pro další vyráběnou součást. Zde je jednotnost programování v dílně s externím programátorským pracovištěm. Programuje se interaktivně, při využití grafické podpory tak, že lze přímo na simulátoru vidět simulaci obrábění dynamicky po jednotlivě napsaných blocích. Programuje se ve smyslu zde popsanych způsobů. Při napojení na počítačovou síť je možné přebírat výkresy ze systému CAD (často i použít CAD/CAM) včetně externě vyhotovených programů. [9, 11, 12]

2.2 Struktura programu

Na začátku programu je před prvním řádkem (blokem) uveden znak %, za znakem je uvedeno číslo programu – to platí pro většinu řídicích systémů. Před tímto znakem lze uvádět informace, které stroj nezpracovává, jako např. poznámky, název součásti atd. Poznámky lze uvést i za znakem, ale je nutné je dát do závorky. Jsou systémy, které tento znak nepožadují, potřebné poznámky se obvykle uvádějí v programu např. funkcí G. [9, 11]

Tab. 2. Složení programu (v bloku)

Příklad				Název	Poznámka
N 40 G 00 X 100 Z-50				blok (věta)	Doporučené pořadí adres jednotlivých slov ve větě je: N G (M) X Y Z F S T D, nemusí se dodržovat, záleží na daném řídicím systému. Doporučuje se dodržovat pro větší přehlednost a kontrolu.
N	G	X	Z-	příkaz (slovo)	
40	00	100	50		
N	G	X	Z	adresa	
40		0		významová část	
100		50		rozměrová část	

Tab. 3. Význam nepoužívanějších adres

Význam nepoužívanějších adres:		
Písmeno	Význam	Poznámka
X Y Z	Základní osy souřadného systému - pohyb v osách.	Některá z uvedených písmen abecedy jsou pro výrobce řídicích systémů závazná, některá doporučená.
A B C	Rotace kolem základních os.	
I J K	Parametry interpolace nebo stoupání závitu ve směru os.	
P Q R	Pohyb paralelně podél základních os.	
R	Některé systémy používají R jako parametr v podprogramech.	
U V W	Druhý pohyb paralelně se základními osami.	
T	Nástroj.	
D	Paměť korekce nástrojů.	Neobsazená písmena abecedy jsou volná, výrobci je obsazují dle specifik svých řídicích systémů, podle možností daných stroji, pro které jsou především určena.
G	Přípravná (geometrická) funkce.	
M	Pomocná (přídavná) (strojní) funkce.	
N	Číslo bloku (věty).	
F	Posuv.	
S	Otáčky vřetene. Konstantní řezná rychlost.	
L	Volání podprogramu.	

Tab. 4. Význam důležitých funkcí

Název a příklad	Užití
Věta (blok)	Čísluje se obvykle po desítkách, aby bylo možné dodatečné vložení dalších vět například při opravě programu. Řídicí systém obvykle seřazuje bloky podle čísel vzestupně a v tomto pořadí je čte a stroj vykonává zadané příkazy. Vzestupnost čísel slouží též pro lepší orientaci programátora v programu. Pokud by následující věta (y) obsahovala některé stejné instrukce, nemusí se psát, jsou platné do té doby, než budou přepsány = modální funkce.
Věta musí začít písmenem N a číslem např. N 40	
Př. N 40 G 00 X 100 Z-50 (obvyklé u výukových systémů, ale nemusí u většiny systémů ve výrobní praxi)	
Přípravné (hlavní) funkce G (Go) Př. G00; G01; G42	Zpracovávají geometrické informace. Některé systémy připouštějí vložit i více G funkcí do jedné věty. Dvojmístné číslo se nemusí použít, pokud je první číslo 0.
Př. G0; G1; G42	Některé systémy používají více než dvojmístná čísla G a také M.
Pomocné funkce M (Machine) Př. M04, také M4	Vyvolávají činnost mechanismu stroje. Některé se také týkají řídicího systému.
Informace o dráze Př. X20 Z-30	Jsou zadány cílovým bodem v souřadnicích absolutně - G90, nebo přírůstkem - G91.

Př. X20 Z-30	
Funkce nástroje T (Tool)	T a D se udávají obvykle dvojmístným číslem vzájemně souvisejícím. Př. T01 D01 současně zpracovává, přiřazuje k danému nástroji dané korekce. Některé řídicí systémy mají jiné řešení přiřazování korekcí k nástrojům.
Korekce nástroje D	
Př. T01 D01	
Posuvná funkce F (Feed)	Velikost posuvů je zadána v: mm za otáčku u soustruhu [$\text{mm}\cdot\text{ot}^{-1}$]
	mm za minutu u frézky [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]
Otáčkové funkce S (Speed)	Velikost otáček je zadána za minutu [min^{-1}] řezné rychlosti [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]

2.3 Programování – použití nejdůležitějších funkcí G, M

Tab. 5. Použití nejdůležitějších funkcí G, M

Označení funkce	Název funkce	Použití
G00	Lineární interpolace	Rychloposuv
G01		Pracovní posuv
G02	Kruhová interpolace	Ve směru hodinových ručiček
G03	(zhotovení rádiusů)	Proti směru hodinových ručiček
U rádiusů je nutné rozlišit směr pohledu: frézka - ze strany plusové osy Z		
G17	Pracovní rovina	X - Y
G18		Z - X
G19		Y - Z
G33	Řezání závitů	Určuje se proměnlivá hloubka třísky a počet hlazení bez přídávku.
Programátoři softwaru poskytují i cykly pro řezání závitů - programování je jednodušší, ale často neodpovídá požadavkům praxe.		
G40	Zrušení korekce	Vypnutí matematického aparátu výpočtu ekvidistanty.
G41	Zapnutí korekce rádiusů	Výpočet dráhy nástroje, (její ekvidistanty)
G42		Ekvidistanta, nástroj vlevo od kontury.
		Ekvidistanta, nástroj vpravo od kontury.
Je nutné rozlišit směr pohledu - dívat se ve směru pohybu nástroje.		
G45, G46, G47	Nájezdy nástroje	Realizují se po přímce, rádiusu, oblouku - pokud se požaduje plynulý přechod nástroje do řezu nebo z řezu.

G54-59	Posuny nulového bodu	Posuny absolutně i přírůstkově, na začátku i v průběhu programu.	
G90	Absolutní	Programování - popis drah nástroje v souřadnicové soustavě.	
G91	Přírůstkové	Programování - popis dráhy nástroje o kolik se posune v osách.	
G92	Omezení otáček	Stanoví velikost otáček, které neohrozí bezpečný chod stroje - to v závislosti na konkrétním stroji, obrobku - použití spolu s G96.	
(G50)	(dle řídicího systému)		
G96	Konstantní řízená rychlost	Je zadána řezná rychlost - mění se otáčky vřetene se změnou průměru, na kterém je špička nástroje. (Užití při soustružení)	
G 92 (firma Mikronex) - poloha nástroje v absolutních souřadnicích - je nutné provést najetí na obrobek, najetí nástroje do bodu, který definuje polohu nástroje a aktivovat nulový bod obrobku.			
M03	Otáčky vřetene	Ve směru hodinových ručiček	Při pohledu do vřetene stroje, nikoliv ze strany obsluhy.
M04		Proti směru hodinových ručiček	
Pro stanovení je nutné rozlišit směr pohledu - vždy pohled ze směru vřetene stroje - nikoliv od obrobku.			
M05	Zastavení vřetene		
M06	Výměna nástroje	Do této funkce se doplňují délkové korekce.	
Používá se při ruční výměně nástroje, nepoužívá se v případě zásobníků.			
M07-08	Zapnutí čerpadla	Chlazení, mazání obrobku při obrábění (možnost více čerpadel).	
M09	Vypnutí čerpadla		
M17	Konec programu	Vrací do hlavního programu - (hlavní programy mohou používat podprogramy, v těchto je odvolání, které vyvolá podprogram).	
M30	Konec hlavního programu	Návrat na začátek hlavního programu.	

2.3.1 Obrábění v rovinách souřadnicové soustavy

Tab. 6. Funkce pro roviny souřadnicové soustavy

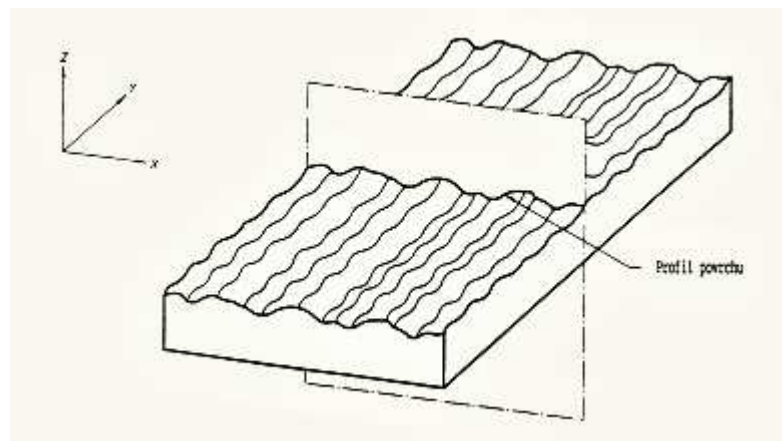
Funkce	Rovina obrábění	Délková korekce
G17	Rovina X-Y	Osa Z
G18	Rovina Z-Y	Osa Y
G 19	Rovina Y-Z	Osa X

3 JAKOST POVRCHU

Kontrola struktury povrchu je velmi složitá a správnost kontroly je závislá na splnění řady předpokladů. Provádění kontroly mimo rámec definovaný v normách GPS může poskytnout pouze informativní výsledky. [15]

3.1 Profil nerovnosti povrchu

Libovolná technologická metoda zanechává na ploše nerovnosti, které mají význam při funkci těchto ploch. Nerovnosti na povrchu představují prostorový útvar, který by bylo velmi obtížné posuzovat. Problém posuzování nerovností se řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu viz. obr. 22. V rovině řezu se získá profil, který je zdrojem informace pro posuzování struktury povrchu.



Obr. 22. Profil povrchu

Posuzování a hodnocení nejdůležitější složky struktury povrchu – drsnosti povrchu – má delší historii. Nejdříve byl využíván sinusový model nerovností, kdy parametr pro hodnocení byla veličina H_{sk} (analogie efektivní hodnoty střídavého proudu). V další etapě byl přednostně zaveden parametr R_a (analogie střední hodnoty střídavého proudu) spolu s některými dalšími parametry.

V souvislosti s novým pojetím geometrické specifikace výrobků (GSP) byl vytvořen dokonalejší systém hodnocení struktury povrchu, který je ošetřen sadou norem.

Struktura povrchu je členěna na složky podle rozteče příslušných nerovností. Jedná se o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, složku nazvanou vlnitost povrchu a složku s největší roztečí nerovností určenou základním profilem.

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry:

- P – parametr - parametr vypočítaný ze základního profilu.
- R – parametr - parametr vypočítaný z profilu drsnosti.
- W – parametr - parametr vypočítaný z profilu vlnitosti.

V novém systému je základním zdrojem informace profil (jedná se o profilovou metodu). Jsou definovány:

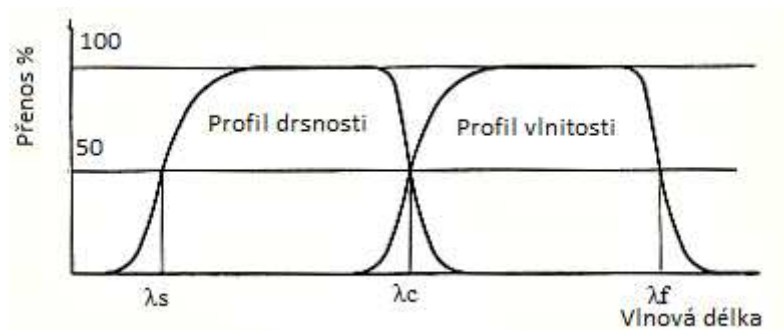
- Profil povrchu – jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.
- Snímaný profil – jako geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů. Od tohoto profilu jsou odvozeny všechny ostatní profily.
- Referenční profil – jako dráha, po které se snímač, podél vedení, pohybuje v rovině řezu.
- Úplný profil – jako číslcová forma snímaného profilu vzhledem k referenčnímu profilu.
- Základní profil – jako úplný profil po aplikaci krátkovlnného filtru λ_s . Základní profil reprezentuje základnu pro číslcové zpracování profilu pomocí filtrů a pro výpočet parametrů profilu.

Základní profil je základem pro hodnocení parametrů základního profilu. Tvar získaný specifikovaným typem metody nejmenších čtverců není základním profilem a měl by být vyloučen před filtrací.

- Zbytkový profil – jako základní profil získaný snímáním ideálně hladkého a rovného povrchu (optická rovina). Zbytkový profil je složen z úchylek vedení, vnějších a vnitřních poruch a z úchylek vzniklých při přenosu profilu.
- Profil drsnosti – jako profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c . Profil drsnosti je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti.
- Profil vlnitosti – jako profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ na základní profil. [15]

3.2 Filtry profilu

- Filtr profilu – jako filtr rozdělující profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky.
- λ_s filtr profilu – jako filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu.
- λ_c filtr profilu – jako filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.
- λ_f filtr profilu – jako filtr určující rozhraní mezi vlnitostí a dalšími složkami vln přítomnými na povrchu.
- Fázově korigovaný filtr profilu – jako filtr, který nezpůsobuje fázový posuv vedoucí k asymetrickému zkreslení profilu.



Obr. 23. Filtry profilu

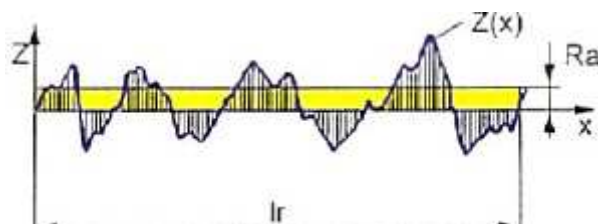
- Základní délka, I_p , I_r , I_w – délka ve směru osy x viz. obr. 23., použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil. Základní délka pro drsnost I_r a pro vlnitost I_w jsou číselně rovné charakteristické vlnové délce profilového filtru λ_c a λ_f . Základní délka pro základní profil I_p se rovná vyhodnocované délce.
- Vyhodnocovaná délka, I_n – délka ve směru osy x použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu nebo více základních délek. [15]

3.3 Parametry struktury povrchu

Norma ČSN EN ISO 4287 zavádí následující definici parametrů profilu:

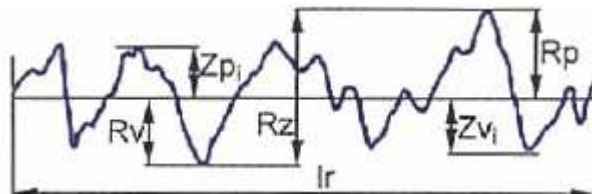
3.3.1 Výškové parametry

- Největší výška výstupku profilu, Pp , Rp , Wp – jako výška Zp nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky.
- Největší hloubka prohlubně profilu, Pv , Rv , Wv – jako hloubka Zv nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky.
- Největší výška profilu, Pz , Rz , Wz – jako součet výšky Zp nejvyššího výstupku profilu a hloubky Zv nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky.
- Průměrná výška prvků profilu, Pc , Rc , Wc – jako průměrná hodnota výšek Zt prvků profilu v rozsahu základní délky.
- Celková výška profilu, Pt , Rt , Wt – jako součet výšky Zp nejvyššího výstupku profilu a hloubky Zv nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.
- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, Pa , Ra , Wa – jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.
- Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu, Pq , Rq , Wq – jako průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.
- Šikmost posuzovaného profilu (skewness), Psk , Rsk , Wsk – jako podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Pq , Rq nebo Wq v rozsahu základní délky.
- Špičatost posuzovaného profilu (kurtosis), Pku , Rku , Wku – jako podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Pq , Rq nebo Wq v rozsahu základní délky. [15]
- Ra – střední aritmetická hodnota drsnosti. Je vyjádřena vztahem $Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(X)| dx$ (1)



Obr. 24. Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra

- R_z – maximální výška profilu

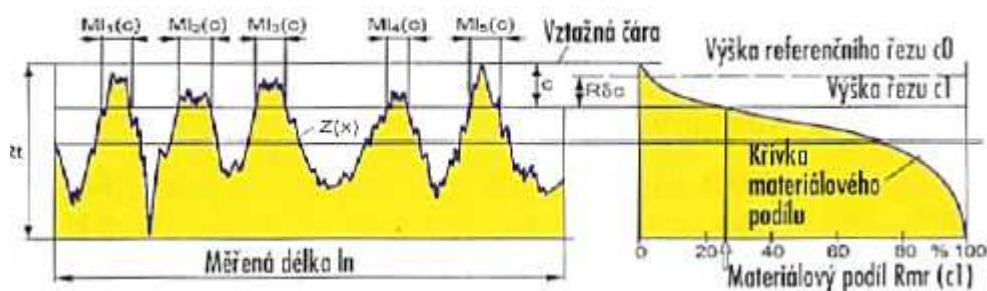


Obr. 25. Schematické vyjádření maximální výšky profilu R_z

- R_{sm} – průměrná vzdálenost výstupků.
- R_{mr} – materiálový podíl drsnosti profilu. Materiálový podíl profilu R_{mr} se určuje dle DIN EN ISO 4287 a vyjadřuje procentuální podíl součtu délek materiálových přímek $MI(c)$ v dané výšce profilu k měřené délce ln a je dán vztahem

$$R_{mr}(c) = \frac{100}{ln} \sum_{i=1}^n MI_i(c) = \frac{MI(c)}{ln} \quad (2)$$

Křivka materiálového podílu udává pak podíl jako funkci hladiny (výšky) řezu.[15, 16, 17]



Obr. 26. Křivka materiálového podílu drsnosti povrchu

3.3.2 Délkové parametry

- Průměrná šířka prvků profilu, PSm , RSm , WSm – jako průměrná hodnota X_s prvků profilu v rozsahu základní délky. [15]

3.3.3 Tvarové parametry

- Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu, Pdq , Rdq , Wdq – jako průměrná kvadratická hodnota sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky. [15]

3.3.4 Křivky a odpovídající parametry

- Materiálový poměr profilu (nosný podíl), $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$ – jako poměr délky materiálu prvků profilu $MI(c)$ na dané úrovni c , k vyhodnocené délce.
- Rozdíl výšky úseku profilu. Pdc , Rdc , Wdc – jako vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.
- Vzájemný materiálový poměr, Pmr , Rmr , Wmr – jako materiálový poměr určený na úrovni části profilu Rdc vztažený k úrovni CO.
- Křivka rozdělení výšek profilu – jako hustota pravděpodobnosti pořadnic $Z(x)$ v rozsahu vyhodnocené délky. [15]

3.4 Pravidla pro hodnocení struktury povrchu

3.4.1 Uplatnění „pravidla 16 %“

Pro parametry specifikované horní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci přesáhneme maximálně 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce.

Pro parametry specifikované dolní mezí parametru jsou povrchy považovány za přijatelné, jestliže hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci nedosáhne maximálně 16 % všech naměřených hodnot vybraných parametrů zjišťovaných na vyhodnocované délce.

Při stanovení horní a dolní meze parametru se používá značka parametru bez indexu „max“. [15]

3.4.2 Uplatnění „pravidla maxima“

Při požadavcích specifikovaných největší hodnotou parametru nesmí v průběhu kontroly žádná z měřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu překročit hodnotu uvedenou na výrobní dokumentaci.

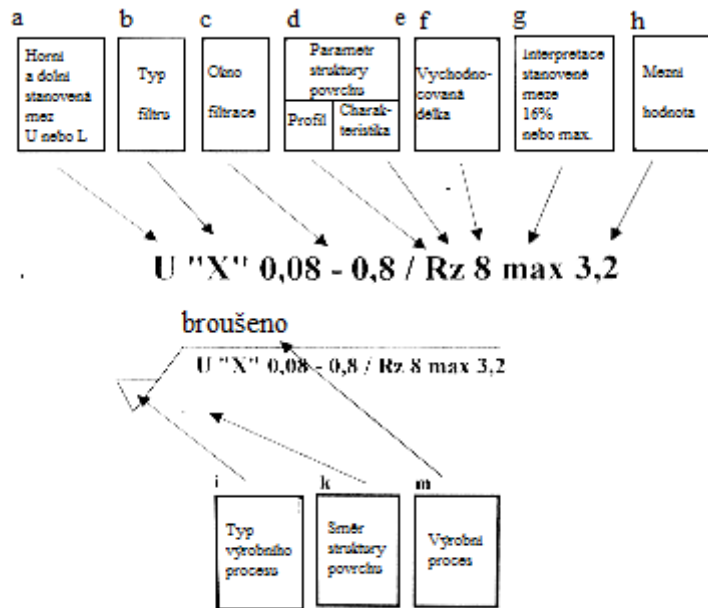
Při stanovení největší dovolené hodnoty parametru se značka parametru doplňuje indexem „max“ např. Rz1max.

Pro dokázání shody nebo neshody se specifikací se měřené hodnoty parametrů porovnávají se specifikovanými limitními hodnotami s uvážením nejistot měření podle pravidel daných v ISO 14253-1. V případě porovnávání výsledků měření s horními a dolními mezemi jsou nejistoty měření odhadovány bez uvážení nehomogenit povrchu, které jsou už započítány přídavkem 16 %.[15]

3.5 Označování struktury povrchu v technické dokumentaci

Na obr. 27. je znázorněn způsob a možnosti označování struktury povrchu podle ISO/CD 1302. Jsou uvedeny následující možnosti.

- Údaj horní U nebo dolní L stanovené meze.
- Filtr typu „X“.
- Okno filtrace je uvedeno hodnotou krátkovlnného filtru.
- Profil (R, W, P).
- Parametr. Úplná grafická značka umožňuje použití tří normalizovaných skupin parametrů struktury povrchu.
- Vyhodnocovaná délka udaná počtem základních délek.
- Interpretace stanovené meze (pravidlo 16 % nebo pravidlo „max“).
- Mezní hodnota v mikrometrech.
- Způsob zpracování.
- Uspořádání povrchu a směr nerovností (směr stop po nástroji) podle ISO/CD 1302.
- Výrobní proces. [15]



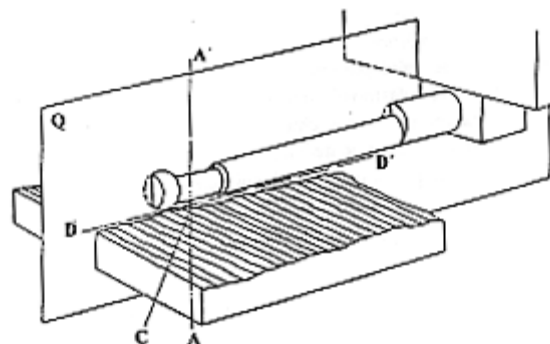
Obr. 27. Označování struktury povrchu v technické výrobní dokumentaci.

3.6 Měření parametrů struktury povrchu

Nerovnosti příslušející drsnosti povrchu mají současně deterministický i stochastický charakter v poměru odpovídající metodě obrábění použité při realizaci plochy. Pro hodnocení drsnosti povrchu se využívá kritérium středního prvku (střední čára profilu). [15]

3.6.1 Princip měření struktury povrchu dotykovými profilometry (dotykovými hrotovými přístroji)

Doposud nejdokonalejší je metoda dotyková, využívající ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu a získává informace o jeho profilu viz. obr. 28.



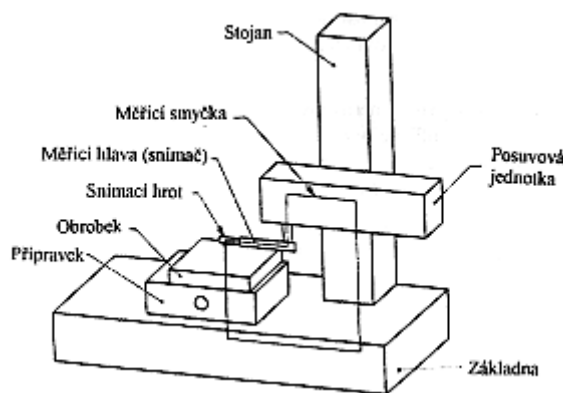
Obr. 28. Dotyková metoda snímání profilu.

A-A'-osa snímacího hrotu, *C*-kontakt hrotu s povrchem,
D-D'-základní směr pohybu, *Q*-rovina řezu.

Jakožto každá metoda narazí na řadu limitujících faktorů, vyplývajících z požadavků konkrétní realizace. Z důvodů protichůdných požadavků musíme volit kompromis.

Metodou zjišťujeme číselné hodnoty normalizovaných i nenormalizovaných charakteristik drsnosti a lze ji využít pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovnosti povrchu.

Realizaci zabezpečuje dotykový profilometr, skládající se z mechanické a elektrické části. Měřicí smyčka dotykového profilometru je uvedena na obr. 29. [15]



Obr. 29. Měřicí smyčka dotykového profilometru.

Mechanický signál od hrotu je v indukčním převodníku transformován na elektrický signál, který je interpretován jako číselná hodnota zvolené charakteristiky drsnosti povrchu, případně jako grafický záznam profilu nerovnosti povrchu.

Snímaný profil měřeného povrchu může být proveden:

- Jako snímání absolutní – měřicí základna je přesná přímá nebo tvarová dráha snímače,
- Jako snímání relativní – základna je dráha generovaná patkou klouzající po povrchu.

Pohyb hrotu podél měřeného povrchu musí být velmi přesný, jeho rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému tak, aby nezanechal stopu. Snímaná dráha začíná v počátečním bodě, zahrnuje rozběh, vyhodnocovanou délku a doběh a končí v koncovém bodě. Snímač se poté vrací zvýšenou rychlostí.

Snímací systémy svými vlastnostmi ovlivňují získaný profil. Kritické jsou:

- Poloměr zaoblení snímacího hrotu (2 λ m, 5 λ m, 10 λ m),
- Vrcholový úhel snímacího hrotu (60°, 90°),
- Měřicí (přítlačná) síla (0,00075 N),
- Rychlost změny měřicí síly.

Při aplikaci dotykové metody se pohybem dotykového hrotu přes nerovnosti získává mechanický signál. Signál je vytvořen sejmutím všech nerovností.

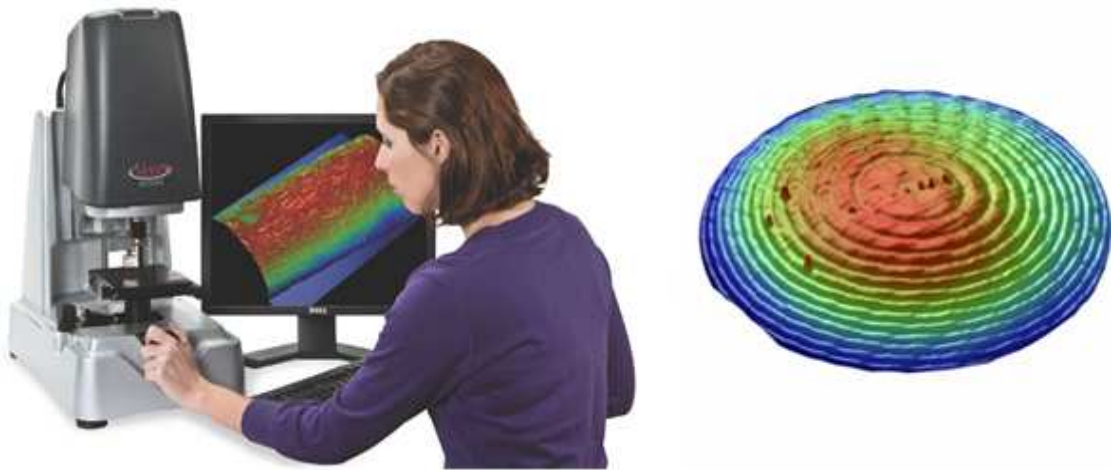
Tyto nerovnosti tvořící strukturu povrchu jsou obecně děleny na:

- Nerovnosti základního profilu
- Vlnitost povrchu
- Drsnost povrchu

Jednotlivé druhy nerovností jsou vyhodnocovány odděleně. To předpokládá oddělit ze směsi signálu jednotlivé složky, které se liší vlnovou délkou. [15]

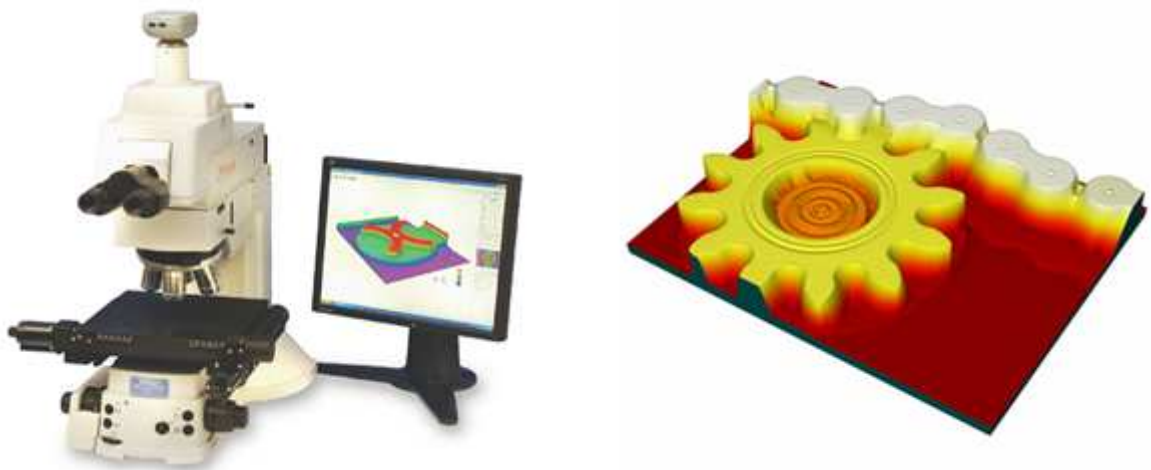
3.6.2 Další metody měření struktury povrchu

Kvantitativní zjišťování tvaru povrchů různých objektů v mikroskopickém i makroskopickém měřítku je velmi častou úlohou, která se vyskytuje ve vědě i průmyslu. Absolutní měření tvaru nebo relativní porovnávání s nějakým referenčním tvarem se dá principiálně provádět pomocí různých měřicích metod, jež fungují na odlišných fyzikálně-technických principech. Velmi často se pro tuto problematiku využívají interferometrické metody, které aplikují princip dvousvazkové nebo vícesvazkové optické interferometrie pomocí monochromatického nebo polychromatického optického záření. Lze měřit jak opticky hladké tak i opticky drsné povrchy a určovat drsnost povrchů. V praxi probíhá buď snímání celé měřené oblasti v reálném čase, nebo se provádí skenování vyšetřovaných vzorků.



Obr. 30. Interferometrická metoda snímání povrchu.

Dalšími metodami jsou mikroskopické metody, např. konfokální skenovací mikroskopie, holografické mikroskopie nebo skenovací optická mikroskopie blízkého pole (SNOM). Tyto metody umožňují charakterizovat povrchy s vysokou přesností ve velmi malých oblastech.



Obr. 31. Mikroskopická metoda snímání povrchu.

Na bázi konfokálního principu při měření s polychromatickým zdrojem záření pracují též senzory, které využívají spektrální informace pro velmi přesné měření výšky povrchu. Touto metodou je možné měřit i tloušťky vrstev nebo vzdálenosti.



Obr. 32. Snímání povrchu pomocí polychromatického záření.

/

Tvar povrchu lze získat i pomocí fotogrammetrických metod a metodami laserového skenování. Jiné metody a přístroje pracují na principu optické deflektometrie či projekčních technik. Tyto metody umožňují měření 3D topografie v reálném čase s dostatečnou přesností, což je možno využít u průmyslových systémů kontroly.



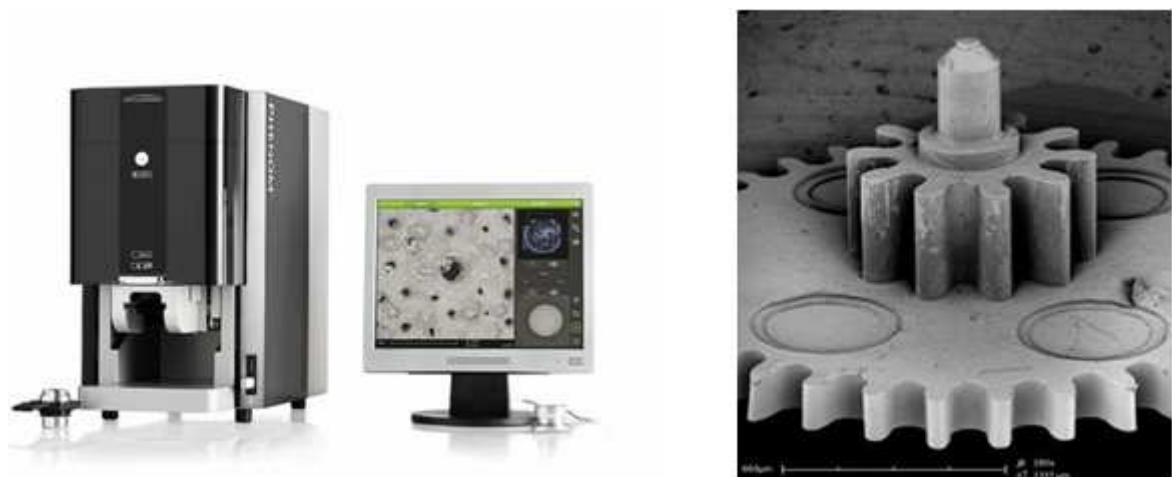
Obr. 33. Laserové skenování a fotografická metoda snímání povrchu.

Pro kvantitativní měření drsnosti povrchů, jejíž určování je důležité v průmyslové praxi, se často též používají optické rozptylové metody založené na měření intenzity rozptýleného světla po odrazu na měřeném povrchu.



Obr. 34. Optická rozptylová metoda snímání povrchu.

Kromě optických metod samozřejmě existují i další bezkontaktní metody charakterizace povrchů a jejich tvaru. Jedná se zejména o metody elektronové mikroskopie (SEM – Scanning Electron Microscopy, TEM – Transmission Electron Microscopy). Tyto metody umožňují zkoumat mikrostrukturu povrchů různých typů materiálů. [18]



Obr. 35. Elektronová mikroskopie.

4 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRÁCE

Teoretická část diplomové práce se věnuje jednotlivým druhům nekonvenčních metod obrábění. Popisuje jejich principy a zákonitosti, na základě čehož jsou rozděleny do jednotlivých druhů nekonvenčních metod. Přičemž jsou rozděleny do skupin jako mechanické, chemické, elektrochemické, elektrotepelné a ty jsou dále ještě podrobněji rozděleny a vysvětleny. Největší prostor je věnován elektrotepelným procesům a nejvíce pak metodě WEDM neboli obrábění drátovou elektrodou, jelikož na principech metody WEDM je založena diplomová práce.

Protože nekonvenční metody bývají zařazeny do CAD/CAM systémů, je další kapitola věnována programování CNC strojů, ve které jsou podrobně popsány typy programování a struktura programu i s jednotlivými příkazy.

V poslední kapitole se práce věnuje jakosti povrchu, popisuje metody měření a vyhodnocování, neboť práce je zaměřena na jakost povrchu při WEDM.

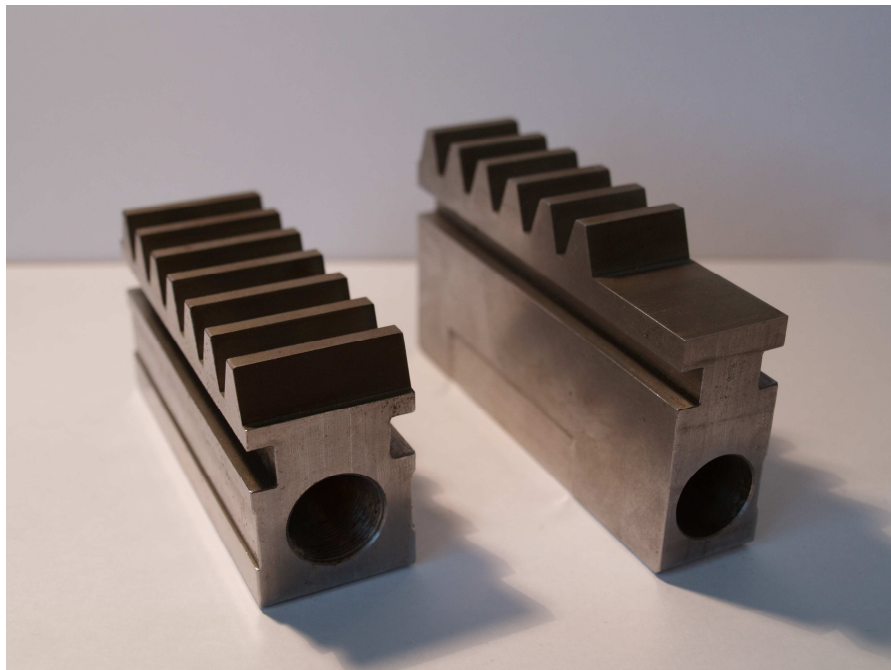
Cílem praktické části diplomové práce, bude zkoumání vlivů technologických podmínek na jakost povrchu při obrábění drátovou elektrodou. Tyto podmínky dále poslouží v technické praxi pro daný konkrétní případ. Nejvhodnější podmínky budou zjišťovány na vzorcích a dále budou tyto vzorky podrobeny měření struktury povrchu na dotekovém profilometru v dílnách univerzity. Zjištěné informace budou vyhodnoceny a budou určeny nejvhodnější technologické podmínky řezu, které poslouží ve výrobě daného dílce.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 VÝZNAM PRAKTICKÉ ČÁSTI PRO TECHNICKOU PRAXI

Samotný význam praktické části je založen na zjištění kvality povrchu konkrétních výrobků z technické praxe, kde na dílech – ozubených hřebenech byla na výkresové dokumentaci předepsána rozdílná hodnota opracování. Tyto díly byly vyráběny firmou Gotech, sídlící ve Zlíně.

Firma Gotech se zabývá servisem a zejména generálními opravami vícevřetenových automatů, pro které byly i posuzované hřebeny vyráběny. Firma Gotech vlastní stroj AGIE AgieCut Excellence 2, kterého bylo použito pro výrobu hřebenů. Jelikož firma Gotech nemá vlastní technické vybavení pro zjišťování kvality povrchu, byly vzorky podrobeny měření v dílnách univerzity. Finální podoba konkrétních dílů, viz obr. 36. a výkresová dokumentace viz. příloha I a II.



Obr. 36. Hřebeny

6 TECHNICKÉ A MATERIÁLOVÉ ZABEZPEČENÍ

Pro měření kvality povrchu na zkušebních vzorcích bylo zapotřebí tyto vzorky vyrobít. Byla vytvořena kontura v programu SolidWorks 2010, poté byla tato kontura převedena na ISO kód v programu EdgeCam 2010. Tento ISO kód byl pomocí paměťového zařízení přenesen do drátové řezačky typu AGIE AgieCut Excellence 2. Na drátové řezačce byly voleny podmínky řezu pro zjišťování vhodnosti těchto podmínek na kvalitu povrchu.

6.1 AGIE AgieCut Excellence 2

Základní údaje:

- s vodní lázní nebo sprchou (V/S)
- rozjezdy os X/Y/Z 350x250x256 mm
- rozměr obrobku X/Y/Z 750x550x250 mm
- váha obrobku do (V/S) 200/450 kg
- max. úhel náklonu 30°/100 mm
- průměr drátu 0,1-0,33 mm
- max. Ra 0,1 μm
- T_{km} tvarová tolerance $\pm 1,5 \mu\text{m}$
- výkon (D0.33/ocel 50mm) 300 m²/min
- CNC řízení AGIE VISION
- generátor AGIE HSS
- integrovaný agregát dielektrika
- externí chlazení [19]



Obr. 37. Drátová řezačka AGIE AgieCut Excellence 2

6.2 Typy drátových elektrod

Pro práci byly použity drátové elektrody od firmy Bedra Berkenhoff. Je to jeden z největších a nejznámějších výrobců mosazných a povlakovaných řezacích drátů na světě, známý vynikající kvalitou svých výrobků s více než stoletou tradicí. Pro zjišťování vhodných podmínek byly použity dva typy drátových elektrod a to mosazný drát BercoCut Pro H CuZn37 a povlakovaný rychlořezný drát CobraCut A

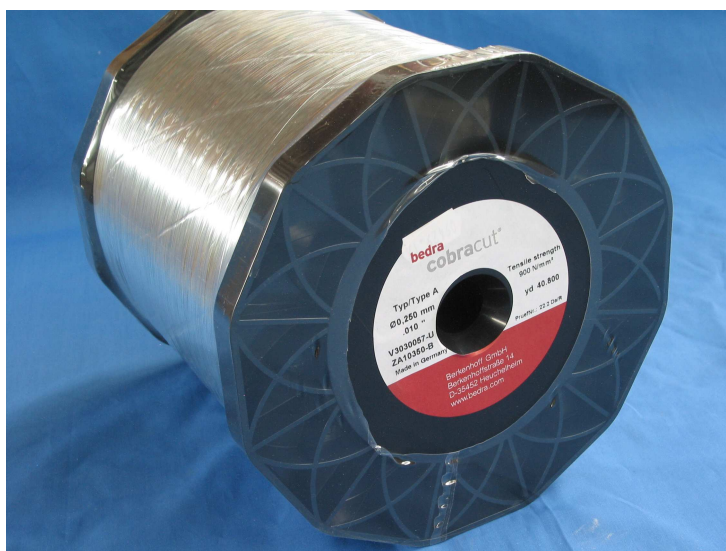
6.2.1 Mosazný drát BercoCut Pro H CuZn37

- Dodávané pevnosti v tahu: 900 Nmm^2
- Dodávané průměry drátu: 0,25; 0,30 mm
- Dodáván na cívkách: K160 - 8 kg; K200 - 16 kg; P5 - 5 kg; P10 - 10 kg
- Určený pro všechny typy drátových řezaček.

6.2.2 Povlakovaný rychlořezný drát CobraCut A

- Dodávané pevnosti v tahu: 500; 600; 800 a 900 Nmm²
- Typy (dle pevnosti v tahu): CobraCut, CobraCut A; G; B; D; S
- Dodávané průměry drátu: 0,07; 0,1; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30 mm
- Dodáván na cívkách: K100 - 1,6 kg; K125 - 3,5 kg; K160 - 6 kg; K200 - 16 kg; K250 - 25 kg; K355 - 45 kg

Byl použit drát s pevností v tahu 900 Nmm². [20]



Obr. 38. Drátová elektroda Cobra cut A

6.3 Materiál vzorků

Jelikož cílem bylo vyhodnotit vhodné podmínky pro konkrétní případ výroby konkrétního dílu, u kterého byl předepsán materiál se zkráceným označením C45 (ČSN 12 050), byl tento materiál použit i u zkušebních vzorků.

6.4 Drsnoměr Mitutoyo

Pro měření drsnosti povrchu vzorků bylo použito zařízení Mitutoyo Surf test SJ – 301.

- Přenosný drsnoměr s prachutěsným, na dotek citlivým ovládacím displejem a vestavěnou tiskárnou.
- Velký LCD displej pro snadnější odečítání naměřených hodnot a vypočítaných křivek.

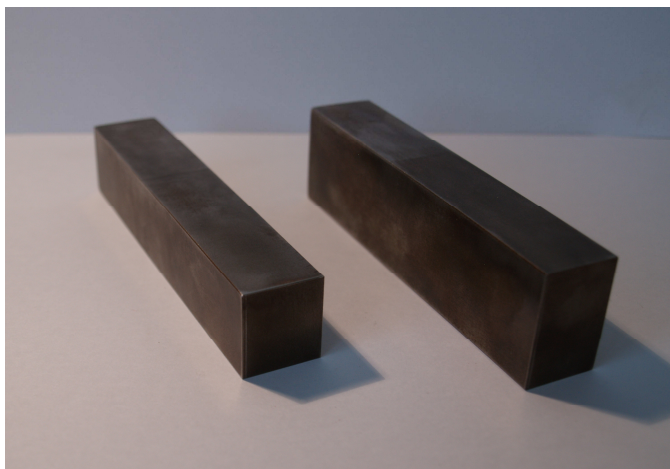
- Pomocí vestavěné termotiskárny, lze nechat rychle a čitelně vytisknout výsledky v různých formátech.
- Velká prachutěsná tlačítka pro výběr měřících funkcí a ovládací displej včetně tužky pro nastavení podmínek měření usnadňují a urychlují ovládání přístroje.
- SurfTest SJ-301 ukládá do paměti až 5 různých podmínek měření. Naměřené hodnoty lze uložit do PC.
- Odpovídá mezinárodním normám: DIN, ISO, ANSI, JIS a VDA.
- Naměřené hodnoty mohou být uloženy do paměti a později zpracovány nebo vytisknuty.
- Při použití přídatné paměťové karty je možné uložit do paměti až 20 podmínek měření souborů naměřených a statistických dat.
- Rozsah zobrazení: Ra, Rq: 0,01 μm - 100 μm , Ry, Rz, Rt, Rv, R3z, Rk, Rpk, Rvk, Rp, Rx, AR, W, Wx, Wte: 0,02 μm - 350 μm , S, Sm: 2 μm - 4000 μm , HSC, Pc: 2,5/cm - 5000/cm; Ppi: 6,35 - 12700/ inch, dc: - 350 μm - + 350 μm , Lo: 0,1 mm - 99,999 mm, mr, Mr 1, Mr 2: 0 - 100 %, A1, A2: 0 - 15000 Δa , Δq , Ku: 0,01-100, Vo: 0;0000-999,99. 178-952- [21]



Obr. 39. Drsnoměr Mitutoyo

7 VÝROBA VZORKŮ

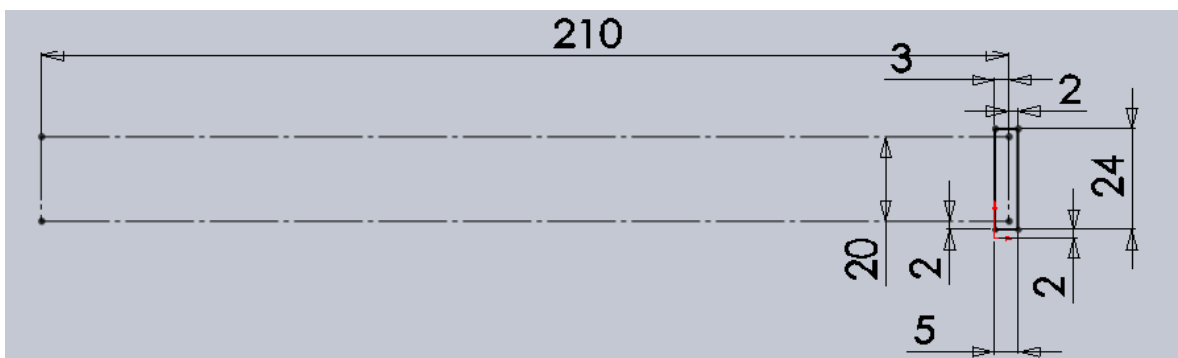
Rozměry vzorků byly voleny tak, aby měly dostatečnou plochu pro následné měření kvality povrchu a hlavně tak, aby jejich rozměry odpovídaly konkrétním dílům. Na frézce byly vytvořeny dva polotovary, tak aby každý měl rozdílnou výšku, která odpovídala příslušným dílům, jeden měl výšku 22 mm a druhý 30 mm. Následná měřená plocha první části vzorků měla tedy rozměry 20 mm x 22 mm a druhá část vzorků 20 mm x 30 mm. Tloušťka vzorků byla zvolena 3 mm.



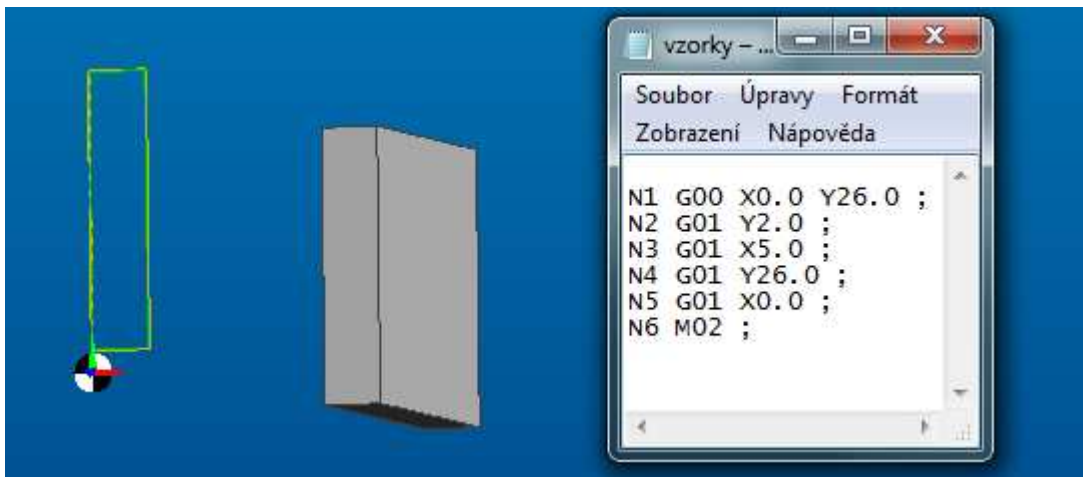
Obr. 40. Polotovar pro vzorky

7.1 Tvorba v použitých programech

V programu SolidWorks byl vytvořen model dílu viz. obr. 41., který byl převeden do programu EdgeCam viz. obr. 42, zde byla vynesena kontura a vytvořen ISO kód a ten byl pomocí paměťového média nahrán do drátové řezačky.



Obr. 41. Tvorba modelu vzorků v programu SolidWorks



Obr. 42. Kontura a ISO kód z programu EdgeCam

7.2 Práce na drátové řezačce AgieCut Excellence 2

Práce na drátové řezačce spočívala v hledání nejvhodnějších podmínek řezu, a to tak, že byly měněny jednotlivé parametry a byl zkoumán jejich vliv na jakost povrchu. Všechny proměnné parametry byly opakovaně použity pro rozdílně nastavenou kvalitu povrchu a to Ra2,3; Ra1,8; Ra0,7 a Ra0,3. Byly měněny čtyři parametry:

- Typ drátové elektrody: povlakovaná elektroda a mosazná elektroda
- Síla výplachu: maximální 18 l/min a minimální 0,2 l/min
- Rychlost odtahu drátu: maximální 0,3 m/s a minimální 0,03 mm/s
- Vliv mezery mezi horní hlavou a dílem: 0 mm a 8 mm

Vliv mezery mezi horní hlavou a dílem byl posuzován, protože hřebeny, pro které byly vhodné podmínky řezu zjišťovány, měly rozdílnou výšku, tedy materiál, který byl řezán. V technickém vybavení drátové řezačky byl prizmatický upínač, který byl použit pro upnutí hřebenu. Technické provedení upínače umožňovalo pojezd horní hlavy pouze ve výšce Z 30 mm. Z toho důvodu byl posuzován vliv mezery mezi horní hlavou a dílem, který v našem případě byl 0 mm a 8 mm.

Posloupnost jednotlivých nastavených parametrů pro příslušné vzorky viz. tab. 7, 8, 9, 10.

Tab. 7. Technologické podmínky pro vzorky 1 - 16

č. v.	Přednastavená hodnota Ra [μm]	Drát	Odtah [m/S]	Výplach [l/min]	Výška [mm]
1.	2,3	mosazný	0,3	18	30
2.	2,3	mosazný	0,3	0,2	30
3.	2,3	mosazný	0,03	18	30
4.	2,3	mosazný	0,03	0,2	30
5.	1,8	mosazný	0,3	18	30
6.	1,8	mosazný	0,3	0,2	30
7.	1,8	mosazný	0,03	18	30
8.	1,8	mosazný	0,03	0,2	30
9.	0,7	mosazný	0,3	18	30
10.	0,7	mosazný	0,3	0,2	30
11.	0,7	mosazný	0,03	18	30
12.	0,7	mosazný	0,03	0,2	30
13.	0,3	mosazný	0,3	18	30
14.	0,3	mosazný	0,3	0,2	30
15.	0,3	mosazný	0,03	18	30
16.	0,3	mosazný	0,03	0,2	30

Tab. 8. Technologické podmínky pro vzorky 17 - 32

č. v.	Přednastavená hodnota Ra [μm]	Drát	Odtah [m/S]	Výplach [l/min]	Výška [mm]
17.	2,3	povlakovaný	0,3	18	30
18.	2,3	povlakovaný	0,3	0,2	30
19.	2,3	povlakovaný	0,03	18	30
20.	2,3	povlakovaný	0,03	0,2	30
21.	1,8	povlakovaný	0,3	18	30
22.	1,8	povlakovaný	0,3	0,2	30
23.	1,8	povlakovaný	0,03	18	30
24.	1,8	povlakovaný	0,03	0,2	30
25.	0,7	povlakovaný	0,3	18	30
26.	0,7	povlakovaný	0,3	0,2	30
27.	0,7	povlakovaný	0,03	18	30
28.	0,7	povlakovaný	0,03	0,2	30
29.	0,3	povlakovaný	0,3	18	30
30.	0,3	povlakovaný	0,3	0,2	30
31.	0,3	povlakovaný	0,03	18	30
32.	0,3	povlakovaný	0,03	0,2	30

Tab. 9. Technologické podmínky pro vzorky 33 - 48

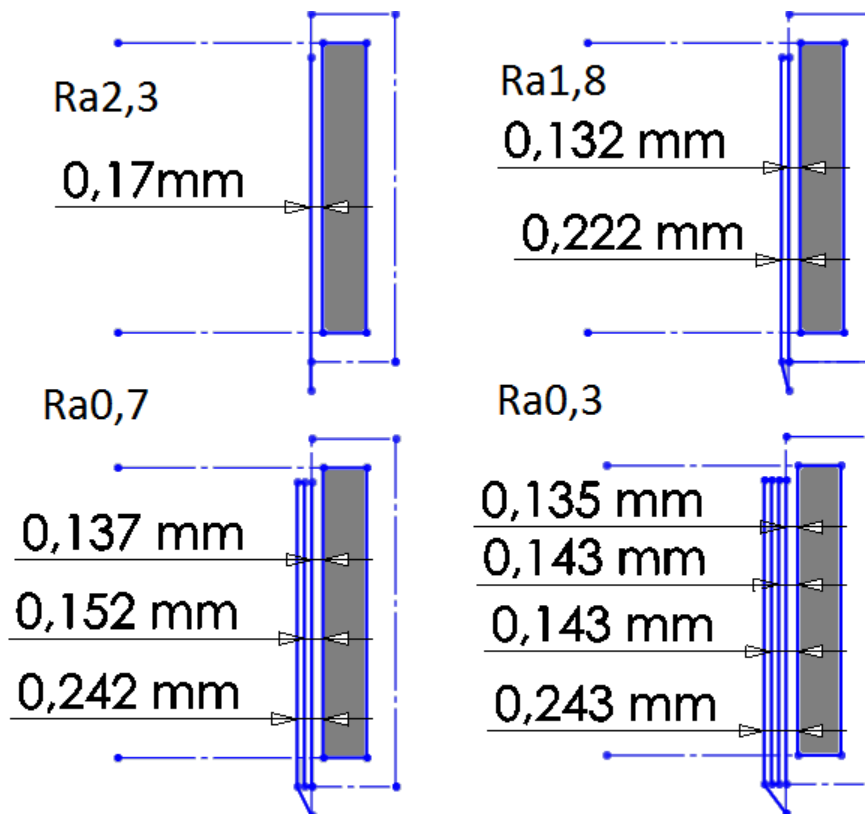
č. v.	Přednastavená hodnota Ra [μm]	Drát	Odtah [m/S]	Výplach [l/min]	Výška [mm]
33.	2,3	mosazný	0,3	18	22
34.	2,3	mosazný	0,3	0,2	22
35.	2,3	mosazný	0,03	18	22
36.	2,3	mosazný	0,03	0,2	22
37.	1,8	mosazný	0,3	18	22
38.	1,8	mosazný	0,3	0,2	22
39.	1,8	mosazný	0,03	18	22
40.	1,8	mosazný	0,03	0,2	22
41.	0,7	mosazný	0,3	18	22
42.	0,7	mosazný	0,3	0,2	22
43.	0,7	mosazný	0,03	18	22
44.	0,7	mosazný	0,03	0,2	22
45.	0,3	mosazný	0,3	18	22
46.	0,3	mosazný	0,3	0,2	22
47.	0,3	mosazný	0,03	18	22
48.	0,3	mosazný	0,03	0,2	22

Tab. 10. Technologické podmínky pro vzorky 49 - 64

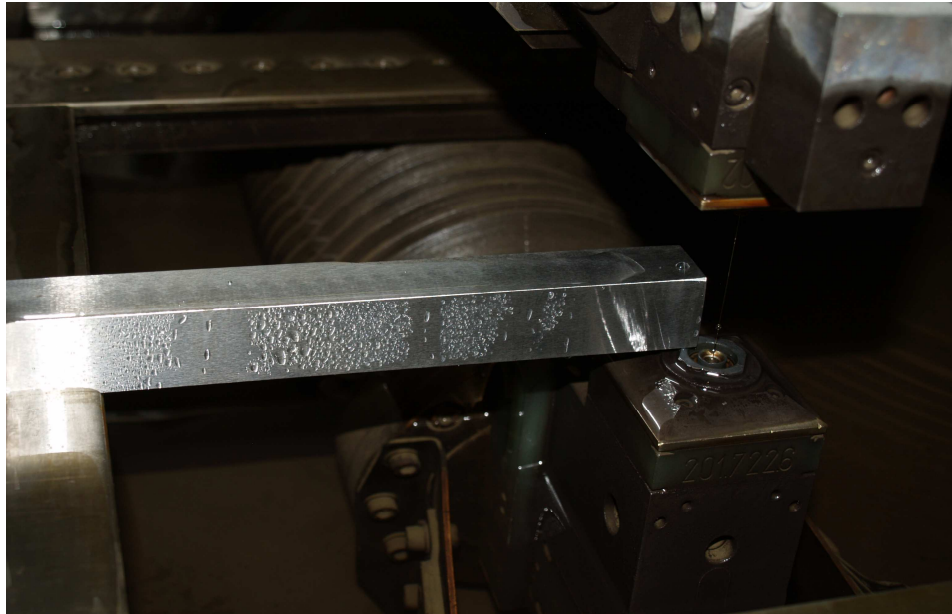
č. v.	Přednastavená hodnota Ra [μm]	Drát	Odtah [m/S]	Výplach [l/min]	Výška [mm]
49.	2,3	povlakovaný	0,3	18	22
50.	2,3	povlakovaný	0,3	0,2	22
51.	2,3	povlakovaný	0,03	18	22
52.	2,3	povlakovaný	0,03	0,2	22
53.	1,8	povlakovaný	0,3	18	22
54.	1,8	povlakovaný	0,3	0,2	22
55.	1,8	povlakovaný	0,03	18	22
56.	1,8	povlakovaný	0,03	0,2	22
57.	0,7	povlakovaný	0,3	18	22
58.	0,7	povlakovaný	0,3	0,2	22
59.	0,7	povlakovaný	0,03	18	22
60.	0,7	povlakovaný	0,03	0,2	22
61.	0,3	povlakovaný	0,3	18	22
62.	0,3	povlakovaný	0,3	0,2	22
63.	0,3	povlakovaný	0,03	18	22
64.	0,3	povlakovaný	0,03	0,2	22

7.2.1 Samotná výroba jednotlivých vzorků

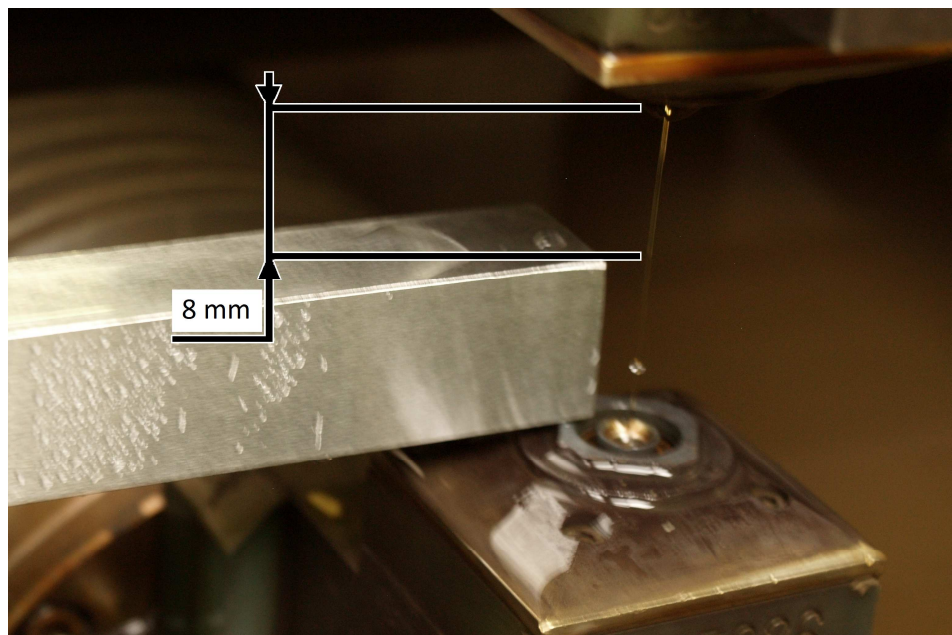
Výroba vzorků na drátové řezačce započala upnutím polotovarů, nachystáním příslušné drátové elektrody a volení podmínek pro každý další vzorek. Je nutné poznamenat, že jednotlivé podmínky byly opakovaně voleny pro čtyři přednastavené stupně opracování povrchu. Drátová řezačka pracuje tak, že nejnižší opracování, které nabízí a v tomto případě se jedná o Ra 2,3, je vytvářeno jedním řezem a každý další vyšší stupeň opracování dalším přidaným řezem - čistícím řezem. To znamená, že jednotlivé nastavené kvality povrchu byly tvořeny následujícím počtem řezů, Ra 2,7 – 1 řez, Ra 1,8 – 2 řezy, Ra 0,7 – 3 řezy a Ra 0,3 – 4 řezy. Vzdálenostní rozdíly poloh jednotlivých řezů pro různě nastavená Ra. viz obr. 43.



Obr. 43. Rozdíly poloh jednotlivých řezů

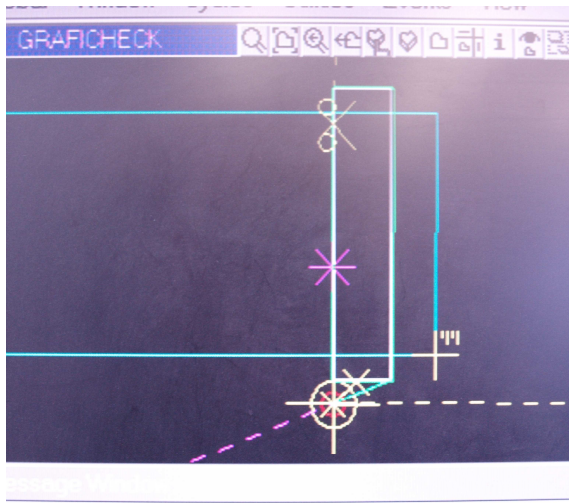


Obr. 44. Polotovár v pracovní vaně

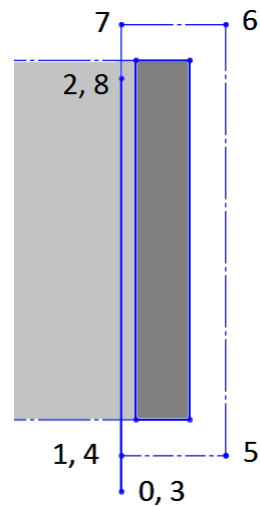


Obr. 45. Mezera mezi hlavou a dílem

Na následujících obrázcích je zobrazen detail polohy drátové elektrody pro jednotlivé řezy pro různá opracování. A je také zobrazen detail počtu drah pro jednotlivá opracování. Na obrázcích jsou rozpoznat zelené čáry, příslušející počtu řezů a bílá čára odpovídající výslednému tvaru.



Obr. 46. Detail pro Ra 2,3 – 1 řez



Obr. 47. Pohyb drátové elektrody pro Ra 2,3

0 začátek programu

0 – 1 najetí na počátek kontury – rychloposuv, v bodě 1 změna na řezné parametry

1 – 2 řezný proces, v bodě 2 stříhnutí drátové elektrody

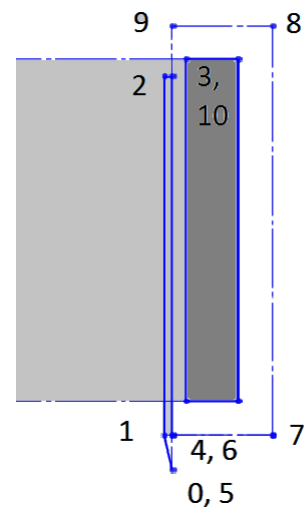
2 – 3 rychloposuv

3 – 4 najetí na počátek kontury – rychloposuv, v bodě 4 změna na parametry odříznutí můstku

4 – 8 odříznutí můstku, poté následuje konec programu a odjetí do nulového bodu.

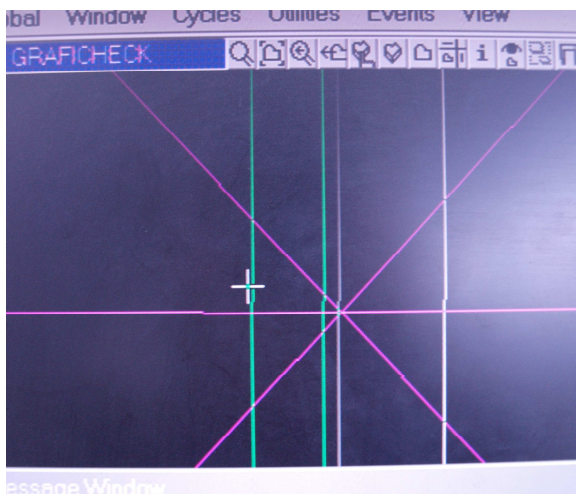


Obr. 48. Detail pro Ra 1,8 -2 řezy

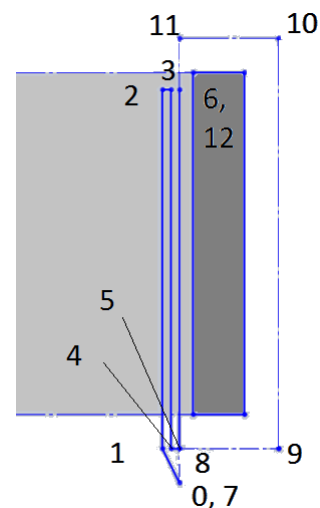


Obr. 49. Pohyb drátové elektrody pro Ra 1,8

- 0 začátek programu
- 0 – 1 najetí na počátek kontury – rychloposuv, v bodě 1 změna na řezné parametry
- 1 – 4 řezný proces, v bodě 4 stříhnutí drátové elektrody
- 4 – 5 rychloposuv
- 5 – 6 najetí na počátek kontury – rychloposuv, v bodě 6 změna na parametry odříznutí můstku
- 6 – 10 odříznutí můstku, poté následuje konec programu a odjetí do nulového bodu.



Obr. 50. Detail pro Ra 0,7 – 3 řezy



Obr. 51. Pohyb drátové elektrody pro Ra 0,7

- 0 začátek programu
- 0 – 1 najetí na počátek kontury – rychloposuv, v bodě 1 změna na řezné parametry
- 1 – 6 řezný proces, v bodě 6 stříhnutí drátové elektrody
- 6 – 7 rychloposuv
- 7 – 8 najetí na počátek kontury – rychloposuv, v bodě 8 změna na parametry odříznutí můstku
- 8 – 12 odříznutí můstku, poté následuje konec programu a odjetí do nulového bodu.



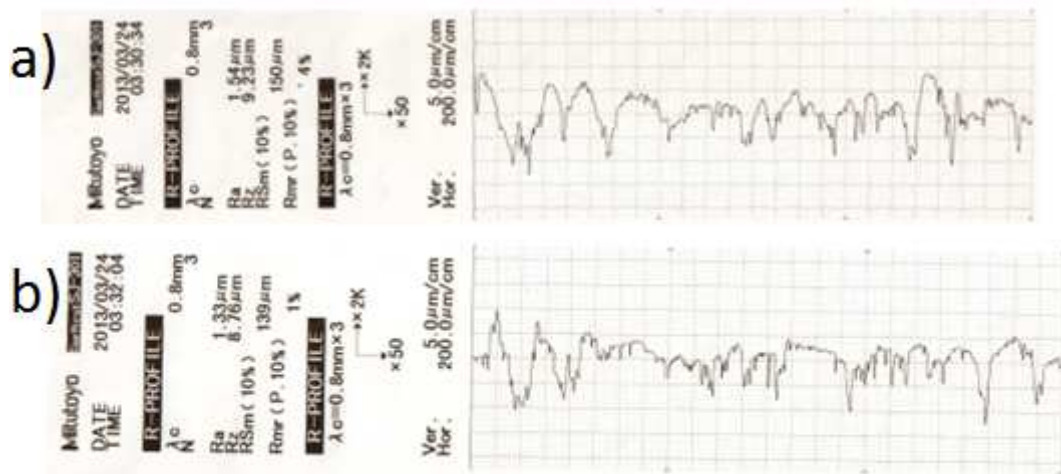
Obr. 54. Vzorky 1 – 32 výška 30 mm



Obr. 55. Vzorky 33 – 64 výška 22 mm

8 MĚŘENÍ DRSNOSTI

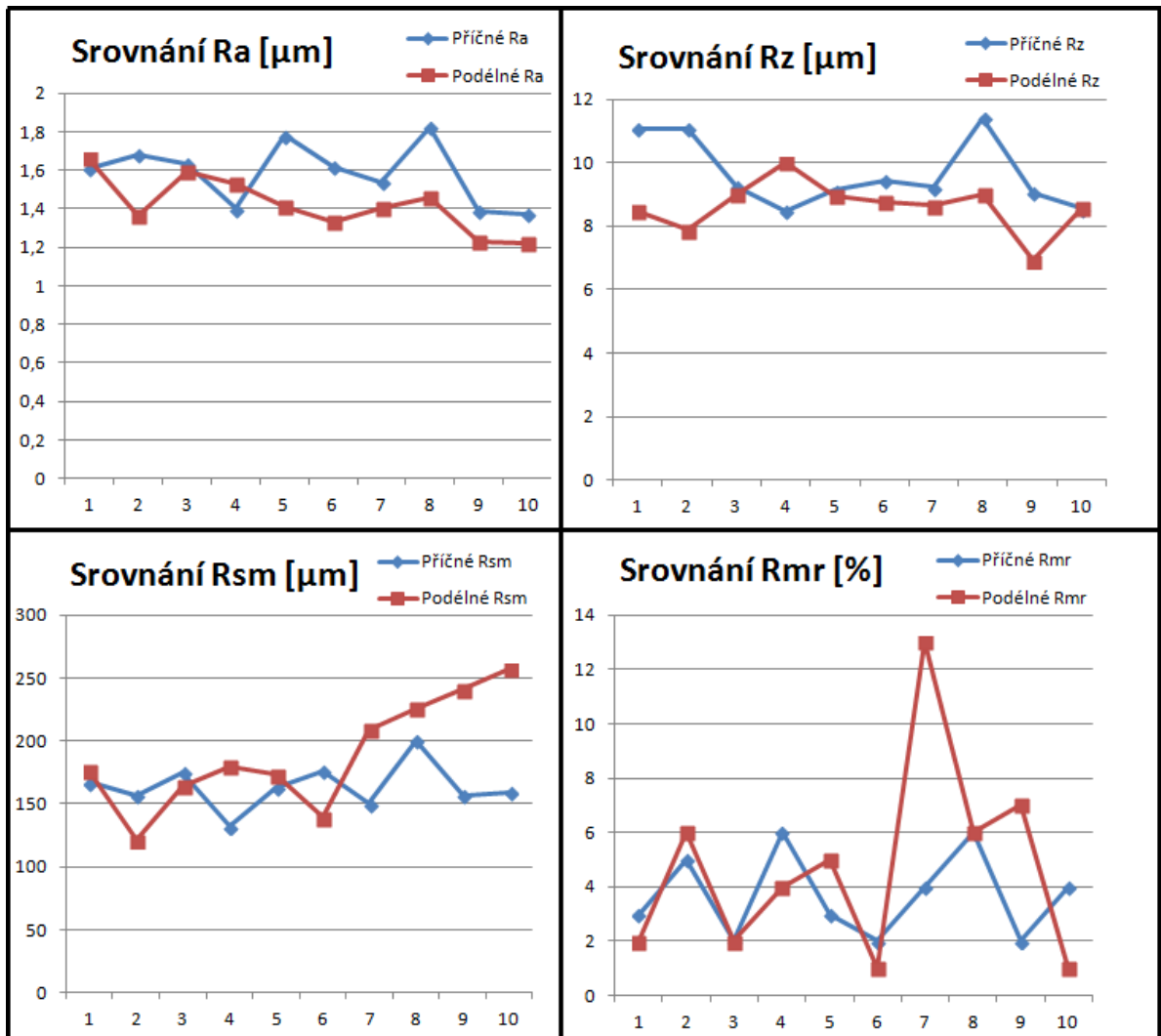
Drsnost se běžně měří ve směru řezu, tedy ve směru, v jakém materiál klade největší odpor proti vnikání nástroje. V případě elektroerozivního obrábění nejde o klasickou metodu, kde by vznikal řezný odpor, protože materiál se během eroze odtavuje. Bylo tedy provedeno srovnávací měření v příčném a podélném směru. Na základě výsledků byl zvolen postup měření pro ostatní vzorky. Byly měřeny parametry R_a , R_z , R_{mr} a R_{sm} .



Obr. 56. Záznam měření profilu drsnosti ve směru a) příčném b) podélném

Tab. 11. Příčné a podélné měření

Příčné měření					Podélné měření				
měření	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{sm} [μm]	R_{mr} [%]	měření	R_a [μm]	R_z [μm]	R_{sm} [μm]	R_{mr} [%]
1.	1,61	11,09	167	3	1.	1,66	8,48	176	2
2.	1,68	11,09	157	5	2.	1,36	7,88	121	6
3.	1,63	9,24	175	2	3.	1,59	9	164	2
4.	1,4	8,48	132	6	4.	1,53	10	180	4
5.	1,78	9,12	163	3	5.	1,41	8,97	173	5
6.	1,62	9,44	176	2	6.	1,33	8,76	139	1
7.	1,54	9,23	150	4	7.	1,4	8,65	209	13
8.	1,82	11,4	200	6	8.	1,46	8,99	226	6
9.	1,39	9,05	157	2	9.	1,23	6,91	241	7
10.	1,37	8,56	159	4	10.	1,22	8,56	257	1
\emptyset	1,584	9,67	163,6	3,7	\emptyset	1,419	8,62	188,6	4,7



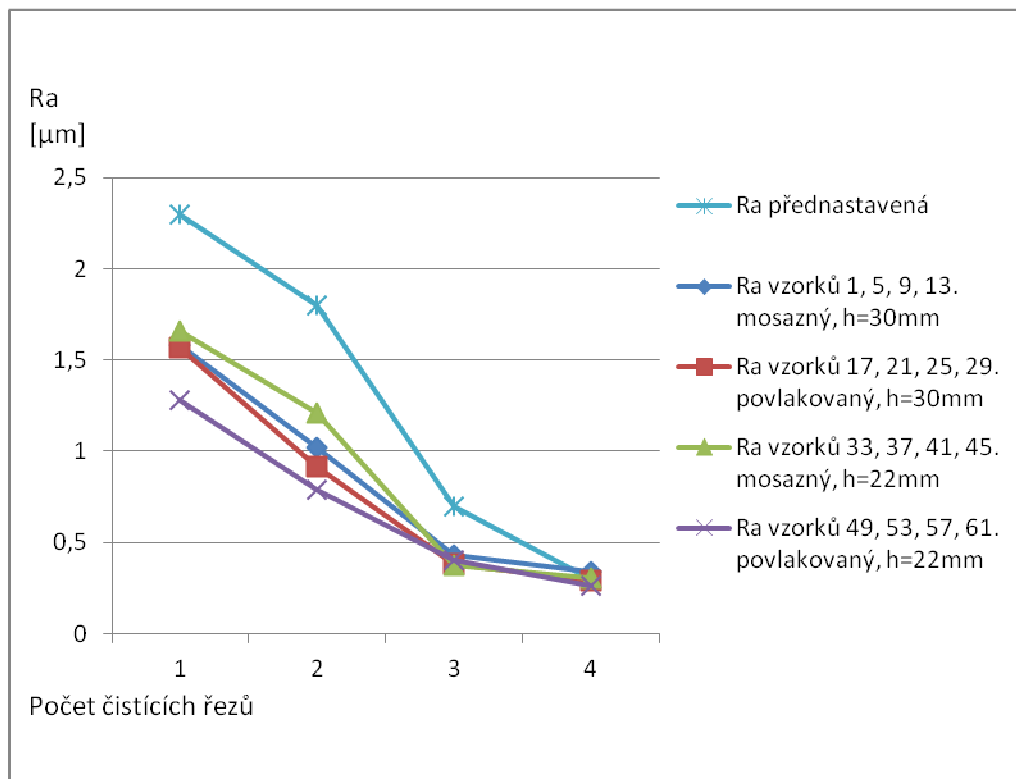
Obr. 57. Časový průběh měření parametrů drsnosti v příčném a podélném směru

Po porovnání výsledků ze série příčného a podélného měření, kde u parametrů Ra a Rz je zřejmé, že příčný směr má nepatrně vyšší hodnoty a parametr Rsm nepatrně nižší, parametr Rmr je v řádech procent přibližně srovnatelný. Z toho bylo vyvozeno, že v příčném směru je drsnost vyšší než v podélném a ostatní vzorky byly podrobeny měření v příčném směru, tedy ve směru vektoru posuvové rychlosti, což je kolmo na vektor odtahu drátové elektrody.

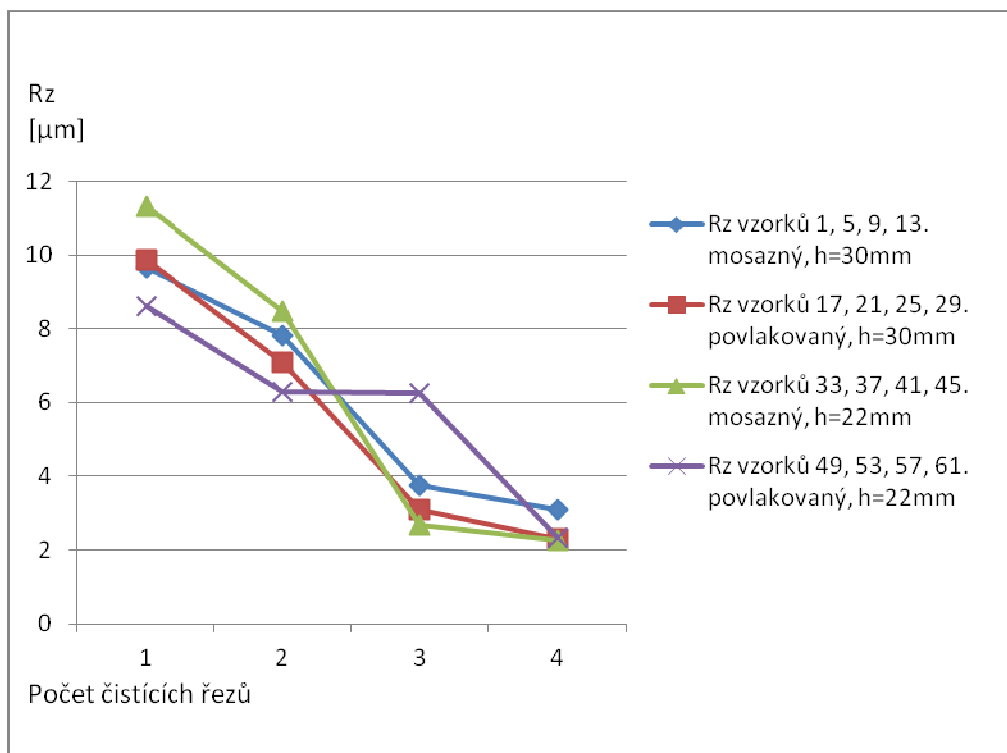
8.1 Měření vzorků

Postup měření na drsnoměru Mitutoyo probíhal tak, že byla na každém vzorku měřena část povrchu ve směru řezu a ve směru odtahu drátové elektrody. Na každém vzorku bylo provedeno měření 10x. Naměřené hodnoty byly zadávány do tabulek a znázorněny v grafech viz. níže. Princip zadávání do grafů byl volen tak, že vždy stejně navolené parametry (typ drátové elektrody, výška dílce - vliv mezery, rychlost odtahu drátové elektrody, síla výplachu), byly vyneseny do jednoho grafu společně se čtyřmi přednastavenými stupni opracování (Ra2,3; Ra1,8; Ra0,7; Ra0,3).

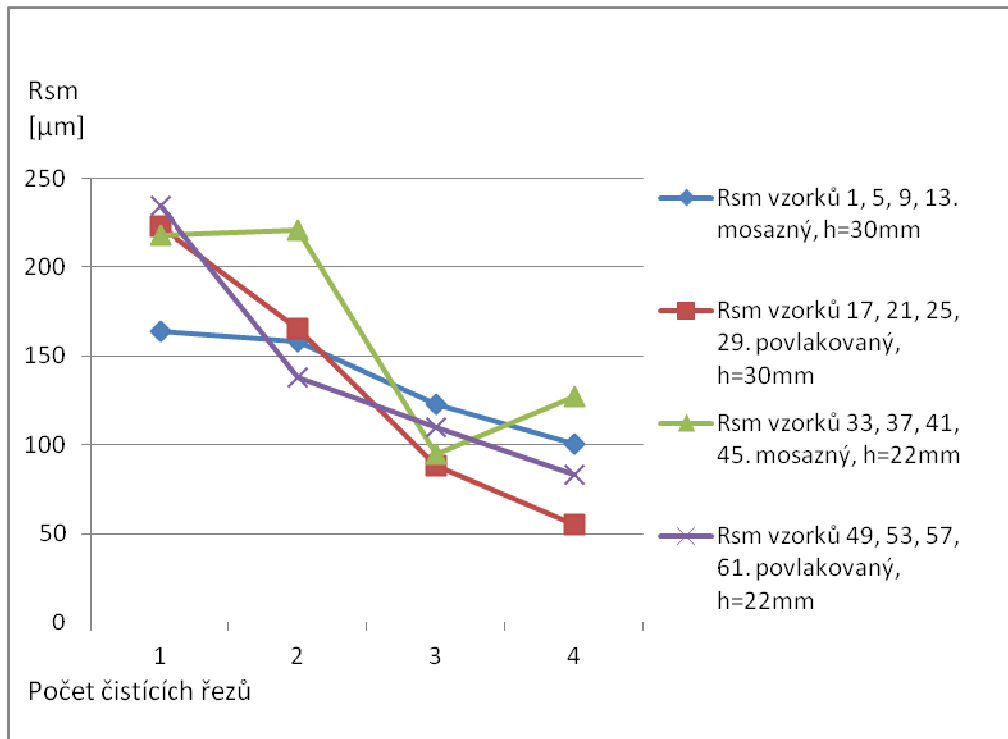
veného Ra se snižuje, ale vždy dosahuje nižších hodnot. I ostatní parametry ukazují na skutečnost, že povlakovaná drátová elektroda je vhodnější.



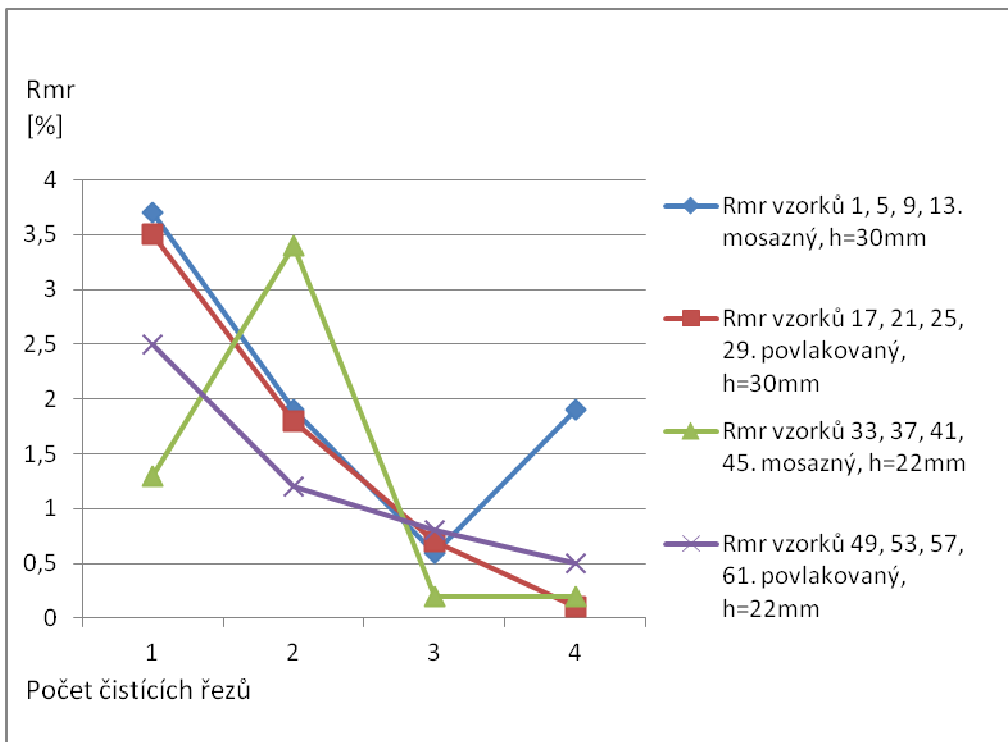
Obr. 58. Graf porovnání Ra při odtahu drátu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min



Obr. 59. Graf porovnání Rz při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min



Obr. 60. Graf porovnání Rsm při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min



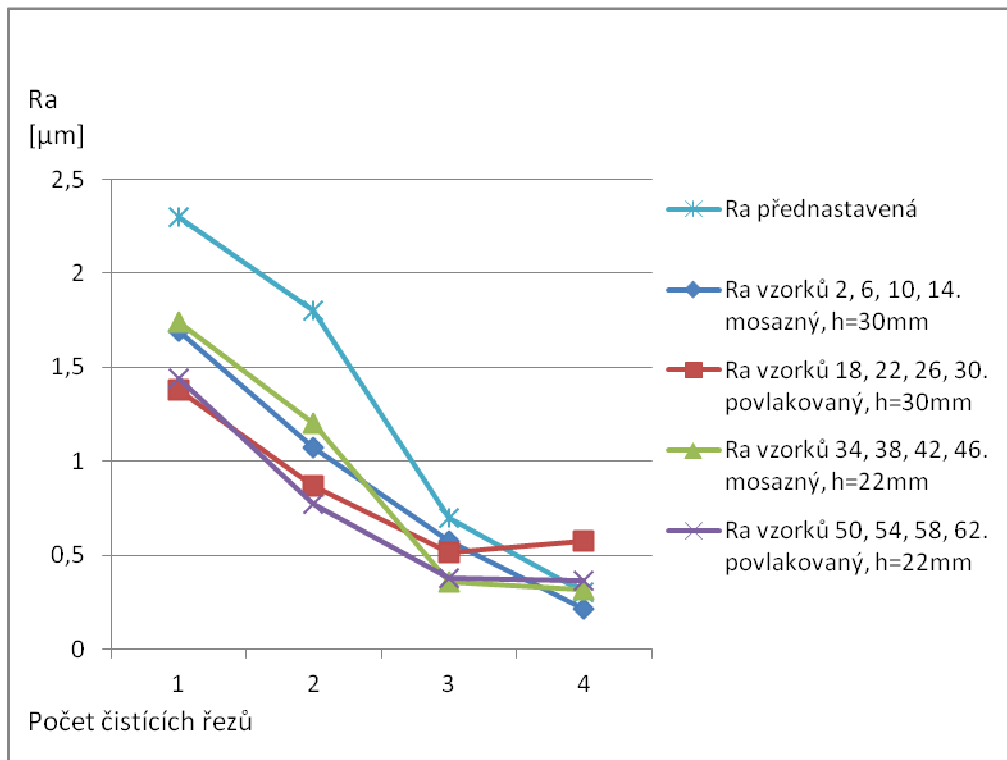
Obr. 61. Graf porovnání Rmr při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min

Tab. 13. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min

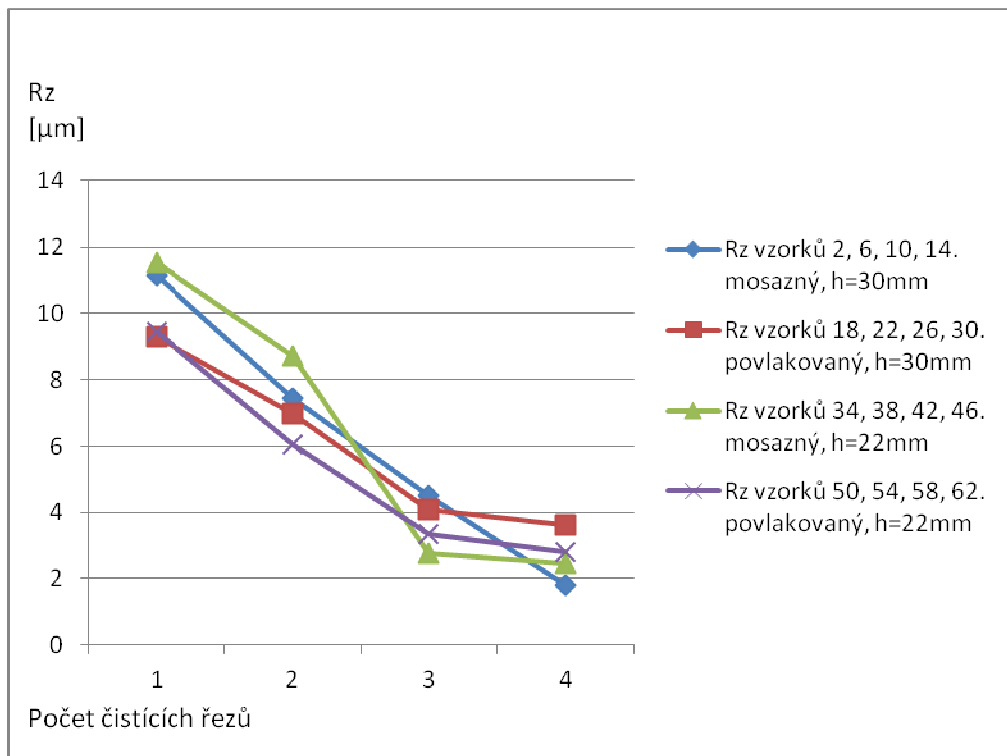
ODTAH 0,3 m/s, VÝPLACH 0,2 l/min							
č. vzorku	nastavené Ra [μm]	drátová elektroda	mezera [mm]	\emptyset Ra [μm]	\emptyset Rz [μm]	\emptyset Rsm [μm]	\emptyset Rmr [%]
2.	2,3	mosazná	0	1,69± 0,15	11,17± 1,05	195± 33,65	3,5± 2,22
6.	1,8	mosazná	0	1,07± 0,19	7,46± 0,85	141± 19,9	2,5± 2,22
10.	0,7	mosazná	0	0,57± 0,05	4,51± 0,51	69,2± 11,13	0,5± 0,71
14.	0,3	mosazná	0	0,22± 0,02	1,8± 0,15	86,2± 18,61	0,1± 0,32
18.	2,3	povlakovaná	0	1,38± 0,12	9,31± 1,02	215± 41,88	2,4± 1,51
22.	1,8	povlakovaná	0	0,87± 0,09	6,97± 0,68	171± 20,46	0,4± 0,52
26.	0,7	povlakovaná	0	0,52± 0,04	4,08± 0,41	87± 11,08	1,9± 1,2
30.	0,3	povlakovaná	0	0,57± 0,15	3,61± 0,69	63,4± 18	0,1± 0,32
34.	2,3	mosazná	8	1,74± 0,28	11,56± 1,65	244± 35,36	2,6± 2,17
38.	1,8	mosazná	8	1,2± 0,1	8,71± 0,53	146± 34,92	1,6± 0,97
42.	0,7	mosazná	8	0,36± 0,03	2,79± 0,33	84,3± 9,6	0,3± 0,67
46.	0,3	mosazná	8	0,32± 0,07	2,48± 0,42	114± 19,2	6± 0,52
50.	2,3	povlakovaná	8	1,44± 0,21	9,45± 2,05	212± 45,33	3,3± 1,16
54.	1,8	povlakovaná	8	0,77± 0,12	6,07± 1,47	136± 42,37	0,9± 0,74
58.	0,7	povlakovaná	8	0,38± 0,05	3,34± 0,56	120± 17,9	0,3± 0,48
62.	0,3	povlakovaná	8	0,36± 0,05	2,83± 0,25	109± 23,33	0,8± 1,32

Z tab. 13. a následujících obrázků je opět viditelné, že i při změně parametru výplachu z 18 l/min na 0,2 l/min, je vhodnější použití povlakované drátové elektrody. I nyní se projevil vliv mezery mezi dílcem a hlavou, ale méně, jelikož se i příslušející křivky protínají. To lze přisuzovat právě síle výplachu, kdy při nižších hodnotách výplachu nemá drát

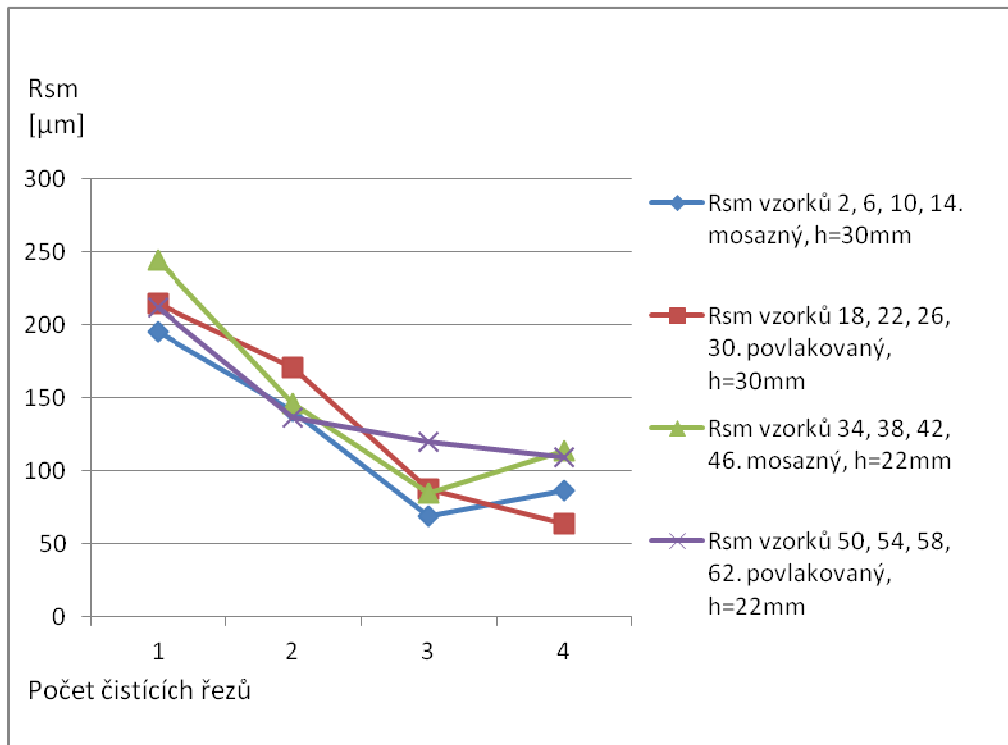
tak klidný chod a odvod odtaveného materiálu není dostačující, může se to projevit právě na kolísání kvality povrchu.



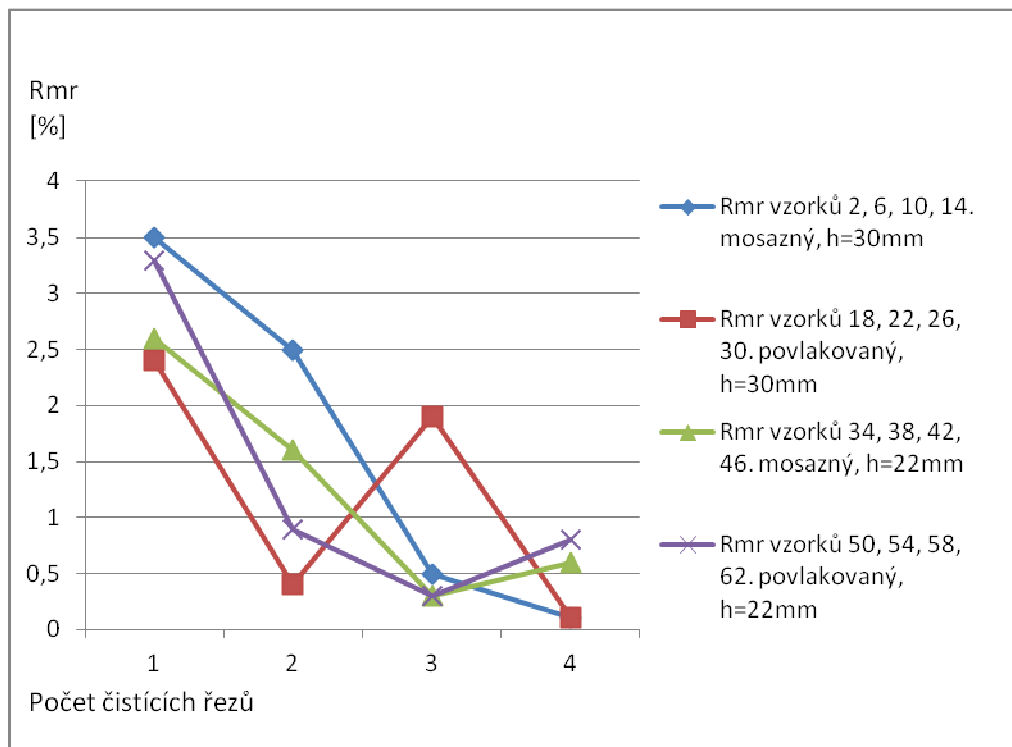
Obr. 62. Graf porovnání Ra při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min



Obr. 63. Graf porovnání Rz při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min



Obr. 64. Graf porovnání Rsm při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min



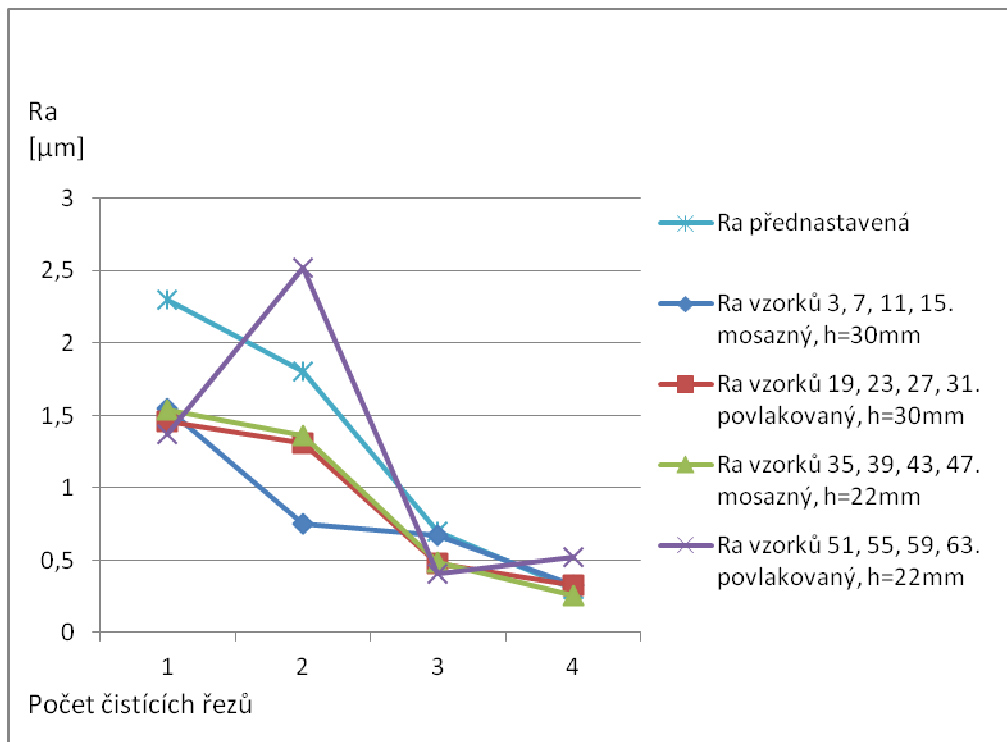
Obr. 65. Graf porovnání Rmr při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min

Tab. 14. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min

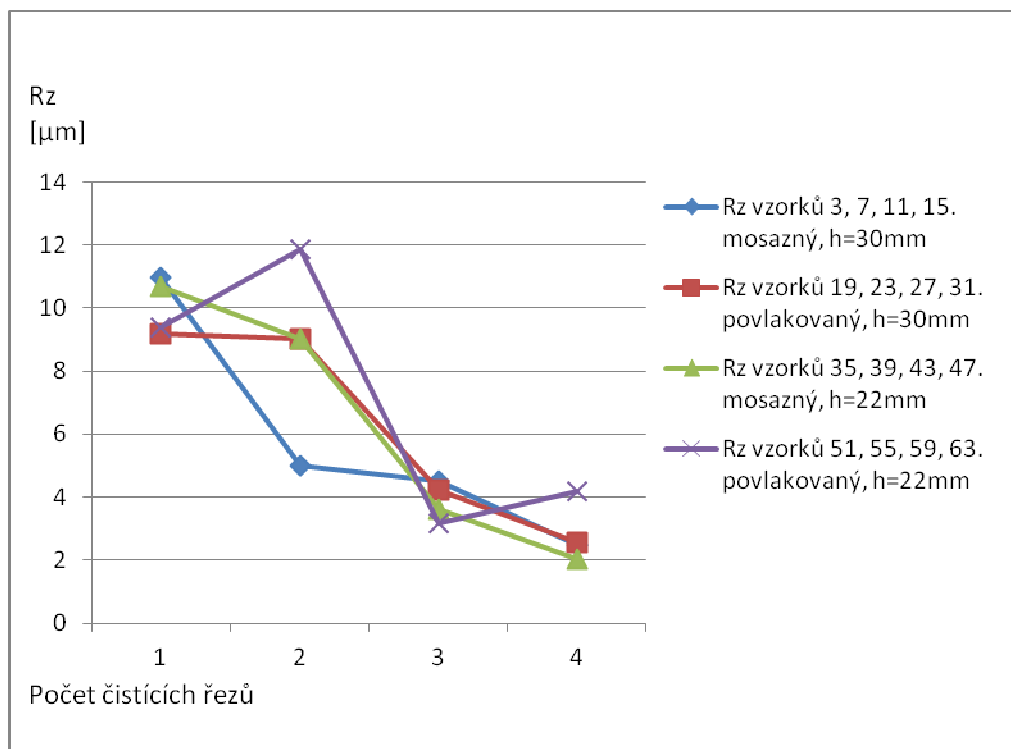
ODTAH 0,03 m/s, VÝPLACH 18 l/min							
č. vzorku	nastavené Ra [μm]	drátová elektroda	mezera [mm]	\emptyset Ra [μm]	\emptyset Rz [μm]	\emptyset Rsm [μm]	\emptyset Rmr [%]
3.	2,3	mosazná	0	1,54± 0,23	10,97± 2,08	221± 43,72	3,9± 2,23
7.	1,8	mosazná	0	0,75± 0,16	4,99± 1,26	172± 26,25	0,9± 0,74
11.	0,7	mosazná	0	0,67± 0,07	4,5± 0,55	108± 15,65	1,7± 1,25
15.	0,3	mosazná	0	0,33± 0,04	2,46± 0,24	85,8± 18,32	0,1± 0,32
19.	2,3	povlakovaná	0	1,46± 0,21	9,12± 1,15	208± 36,05	2,4± 1,43
23.	1,8	povlakovaná	0	1,31± 0,27	9,04± 1,58	176± 43,4	2,4± 1,26
27.	0,7	povlakovaná	0	0,48± 0,06	4,23± 0,61	105± 23,97	1,3± 1,06
31.	0,3	povlakovaná	0	0,33± 0,09	2,55± 0,63	71,8± 21,03	0,3± 0,67
35.	2,3	mosazná	8	1,54± 0,31	10,68± 2,26	218± 36,44	2,4± 1,26
39.	1,8	mosazná	8	1,36± 0,27	9,02± 1,69	198± 28,65	2,7± 2
43.	0,7	mosazná	8	0,48± 0,05	3,62± 0,45	102± 14,81	0,3± 0,67
47.	0,3	mosazná	8	0,25± 0,03	2,02± 0,26	105± 23,61	0,5± 0,71
51.	2,3	povlakovaná	8	1,37± 0,16	9,39± 1,61	194± 39,61	1,4± 0,84
55.	1,8	povlakovaná	8	2,52± 0,32	11,87± 1,07	389± 41,1	3,1± 2,85
59.	0,7	povlakovaná	8	0,41± 0,06	3,17± 0,42	106± 19,13	0,4± 0,52
63.	0,3	povlakovaná	8	0,52± 0,07	4,19± 0,72	109± 16,23	0,8± 1,03

Tab. 14. a obrázky níže ukazují dva podstatné fakty. První z nich je, že nastala při řezání vzorku č. 55 neočekávaná komplikace, která se projevila na kvalitě povrchu. U vzorku č. 55 bylo přednastaveno Ra 1,8, což dodrženo nebylo a jeho opracování je výrazně horší. Druhý, že byl nastaven odtah 0,03 m/s a výplach 18 l/min, což se projevilo na nevyrovnanosti řezu a to dokazuje kolísání parametrů na obrázcích, zejména u parametrů Ra,

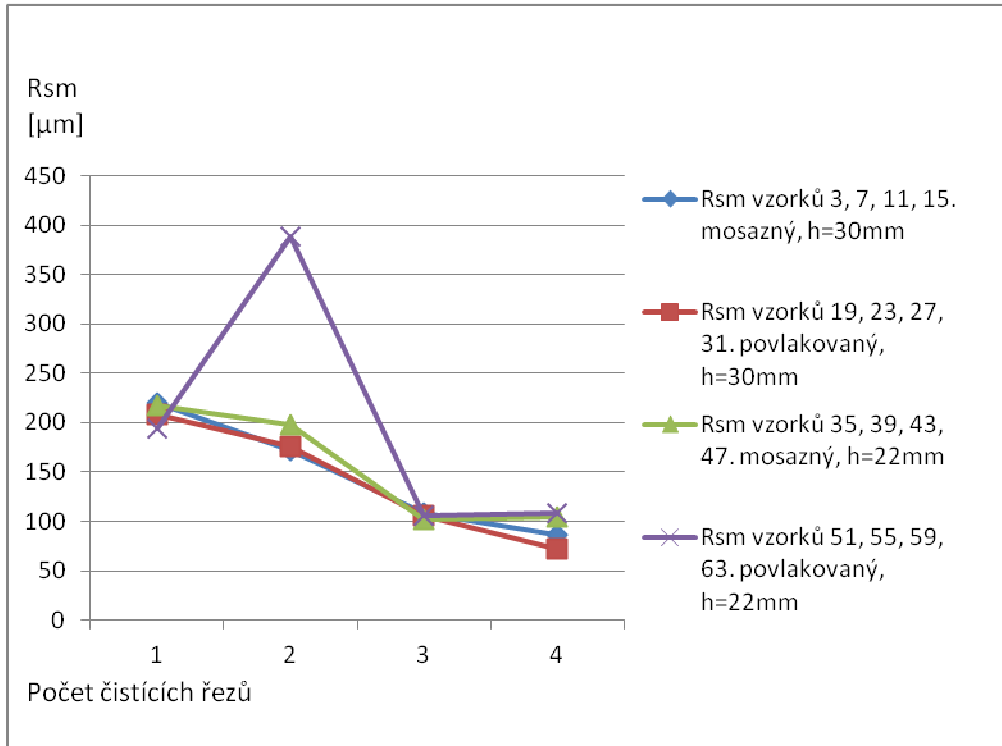
Rz a Rmr. Také je patrné, že při uvedeném nastavení odtahu a výplachu, se zmenšuje vliv drátové elektrody, kde je dokonce viditelné, že mosazná drátová elektroda je vhodnější.



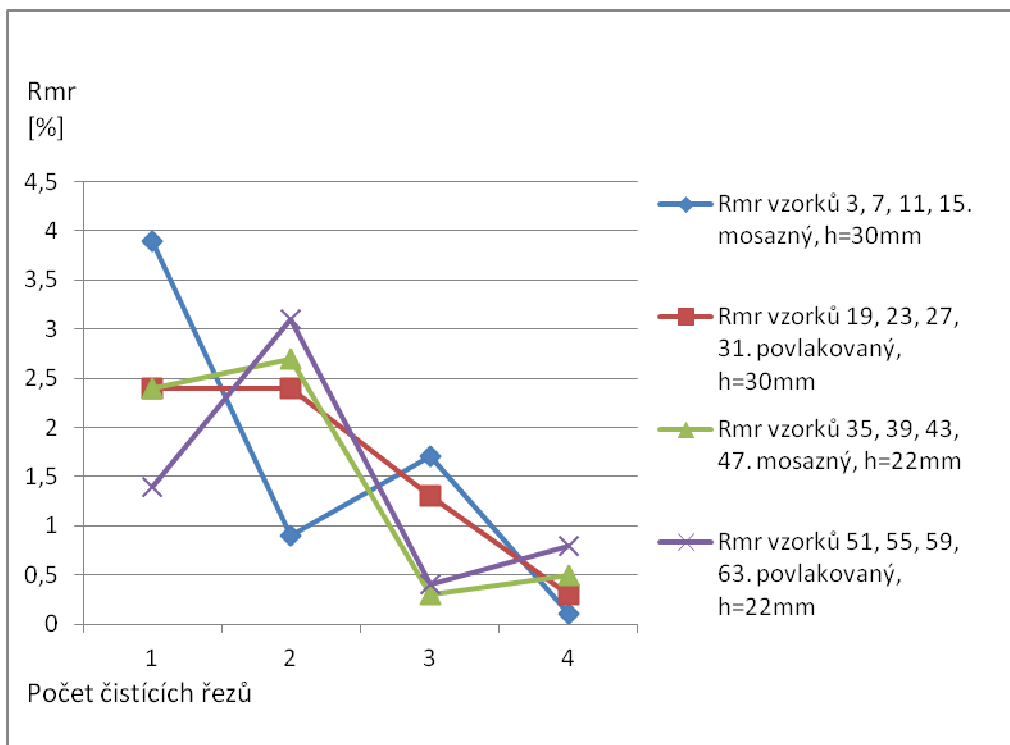
Obr. 66. Graf porovnání Ra při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min



Obr. 67. Graf porovnání Rz při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min



Obr. 68. Graf porovnání Rsm při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min



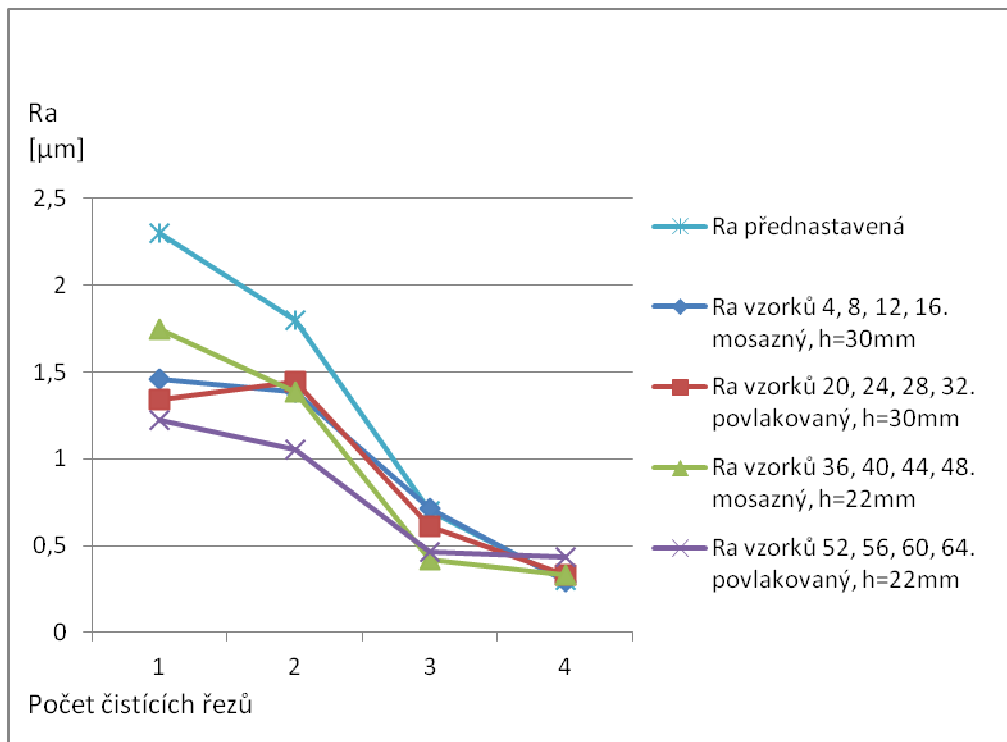
Obr. 69. Graf porovnání Rmr při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min

Tab. 15. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min

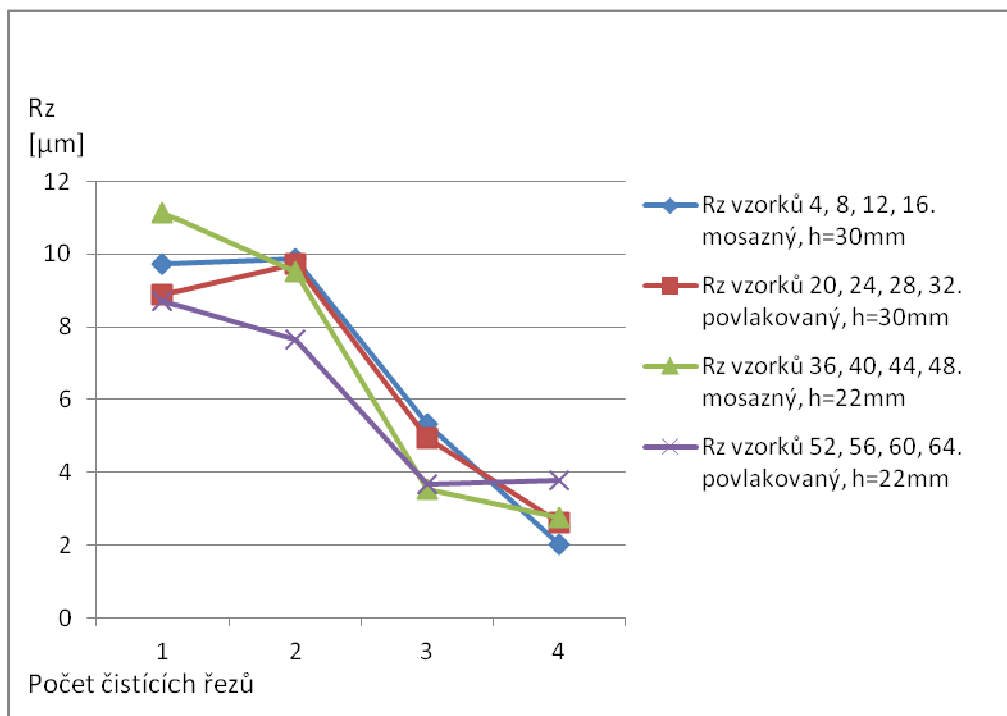
ODTAH 0,03 m/s, VÝPLACH 0,2 l/min							
č. vzorku	nastavené Ra [μm]	drátová elektroda	mezera [mm]	\emptyset Ra [μm]	\emptyset Rz [μm]	\emptyset Rsm [μm]	\emptyset Rmr [%]
4.	2,3	mosazná	0	1,46± 0,25	9,73± 1,66	255± 59,47	3,6± 1,96
8.	1,8	mosazná	0	1,39± 0,17	9,87± 1,05	151± 21,58	3,2± 2,49
12.	0,7	mosazná	0	0,71± 0,03	5,32± 0,35	116± 12,56	1± 0,82
16.	0,3	mosazná	0	0,29± 0,04	2,03± 0,32	117± 19,49	0,4± 0,52
20.	2,3	povlakovaná	0	1,34± 0,2	8,87± 1,08	207± 21,18	3,7± 1,57
24.	1,8	povlakovaná	0	1,44± 0,28	9,73± 1,56	132± 22,64	1,8± 1,14
28.	0,7	povlakovaná	0	0,61± 0,1	4,95± 0,74	206± 326,11	0,5± 0,71
32.	0,3	povlakovaná	0	0,33± 0,04	2,6± 0,29	99,8± 19,24	0,3± 0,48
36.	2,3	mosazná	8	1,75± 0,14	11,14± 0,52	197± 27,96	3,8± 2,2
40.	1,8	mosazná	8	1,38± 0,19	9,53± 1	182± 28,33	2,1± 0,88
44.	0,7	mosazná	8	0,42± 0,12	3,53± 0,97	92,3± 13,82	0,6± 0,52
48.	0,3	mosazná	8	0,33± 0,03	2,76± 0,46	109± 13,02	0,4± 0,52
52.	2,3	povlakovaná	8	1,22± 0,13	8,71± 1,46	185± 28,99	2,7± 1,06
56.	1,8	povlakovaná	8	1,05± 0,09	7,64± 0,67	177± 36,51	2± 1,94
60.	0,7	povlakovaná	8	0,47± 0,03	3,67± 0,36	87± 16,35	0,8± 0,63
64.	0,3	povlakovaná	8	0,44± 0,04	3,77± 0,54	127± 29,56	0,6± 0,7

Z tab. 15. a obrázků je viditelný oproti předešlým případům vliv mezery mezi dílcem a hlavou. Při nastavení odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min, se nejvíce projevila mezera, kde u výšky dílce 22 mm, tedy mezeře 8 mm, je opracování lepší a to hlavně při nižších zadaných hodnotách Ra, naopak u vyšších je Ra u dílců s výškou 22 mm Ra horší. Je

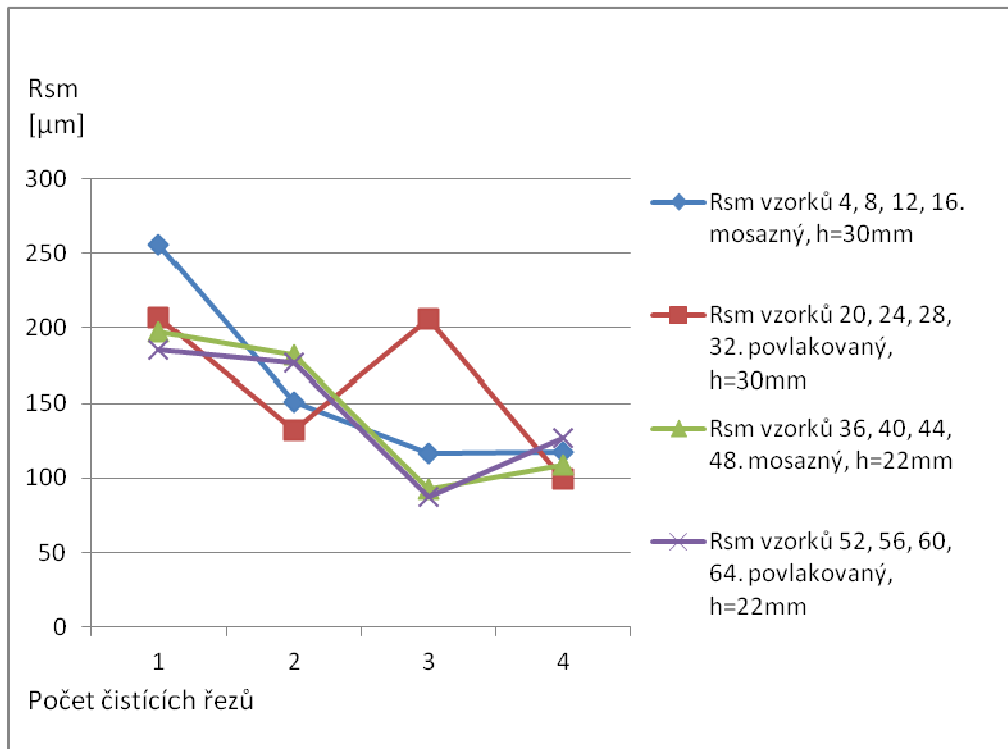
také potvrzen fakt, že vhodnější je povlakovaná drátová elektroda, kde i nyní měla lepší hodnoty než mosazná drátová elektroda.



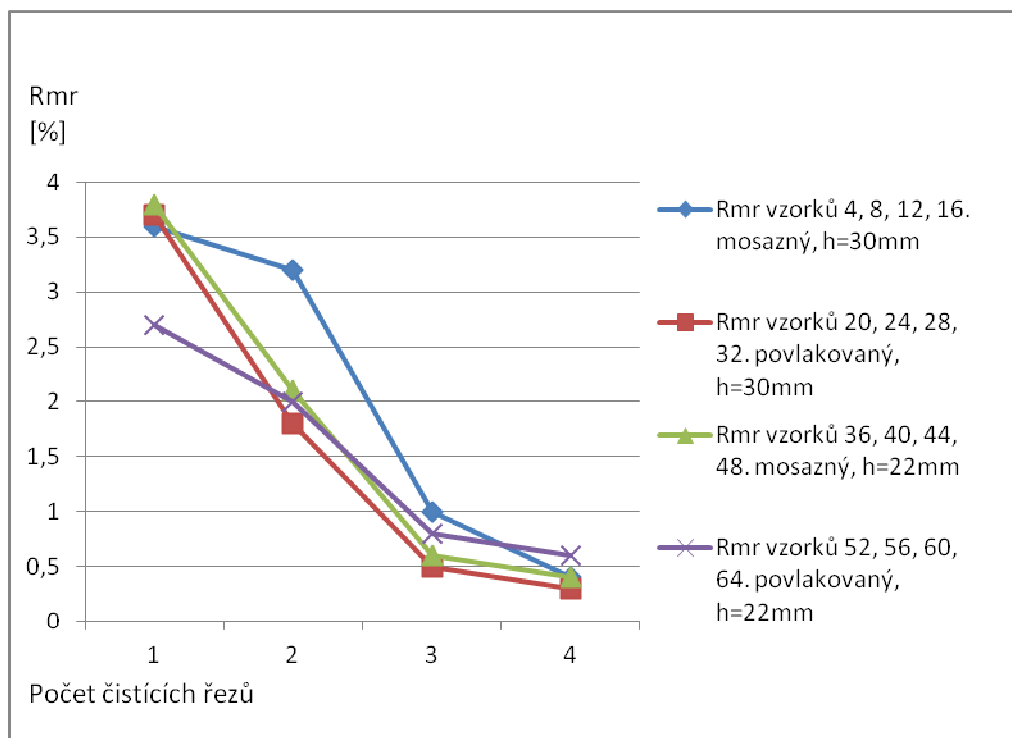
Obr. 70. Graf porovnání Ra při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min



Obr. 71. Graf porovnání Rz při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min



Obr. 72. Graf porovnání Rsm při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min

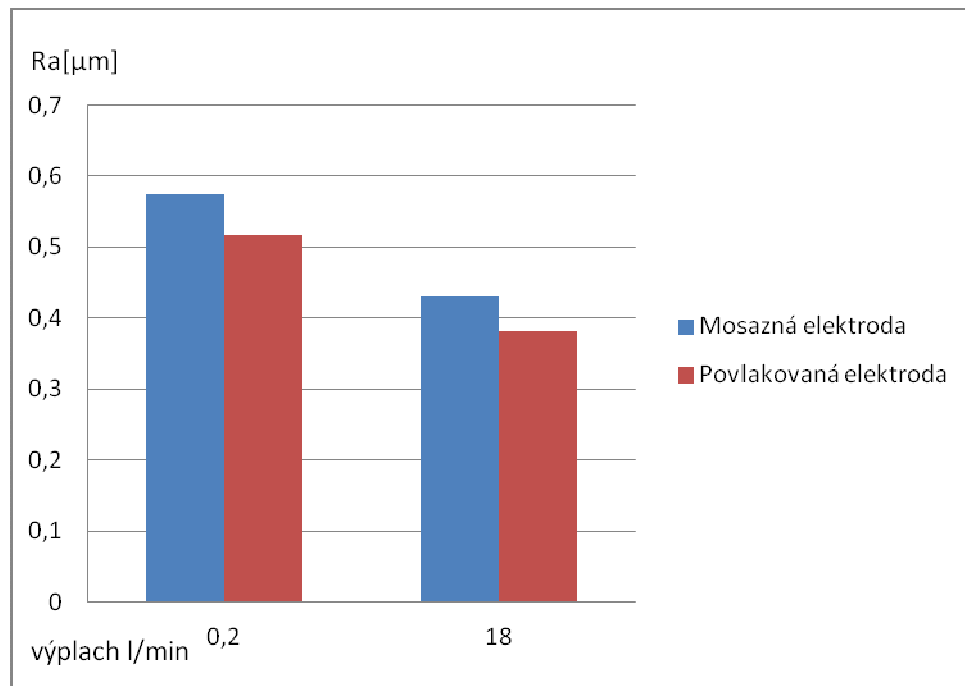


Obr. 73. Graf porovnání Rsm při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min

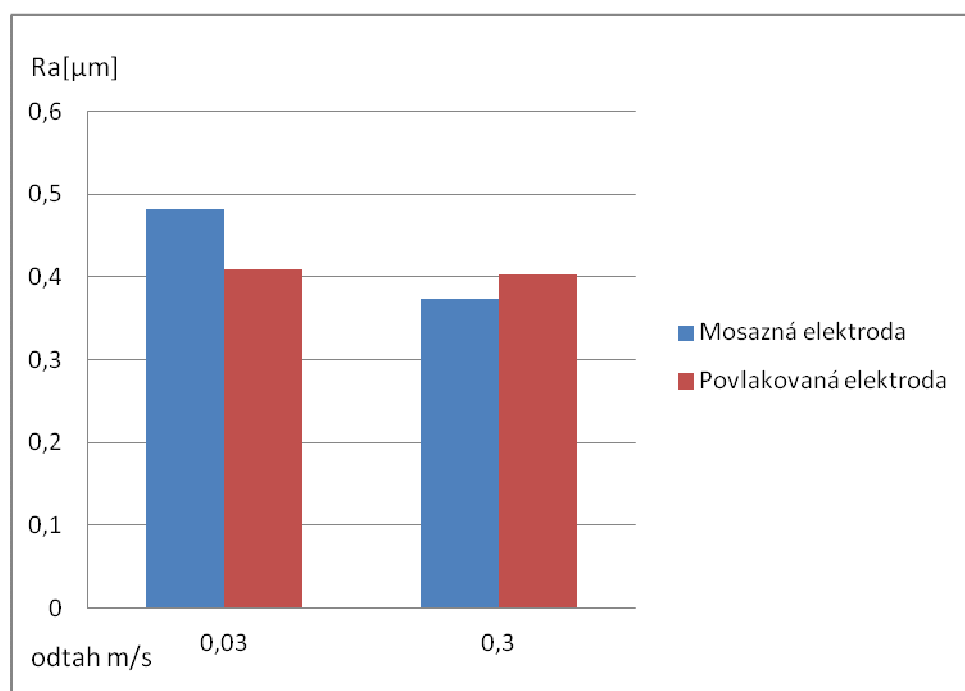
9 SHRUTÍ A URČENÍ VHODNÝCH PODMÍNEK

Z tabulek je patrné, že nejvhodnější se jeví použití odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min, kde byly dodrženy vždy předepsané hodnoty Ra nebo byly jen nepatrně překročeny. Kdežto u jiného odtahu a výplachu měl stroj problémy dodržet přednastavený parametr Ra a to zejména v nižších hodnotách, kde je překročil v řádech desetin. Když z porovnání vynecháme vzorek č. 55, který má výrazně horší kvalitu povrchu, nejvhodnější je tedy postup s odtahem 0,3 m/s a výplachem 18 l/min viz. obr. 74, 75, poté jsou srovnatelné dva rozdílné postupy. První, kde jsou voleny parametry odtahu 0,3 m/s a výplach 0,2 l/min a druhý postup 0,03 m/s a výplach 18 l/min. Zde bylo dosaženo srovnatelného opracování. Nejméně vhodný je postup s minimálními hodnotami, tedy odtahem 0,03 m/s a výplachem 0,2 l/min, který měl opracování horší v řádech desetin. To lze přisoudit faktu, že řezný proces v tomto případě probíhal pomalu. Odtah i výplach jsou na nízkých hodnotách, odtavený materiál má nedostatečný odvod i opotřebovaná drátová elektroda má pomalý odtah. Vlivem těchto skutečností eroze probíhá přibližně dvakrát pomaleji než při nastavení opačných parametrů odtahu a výplachu a tím je zhoršen výsledný povrch.

Je také vhodnější použití povlakované drátové elektrody, která má čistší řez. Vliv mezery mezi dílcem a hlavou má vliv hlavně při nastavení horší kvality opracování. S nastavenou vyšší jakostí se postupně ztrácí vliv mezery na kvalitu opracování hlavně u Ra0,7 a Ra0,3.



Obr. 74. Porovnání vlivu typu drátové elektrody a síle výplachu na parametru Ra výsledného povrchu



Obr. 75. Porovnání vlivu typu drátové elektrody a rychlosti odtahu na parametru Ra výsledného povrchu

ZÁVĚR

Předmětem řešení bylo hledání vhodných rezných podmínek pro výrobu ozubení na hřebenech, kde byla předepsána různá úroveň opracování Ra.

Vhodné podmínky byly zjišťovány na vzorcích, které měly stejné parametry jako hřebeny. Při výrobě vzorků byly měněny čtyři parametry, které byly vzájemně kombinovány a vyhodnocovány. Byly měněny: typ drátové elektrody – povlakovaná a mosazná, mezera mezi horní hlavou a dílcem – 0 mm a 8 mm, rychlost odtahu drátové elektrody 0,3 m/s a 0,03 m/s a síla výplachu – 18 l/min a 0,2 l/min. Vyrobené vzorky byly podrobeny měření drsnosti povrchu v laboratořích univerzity. Byly měřeny čtyři parametry drsnosti povrchu – Ra, Rz, Rsm a Rmr.

Po porovnání vzorků bylo vyhodnoceno jako nejvhodnější použití povlakované drátové elektrody, která měla ve většině případech lepší hodnoty opracování finálního povrchu. Odtah drátové elektrody a síla výplachu se jeví jako vhodnější použití vyšších hodnot, které měly rovněž vliv na vyšší kvalitu povrchu. Vliv mezery nebyl tak zřetelný jako předešlé proměnné. Tudiž byl považován za zanedbatelný. Toto pro dané díly - hřebeny nehraje významnou roli, jelikož jak bylo zmiňováno už dříve v práci, pohyb horní hlavy je omezen technickým provedením upínače hřebenů, kdy není umožněn pohyb horní hlavy v ose Z.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresivní technologie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [3] ŘASA, Jaroslav, Vladimír GABRIEL a Přemysl POKORNÝ. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-7183-336-3.
- [4] ELMAN, J. C. *Electrical Discharge Machining*. Society of Manufacturing Engineers, 2001, 328p., ISBN 9780872635210.
- [5] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989. 122 s.
- [6] J. PAULO DAVIM. *Machining: Fundamentals and Recent Advances*. London: Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-212-8.
- [7] FISHER, G. et al. *Příručka pro uživatele C. AGIE CHARMILLES GROUP*. 2000
- [8] *Wire Cut. EDM*. [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.gfac.com/gfac/products/wire-cut-edm.html>>.
- [9] HVĚZDA, Petr. *CNC výroba tvarové součásti*. Zlín, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.
- [10] SIGMUND, Milan. *Co jsou to CNC stroje*. [online]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace>
- [11] ŠTULPA, M. *CNC Obráběcí stroje a jejich programování*. BEN, Praha, 2008, ISBN 978-80-7300-207-7.
- [12] PETERKA, Jozef; JANÁČ, Alexander; GÖRÖG, Augustín. *Programovanie NC strojov I*. 1. vydání. Bratislava : STU, 2002. 75 s. ISBN 80-227-1686-3, 85-233-2002.

- [13] ŘEHULA, Miroslav. *Ruční programování*. [online]. 2011. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=31556&instance=2>
- [14] ŘEHULA, Miroslav. *Strojní programování*. [online]. 2011. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=31586&docGroup=4929&cmd=0&instance=2>
- [15] PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie: Metrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2001. ISBN 80-214-1997-0.
- [16] *Povrchy povlaků - Mikrogeometrie*. [online]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf
- [17] NOVÁK, Zdeněk. *Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu*. [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>
- [18] NOVÁK, J. *Bezkontaktní měřící metody v experimentální mechanice*. [online]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace>
- [19] *AGIE AgieCut drátové řezačky: AGIE AGIECUT CHALLENGE 2*. [online]. Dostupné z: <http://www.agiecharmilles.cz/agiewedm.html#acexc>
- [20] *Řezací dráty BEDRA BERKENHOFF*. [online]. Dostupné z: <http://www.pfingstner.cz/index.php/rezaci-draty>
- [21] *Drsnoměry Mitutoyo: Drsnoměry Surf test SJ-301*. [online]. Dostupné z: <http://www.microtes.cz/Mitutoyo/drsnomery-SJ210aSJ301-M.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

NMO	Nekonvenční metody obrábění	
EDM	Elektroerozivní obrábění	
LBM	Obrábění paprskem laseru	
EBM	Obrábění elektronovým paprskem	
IBM	Obrábění iontovým paprskem	
PAM	Obrábění paprskem plazmy	
ECM	Elektrochemické obrábění	
ECG	Elektromechanické broušení	
CM	Chemické obrábění	
PCM	Fotochemické obrábění	
USM	Obrábění ultrazvukem	
AJM	Obrábění proudem brusiva	
AFM	Obrábění proudem brusiva	
WJM	Obrábění vodním paprskem	
AWJM	Obrábění vodním paprskem	
WEDM	Drátové elektroerozivní obrábění	
kHz	Kilohertz	
UZ	Ultrazvuk	
MPa	Megapascal	
WEDM	Wire Electric discharge machining	Drátové elektroerozivní obrábění
NC	Numeric Control	Číslicové řízení
CNC	Computer Numerical Control	Počítačem číslicové řízení
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporovaný návrh
CAM	Computer Aided Manufacturing	Počítačem podporovaná výroba

GPS	Geometrická specifikace produktu	
H _{sk}	Analogie efektivní hodnoty střídavého proudu	
R _a	Analogie střední hodnoty střídavého proudu	
ČSN	Česká soustava norem	
EN	Evropské normy	
DIN	Deutsche Industrie Norm Německá průmyslová norma.	
ANSI	American National Standards Institute Americký národní standardizační ústav	
JIS	Japanese Industrial Standards Committee Japonské normy	
ISO	International Organization for Standardization Mezinárodní organizace pro standardizaci	
3D	3dimenze	
SNOM	Skenovací optická mikroskopie	
SEM	Scanning Electron Microscopy	Rastrovací elektronové mikroskopie
TEM	Transmission Electron Microscopy	Transmisní elektronová mikroskopie
PC	Personal Computer	Osobní počítač
LCD	Liquid Crystal Display	Displej z tekutých krystalů
R _a	Střední aritmetická hodnota drsnosti	
R _z	Maximální výška profilu	
R _{sm}	průměrná vzdálenost výstupků	
R _{mr}	Materiálový podíl drsnosti profilu	

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Princip obrábění ultrazvukem</i>	14
<i>Obr. 2. Princip obrábění abrazivním.....</i>	15
<i>Obr. 3. Detail procesu abrazivního paprsku</i>	15
<i>Obr. 4. Schéma zařízení pro AFM proces.....</i>	15
<i>Obr. 5. Zjednodušený model principiálního rozdílu mezi technologií čistého vodního paprsku a abrazivního paprsku</i>	16
<i>Obr. 6. Princip chemického obrábění.....</i>	17
<i>Obr. 7. Základní princip elektrochemického obrábění a konfigurace nástroj-obrobek na začátku procesu a na konci procesu</i>	18
<i>Obr. 8. Princip elektromechanického obrábění.....</i>	19
<i>Obr. 9. Schéma laseru.....</i>	20
<i>Obr. 10. Zařízení pro obrábění elektronovým paprskem.....</i>	21
<i>Obr. 11. Schéma iontového obráběcího zařízení.....</i>	22
<i>Obr. 12. Schéma obrábění paprskem plazmy</i>	22
<i>Obr. 13. Princip zařízení pro elektroerozivní obrábění.....</i>	23
<i>Obr. 14. Jednotlivé fáze elektroeroze I-III.....</i>	24
<i>Obr. 15. Jednotlivé fáze elektroeroze IV-VI.....</i>	25
<i>Obr. 16. Jednotlivé fáze elektroeroze VII-IX</i>	25
<i>Obr. 17. Princip elektrojiskrového drátového řezání, vznik řezné mezery a zjednodušené schéma zapojení</i>	27
<i>Obr. 18. Profily vznikajících kráterů pro různé materiály při stejných podmínkách výboje.....</i>	27
<i>Obr. 19. Typický charakter povrchu po elektrojiskrovém opracování.....</i>	27
<i>Obr. 20. Schematické znázornění cesty drátu při elektrickém výboji obráběcího procesu</i>	28
<i>Obr. 21. Schéma elektroerozivní drátové řezačky</i>	30
<i>Obr. 22. Profil povrchu.....</i>	37
<i>Obr. 23. Filtry profilu</i>	39
<i>Obr. 24. Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti Ra.....</i>	40
<i>Obr. 25. Schematické vyjádření maximální výšky profilu Rz.....</i>	41
<i>Obr. 26. Křivka materiálového podílu drsnosti povrchu.....</i>	41

<i>Obr. 27. Označování struktury povrchu v technické výrobní dokumentaci.</i>	44
<i>Obr. 28. Dotyková metoda snímání profilu.</i>	44
<i>Obr. 29. Měřící smyčka dotykového profilometru.</i>	45
<i>Obr. 30. Interferometrická metoda snímání povrchu.</i>	47
<i>Obr. 31. Mikroskopická metoda snímání povrchu.</i>	47
<i>Obr. 32. Snímání povrchu pomocí polychromatického záření.</i>	48
<i>Obr. 33. Laserové skenování a fotografická metoda snímání povrchu.</i>	48
<i>Obr. 34. Optická rozptylová metoda snímání povrchu.</i>	49
<i>Obr. 35. Elektronová mikroskopie.</i>	49
<i>Obr. 36. Hřebeny</i>	52
<i>Obr. 37. Drátová řezačka AGIE AgieCut Excellence 2</i>	54
<i>Obr. 38. Drátová elektroda Cobra cut A</i>	55
<i>Obr. 39. Drsnoměr Mitutoyo</i>	56
<i>Obr. 41. Tvorba modelu vzorků v programu SolidWorks</i>	57
<i>Obr. 40. Polotovár pro vzorky</i>	57
<i>Obr. 42. Kontura a ISO kód z programu EdgeCam</i>	58
<i>Obr. 43. Rozdíly poloh jednotlivých řezů</i>	61
<i>Obr. 44. Polotovár v pracovní vaně</i>	62
<i>Obr. 45. Mezera mezi hlavou a dílem</i>	62
<i>Obr. 46. Detail pro Ra 2,3 – 1 řez</i>	63
<i>Obr. 47. Pohyb drátové elektrody pro Ra 2,3</i>	
<i>Obr. 48. Detail pro Ra 1,8 -2 řezy</i>	63
<i>Obr. 49. Pohyb drátové elektrody pro Ra 1,8</i>	
<i>Obr. 50. Detail pro Ra 0,7 – 3 řezy</i>	64
<i>Obr. 51. Pohyb drátové elektrody pro Ra 0,7</i>	
<i>Obr. 52. Detail pro Ra 0,3 - 4řezy</i>	65
<i>Obr. 53. Pohyb drátové elektrody pro Ra 0,3</i>	
<i>Obr. 54. Vzorky 1 – 32 výška 30 mm</i>	66
<i>Obr. 55. Vzorky 33 – 64 výška 22 mm</i>	66
<i>Obr. 56. Záznam měření profilu drsnosti ve směru a) příčném b) podélném</i>	67
<i>Obr. 57. Časový průběh měření parametrů drsnosti v příčném a podélném směru</i>	68
<i>Obr. 58. Graf porovnání Ra při odtahu drátu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min</i>	71
<i>Obr. 59. Graf porovnání Rz při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min</i>	71
<i>Obr. 60. Graf porovnání Rsm při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min</i>	72
<i>Obr. 61. Graf porovnání Rmr při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min</i>	72
<i>Obr. 62. Graf porovnání Ra při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	74
<i>Obr. 63. Graf porovnání Rz při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	74

<i>Obr. 64. Graf porovnání R_{sm} při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 65. Graf porovnání R_{mr} při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 66. Graf porovnání R_a při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 67. Graf porovnání R_z při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 68. Graf porovnání R_{sm} při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 69. Graf porovnání R_{mr} při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 70. Graf porovnání R_a při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 71. Graf porovnání R_z při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 72. Graf porovnání R_{sm} při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 73. Graf porovnání R_{sm} při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 74. Porovnání vlivu typu drátové elektrody a síle výplachu na parametru R_a výsledného povrchu</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 75. Porovnání vlivu typy drátové elektrody a rychlosti odtahu na parametru R_a výsledného povrchu</i>	<i>83</i>

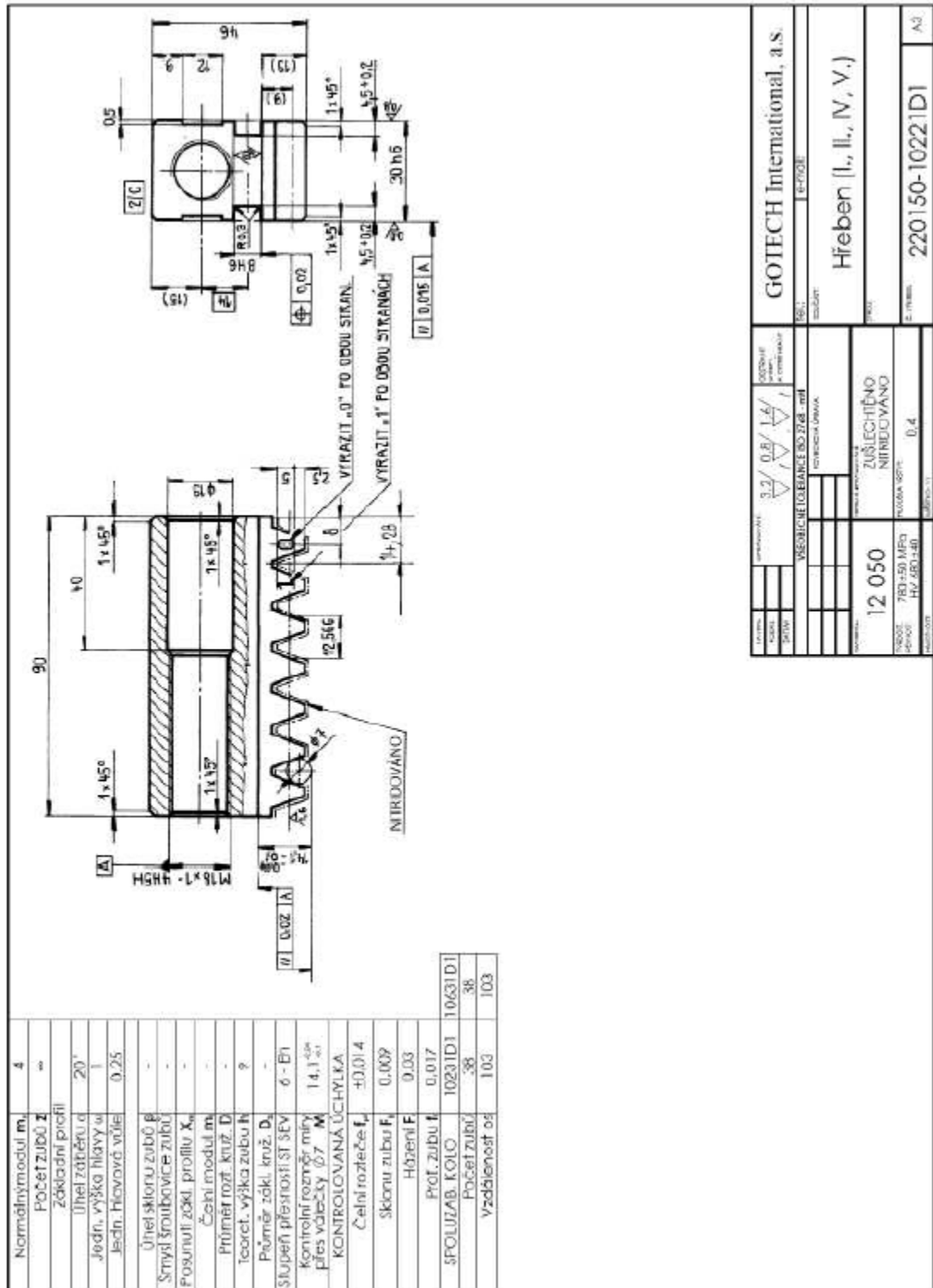
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Klasifikace procesu obrábění</i>	12
<i>Tab. 2. Složení programu (v bloku)</i>	33
<i>Tab. 3. Význam nejpoužívanějších adres</i>	34
<i>Tab. 4. Význam důležitých funkcí.....</i>	34
<i>Tab. 5. Použití nejdůležitějších funkcí G, M</i>	35
<i>Tab. 6. Funkce pro roviny souřadnicové soustavy</i>	36
<i>Tab. 7. Technologické podmínky pro vzorky 1 - 16</i>	59
<i>Tab. 8. Technologické podmínky pro vzorky 17 - 32</i>	59
<i>Tab. 9. Technologické podmínky pro vzorky 33 - 48</i>	60
<i>Tab. 10. Technologické podmínky pro vzorky 49 - 64</i>	60
<i>Tab. 11. Příčné a podélné měření.....</i>	67
<i>Tab. 12. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,3 m/s a výplachu 18 l/min.....</i>	70
<i>Tab. 13. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,3 m/s a výplachu 0,2 l/min.....</i>	73
<i>Tab. 14. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,03 m/s a výplachu 18 l/min.....</i>	76
<i>Tab. 15. Porovnání měřených parametrů povrchu při odtahu 0,03 m/s a výplachu 0,2 l/min.....</i>	79

SEZNAM PŘÍLOH

- PI Ozubený hřeben s předepsaným Ra 0,8
- PII Hřeben s předepsaným Ra 1,6

PŘÍLOHA P II: HŘEBEN S PŘEDEPSANÝM Ra 1,6



Normální modul m	4
Počet zubů z	∞
Základní profil	
Úhel zářezu α	20°
Jedn. výška hlavy u	1
Jedn. hlavová vůle	0,25
Úhel sklonu zubů β	-
Smysl šroubovice zubů	-
Posunutí zákl. profilu X	-
Číselný modul m _n	-
Průměr rozř. kruž. D	-
Teoret. výška zubu h	?
Průměr zákl. kruž. D _z	-
Slupeň přístroji ST SEV	6 - E1
Kontrolní rozměr míry přes vůlečky 0,7 M	14,1 ^{±0,1}
KONTROLOVANÁ ÚCHYLKA	
Číselní rozteče f _n	±0,014
Sklonu zubu F _z	0,009
Hřebení F	0,03
Prof. zubu f	0,017
SPOLUŽAB. KOLO	10231D1 10631D1
Pocet zubů z	38
Vzdálenost os	103 103

GOTECH International, a.s.	
SEK: 010301	010301
Hřeben (I., II., V., V.)	
ZUSLECHĚNO NITROVÁNO	
12 050	0,4
780150 MFS	0,0004 - 0,01
HZ 601481	0,4
220150-10221D1	A3