



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ROZBOR A VYUŽITÍ ELEKTROEROZIVNÍ TECHNOLOGIE DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ

ANALYSIS AND USE OF WIRE CUTTING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Patočka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Kalivoda

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Josef Patočka
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Milan Kalivoda
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rozbor a využití elektroerozivní technologie drátového řezání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Možnosti technologie WEDM (elektroerozivní drátové řezání) nejsou zcela univerzální. Téma směřuje na její vyhodnocení v různých reálných typech výroby.

Cíle diplomové práce:

- Stávající stav a možnosti technologie WEDM.
- Vhodné součásti pro sériovou výrobu.
- Porovnání se standardními technologiemi třískového obrábění.
- Využitelný strojový park.
- Zhotovení vzorku součásti.
- Vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.

MÁDL, Jan et al. Jakost obráběných povrchů. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, 2003. 180 s. ISBN 80-7044-639-4.

PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.

PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu II. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

SHAW, Milton Clayton. Metal Cutting Principles. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 651. ISBN 0-19-514206-3.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. P. 730. ISBN 0-07-146271-6.

ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na téma elektroerozivního obrábění s větším důrazem na techniku drátového řezání. V první části je přehledně popsán princip vzniku elektroerozivního výboje a jeho následné účinky, které vyvolávají úběr materiálu v daných pracovních podmínkách. Jsou zde zahrnuty jednotlivé způsoby elektroeroze a jednotlivá příslušenství, která danému procesu napomáhají. Druhá část je teoretický rozbor řezacího procesu pomocí drátové elektrody. Je zde popsán způsob obrábění, strategie obrábění a kompletní přehled příslušenství, které řezací proces doprovází. Třetí část práce zahrnuje praktickou ukázkou výroby typického představitele pro drátové řezání a následně jeho vyhodnocení z ekonomického hlediska. Dále je provedena přehledná analýza jakosti povrchu a konečné zhodnocení stavu součásti.

Klíčová slova

výboj, elektrické pole, WEDM, EDM, drátová elektroda, generátor, frekvence, elektroerozivní drátová řezačka, kusová výroba.

ABSTRACT

The diploma thesis focuses on the topic of electroerosive machining with greater emphasis on wire cutting technique. The first part clearly describes the principle of electroerosive discharge and its subsequent effects that cause material removal in the given working conditions. This includes the individual methods of electroerosion and the individual accessories that aid the process. The second part is a theoretical analysis of the cutting process using a wire electrode. It describes the machining method, machining strategy and a complete overview of the accessories that accompany the cutting process. The third part of the thesis includes a practical demonstration of the production of a typical representative for wire cutting and then there is evaluation from an economic point of view. Furthermore, there is clear analysis of the surface quality and the final evaluation of the condition of the component.

Keywords

discharge, electric field, WEDM, EDM, wire electrode, generator, frequency, Wire-cut EDM machine, piece production.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PATOČKA, Josef. *Rozbor a využití elektroerozivní technologie drátového řezání* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149454>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Rozbor a využití elektroerozivní technologie drátového řezání** vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

24.5.2023

místo, datum

Josef Patočka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Milanu Kalivodovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále patří velké poděkování za velkou pomoc a ochotu panu Zdeňku Horákovi jednateleovi firmy VKV Horák s.r.o. Zvláštní poděkování patří panu Jakubu Vlčkovi za ochotu a obětavost při vykonávání experimentální části a jeho odborné rady.

Další poděkování patří Ing. Petře Sliwkové, Ph.D. za pomoc při vyhodnocování konečných výsledků.

V poslední řadě patří velké poděkování rodině, přátelům a všem blízkým, kteří mě při studiu podporovali.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	12
2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ.....	14
2.1 Aplikace elektroerozivních metod	14
2.1.1 Rozdělení elektroerozivního obrábění	14
2.2 Historie	17
2.3 Základní princip eroze	18
2.3.1 Parametry výboje	21
2.3.2 Ionizace.....	25
2.4 Pracovní podmínky	27
2.5 Zdroje elektrické energie (EDM)	29
2.5.1 Závislé generátory RC a RLC	29
2.5.2 Nezávislé generátory	31
2.5.3 Opotřebení elektrody a volba polarity	32
2.6 Jakost obrobeneho povrchu	33
2.6.1 Vliv povrchu na mechanické vlastnosti	35
2.7 Dielektrická kapalina	36
2.7.1 Způsoby vyplachování	37
2.8 Nástrojové elektrody	38
2.8.1 Rozměry nástrojových elektrod	39
3 TEORIE DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ (WEDM).....	40
3.1 Proces WEDM.....	41
3.2 Vybavení WEDM.....	42
3.2.1 Faktory ovlivňující měření výkonnosti	42
3.3 Drátové elektrody	43
3.3.1 Způsob přípravy drátu	44
3.4 Princip řezání	45
3.4.1 Způsoby vedení řezu.....	46
3.5 Strategie řezání	48
3.5.1 Stanovení tolerancí	49
3.5.2 Řezný proces	50
4 AUTORSKÝ NÁVRH A VÝROBA DÍLCE.....	51
4.1 Firma VKV HORÁK s.r.o.....	51

4.2	Návrh střížníku	52
4.2.1	Vystřížek.....	53
4.3	Hlavní rozměr	54
4.4	Technologický postup výroby střížníku	55
4.5	Vytvoření NC programu.....	56
4.6	Strojový park	58
4.7	Vstupní parametry	59
5	MĚŘENÍ POVRCHU ŘEZANÉ SOUČÁSTI	63
5.1	Postup měření na přístroji Alicona	63
5.1.1	Vyhodnocení povrchů součástí.....	66
5.2	Postup měření na přístroji SJ-210.....	67
5.3	Vstupy řezných podmínek.....	69
5.4	Měření tvrdosti povrchu	70
6	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	71
6.1	Celkové náklady na řezání součástí.....	71
	DISKUZE.....	76
	ZÁVĚR.....	77

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

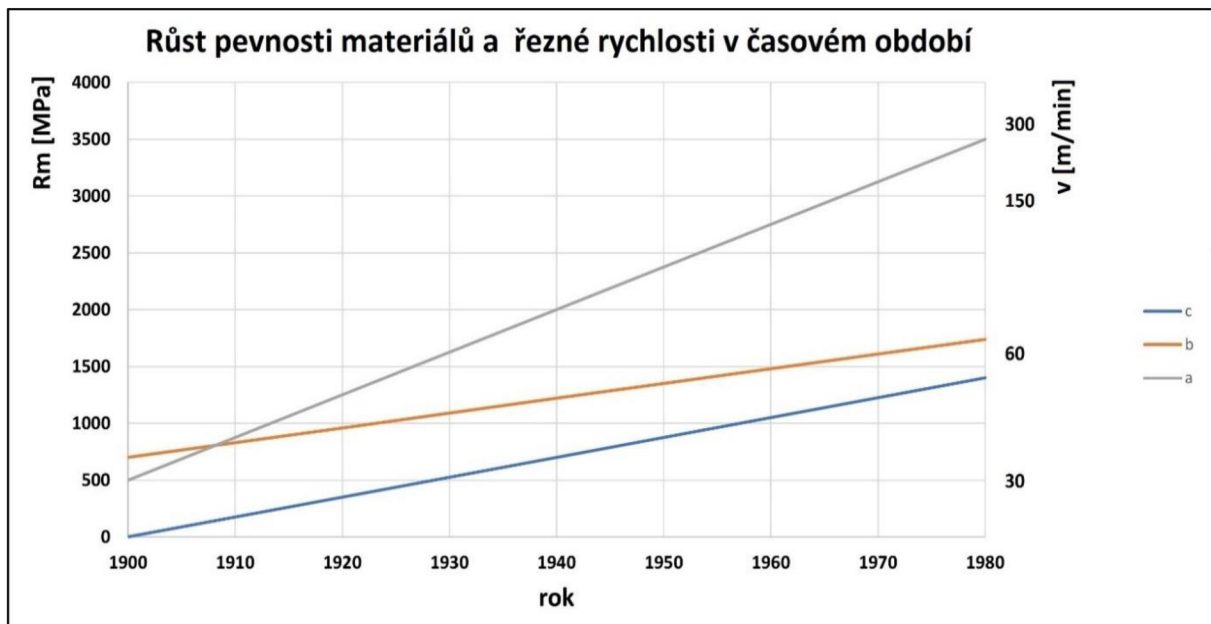
Jestliže elektřina způsobuje pohyb, tak pohyb musí způsobovat elektřinu. Toto rčení lidé už dnes znají celkem dobře. Bez elektrických zařízení bychom si těžko dokázali život představit. Jezdíme, komunikujeme, svítíme, pracujeme a to vše díky elektrické energii. Slouží tedy jako hlavní zdroj pro lidskou potřebu. První člověk, co se proslavil díky *elektřině* byl Michael Faraday, který krom pokusů na žabích stehýnkách objevil i elektromagnetickou indukci, která dnes slouží jako základní pohybová veličina u elektromotorů. Pohání se tedy od domácích spotřebičů po dopravní prostředky prakticky cokoliv. Jedním z těchto prostředků jsou i konvenční obráběcí stroje, které dnes tvoří základ kusové i sériové výroby. Největšího rozmachu se konvenční obrábění dočkalo ve 30. až 40. letech, kdy probíhalo zbrojení armád před válkou. Po válce se výrobní průmysl dostal do stavu recese. Bylo zapotřebí změnit myšlenku obráběcích procesů a zároveň udělat krok vpřed. Přišla na řadu myšlenka využití elektrické energie pro samotný úběr materiálu, která je dnes známá pod názvem *elektroeroze*. Této myšlence se zpočátku moc nedůvěřovalo, ale i přesto se jí dalo šanci projevit. A udělalo se dobře, jelikož se pro elektroerozi našlo velké využití při obrábění velmi tvrdých kalených materiálů. Podmínka pro funkčnost procesu byla zde jediná a to zaručení elektrické vodivosti jak obráběcí elektrody, tak obráběného materiálu. Vrcholu slávy elektroerozivní obráběcí proces dosáhl v 60. až 80. let, kdy prakticky neměl konkurenci v obrábění tvrdých kovových materiálů. Následovala doba úpadku, jelikož se průmysl obrátil ke směru, který zaručoval výrobu flexibilnější, rychlejší a efektivnější. Přišla na řadu CNC obráběcí stroje, kde se pomocí vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů dosáhlo mnohonásobně menších výrobních časů než u elektroerozivních strojů. Následovala doba vývoje laserů, plasmu nebo i zdokonalení řezání pomocí vodního paprsku. Elektroerozivní stroje tak definitivně ze sériové výroby zmizely. Nalezly však velké uplatnění v kusové výrobě, které se dnes věnují střední a malé firmy, které si nemohou dovolit investovat do drahých laserů nebo plasmových strojů. Pokračují zde ve svém účelu a právě na tom bude stavět tato akademická práce, kde bude připomenuta funkčnost elektroeroze a samotná výroba zvolené součásti v jedné malé firmě.



Obr. 1.0 Umístěná drátová řezačka Sodick ve strojovém parku malé střední firmy.

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Během zavádění přesných polotovarů a obtížně obrobitelných konstrukčních materiálů se na začátku 70. let pomalu přecházelo od mechanického obrábění k obrábění nekonvenčnímu. Hlavním důvodem bylo zefektivnění výroby a zvětšení přesnosti rozměrů daných součástí typu odlitků, výkovek a různých vylisků, které vyžadují poměrně malé dokončovací obrábění jako je broušení a leptání. Metody, které jsou schopny toto obrábění praktikovat se dělí na jednotlivé typy založených na elektrických, chemických, optických a jiných principech. Pro zpracování obtížně obrobitelných materiálů vznikly dvě metody – *tepelná a elektrochemická*. Výhodnou vlastností těchto metod je úběr kovů, který není závislý na jeho tvrdosti. V praxi to znamená, že daná obráběcí elektroda má daleko menší mechanické vlastnosti než obráběný materiál. Tato výhoda se dá velmi dobře využít při výrobě tvářených nástrojů jako jsou strážníky, ohybníky nebo při výrobě velmi složitých tvarů. [1]



Obr. 1.1 Růst pevnosti materiálu a řezné rychlosti v jednotlivých časových obdobích [1].

Na obrázku (obr.1.1) je znázorněno postupné zvyšování rychlosti řezání jako dopad vývoje technologie řezání v závislosti na časovém období. [1]

V důsledku vývoje technologie řezání se řezná rychlost u obrábění konvenčních materiálů po každých deseti letech zdvojnásobila (*čára a*). U ostatních materiálů (*čára b, c*) není vidět velký skok, ale i tak vývoj technologie udělal pokrok. U tepelných metod bývá energie většinou dodána ve formě tepla (plazmový hořák, plamen), světla (laser), elektronového nebo iontového paprsku a elektrického výboje (jiskra, oblouk). Hustota energie se vyskytuje v rozsahu $10^8 - 10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ a je soustředěna jak v prostoru, tak i v čase. V tabulce (tab. 1.1) je výtah těchto metod, který zobrazuje jejich základní charakteristiky. Jsou zde k porovnání zobrazeny také metody soustružení a broušení. [1]

Tab. 1.1 Porovnání nekonvenční a konvenční technologie obrábění [1].

	Maximum úběru materiálu ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	Spotřeba energie ($\text{kW} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{min}^{-1}$)	Rychlost řezání ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	Hloubka působení pod opracovaný povrch ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Přesnost		Stroje
					dosažitelná (mm)	při max. úběru (mm)	příkon (kW)
Soustružení	1630	0,0456	60	-	0,025	0,125	15
Broušení	820	0,456	1800	-	0,0025	0,125	15
Plazmový hořák	165	0,912	15	12,5	0,5	2,5	175
Elektroeroze	5,5	1,824	-	0,25	0,025	0,125	8
Elektrochemie	16,5	7,296	-	0,25	0,055	0,125	175
Ultrazvuk	0,8	9,12	-	0,05	0,155	0,025	15
Elektronový paprsek	0,008	456	60	8	0,0255	0,055	8
Bubínový laser	0,005	2736	-	6	0,0125	0,025	15

U nekonvenčního obrábění (tab. 1.1) se v praxi nepoužívá standardní řezný nástroj. K úběru materiálu dochází za použití tepelných, chemických nebo abrazivních metod. Tyto technologie se používají v případech, kde by byl klasický způsob obrábění nemožný z důvodu hlubokých tvarů a velmi malých vnitřních rohů nebo u materiálů, které se obtížně třískově obrábějí. [2; 3]

Podle fyzikálního principu se nekonvenční technologie dělí na [3]:

- elektrické technologie,
 - elektrokontaktní,
 - anodomechanické,
 - elektroerozivní,
- paprskové technologie,
 - vodní paprsek,
 - laser,
 - plazmový paprsek,
- ultrazvukové technologie,
- chemické technologie,
- elektrochemické technologie.

Charakteristika nekonvenčních technologií [3]:

- rychlost a výkonnost nezávisí u většiny na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- obráběný materiál může být tvrdší i pevnější než materiál nástroje,
- možnost výroby tvarově komplikovaných dílců,
- možnost provedení automatizace a sériovosti výroby.

2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Elektroerozivní obrábění (*EDM – Electrical Discharge Machining*) patří do skupiny elektrické technologie. Základní myšlenkou tohoto typu technologie není přeměna elektrické energie na mechanickou, ale využití elektrické energie jako takové k hlavnímu obráběcímu procesu. Metoda obsahuje tyto vlastnosti [2]:

- řezná (obráběcí) rychlost je u všech vodivých materiálů stejná,
- jednoduché zavedení nástroje do obrobku,
- možnost obrábět křehké materiály z důvodu působení malých sil nástroje.

2.1 Aplikace elektroerozivních metod

V elektroerozivním obrábění se pohybuje několik metod, u kterých se využívá různých poddruhů elektrické eroze. Jak už bylo řečeno, tak základní podmínkou pro vznik je materiál, který vede elektrický proud, takže z 80 % se to využívá především u obrábění kovových materiálů s libovolnou pevností a tvrdostí. Další materiál, který se dá obrábět je technická keramika, která je složená ze složek nitridů, karbidů a oxidů. [7; 8]

Vznik samotné elektroeroze se dá rozdělit na dva způsoby. První způsob je tzv. *bezkontaktní obrábění*, u něhož je povrch elektrody zasáhnutý elektrickým výbojem. U této metody musí elektrický výboj prorazit dielektrikum v mezeře mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, jakmile dosáhne hodnoty průrazového napětí. Bezkontaktní metoda se v některé literatuře vyskytuje pod názvem *elektrojiskrové obrábění*. [7; 8]

Druhý způsob je *kontaktní*, kde nastává kovový styk mezi obrobkem a nástrojovou elektrodou. Jakmile proudová hustota v kontaktním místě dosáhne optimální hodnoty proudové hustoty, tak se materiál začne tavit a následně vypařovat. Po vypaření materiálu se kontakt přeruší a vzniká elektrický výboj. Plný název této metody je *elektrokontaktní obrábění*. [7; 8]

2.1.1 Rozdělení elektroerozivního obrábění

Elektroerozivní hloubení nebo tvarové obrábění (EDM Sinking) (obr. 2.1): Největšímu uplatnění se dosáhlo v oblasti výroby střížných nástrojů, forem na lisování plastů a při výrobě zápusťek a různých tvarových nástrojů. [9]

Elektroerozivní drátové řezání (WEDM Wire Electrical Discharge Machining) (obr. 2.2): Tento způsob je zaměřen především na výrobu tvarově složitějších součástí. Největší uplatnění je podobně jako u hloubení ve výrobě střížných nástrojů a střížných maticí, ale může se objevit i ve výrobě brusných diamantových kotoučů. [9]

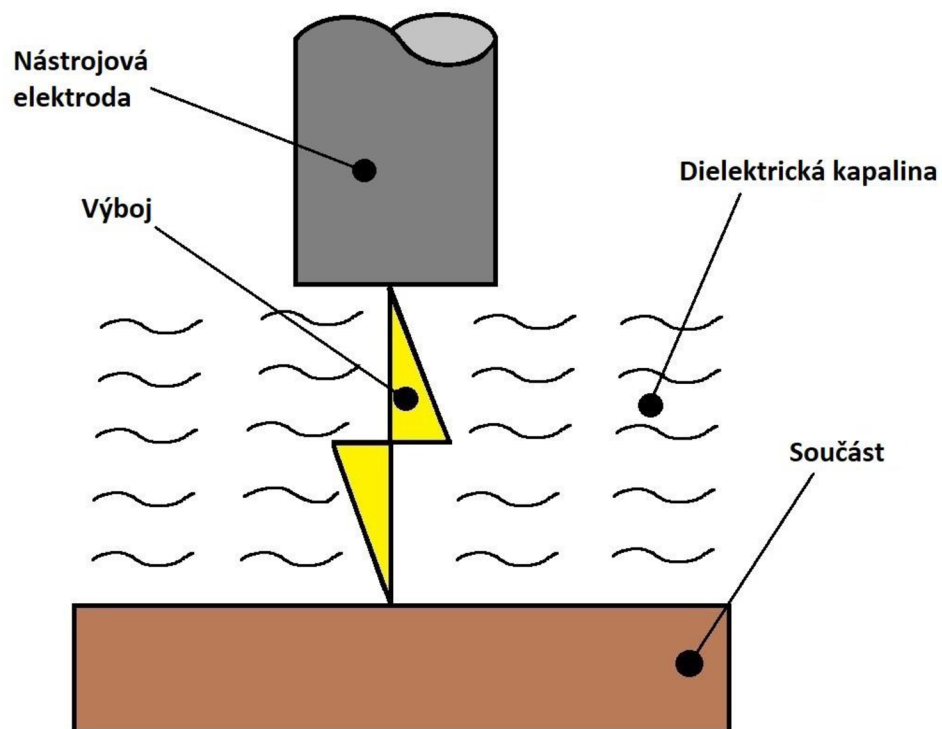
Elektrojiskrové broušení (EDG Electrical Discharge Grinding) (obr. 2.3): Tento způsob volně navazuje na předchozí způsoby výroby, s tím rozdílem, že nástroj není pevný, ale rotující kotouč z grafitu nebo mosazi, který není v kontaktu s obrobkem. Používá se nejvíce u dokončovacích operací při obrábění vysokopevných ocelí a slinutých karbidů SK. [7]

Elektroerozivní obrábění se krom samotné technologie obrábění třídí [7; 8]:

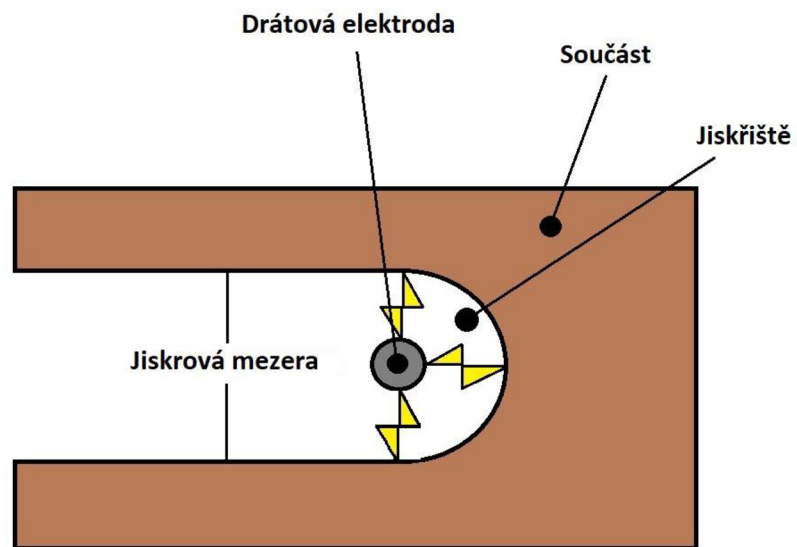
- podle formy impulsů na:
 - a) symetrické,
 - b) asymetrické.

- podle parametrů impulsů, které se člení na:
 - a) krátké ($t < 10^{-4}$)
 - b) střední ($10^{-4} < t < 10^{-3}$)
 - c) dlouhé ($10^{-3} < t < 10^{-2}$), t je čas výboje měřen ve vteřinách

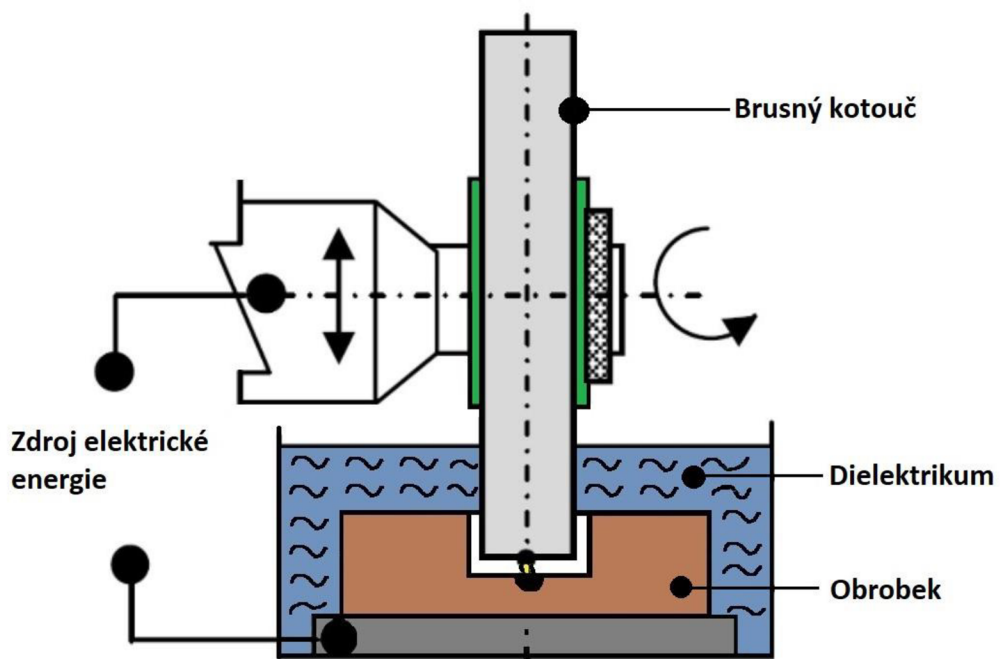
- způsobu vybuzování impulsů,
- druhu použitého generátoru.



Obr. 2.1 Elektroerozivní hloubení nebo tvarové obrábění (EDM Sinking) [9].



Obr. 2.2 Elektroerozivní drátové řezání (WEDM Wire Electrical Discharge Machining) [9].



Obr. 2.3 Elektrojiskrové broušení (EDG Electrical Discharge Grinding) [9].

2.2 Historie

Samotný fyzikální princip elektroerozivního obrábění je velmi složitý proces. Trvalo velmi dlouhou dobu, než se podařilo tento způsob obrábění dostat do průmyslového odvětví a hlavně správně uplatnit. Počátkem toho všeho bylo objevení samotné elektroeroze, které si poprvé všiml pan Joseph Priestley (1733-1804), což byl člověk, který do světa udělal průlom nejen skrze objevení elektroeroze, ale také objevení prvků jako jsou kyslík, dusík, fluor nebo čpavek. V chemii měl obrovskou zálibu, ale největších ohlasů dosáhl při objevení a popsání fotosyntézy. Je také považován za vynálezce mazací gumy a sodovky, za což dostal Copleyho vyznamenání. Co se týká samotné elektroeroze, tak první zmínky o ní pan Priestley popsal do své knihy *Historie a současný stav nauky o elektřině s originálními pokusy* z roku 1768, kde se o elektroerozi zmínil jako o elektrickém výboji vznikající na plochách ležících proti vodivým elektrodám. Výsledkem toho byly vyhloubené krátery. [1; 4]

Dalšími vysoce známými průkopníky jsou manželé Lazarenkovi, kteří Priestlyho teorii o elektroerozi přivedli do praxe. Boris Romanovič Lazarenko (1910-1979) byl vysoce postavený sovětský vědec, který celý svůj život zasvětil bádáním a zkoumáním kovových polotovarů v elektrostatických podmínkách. Stal se dokonce ředitelem Ústřední výzkumné laboratoře pro elektrické zpracování materiálů. V letech 1938 až 1944 se věnoval spolu se svojí ženou N. I. Lazarenkou výzkumu elektrických výbojů a jejich vlivu na elektricky vodivé materiály. Aplikace probíhala tak, že postupně vtláčovali elektrodu do obráběné součásti a díky působení elektroerozivních sil se v součásti objevil přesný tvar elektrody, který byl zvětšen o tloušťku dielektrika. Postupem času přišli na to, že elektroeroze probíhá na všech elektricky vodivých materiálech v kapalném i plynném dielektriku. Výsledek tohoto průzkumu a zapojení, které se skládalo z úpravy obvodu RC (rezistor-kondenzátor), si nechali manželé patentovat a následně za to v roce 1946 dostali Stalinovu cenu za výzkum v oblasti elektrotechniky. Lazarenkova metoda zapojení se dostala do výroby v 50. letech, kdy se poprvé na trhu objevily první elektroerozivní stroje, které se následně zdokonalovaly zabudováním výkonnějších generátorů. [1; 5]

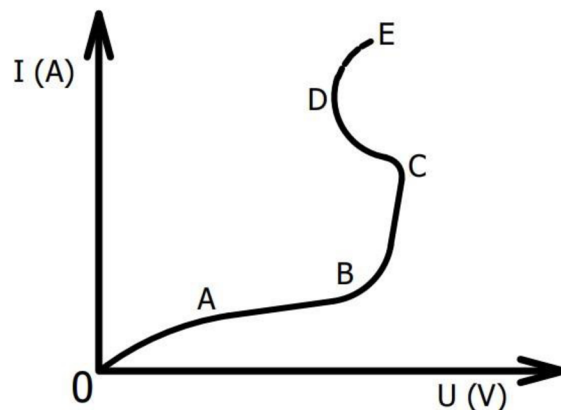
Elektroerozivnímu obrábění se dostalo velké oblibě, jelikož poskytovalo obrovskou výhodu při obrábění tvrdých kalených materiálů. Mezi lety 1960 až 1970 došlo k obrovskému rozmachu v průmyslu. Postupně tak vznikaly elektroerozivní stroje, které se přizpůsobovaly tamní výrobě v daných pracovních podmínkách. Dnes tyto stroje dělíme podle způsobu obrábění na drátové řezačky (WEDM) a hloubičky (EDM Sinking). Největší problém, který se dříve musel řešit byl, jak kontrolovat obráběcí proces, tak aby vznikl potřebný konečný tvar součásti. Z hlediska bezpečnosti bylo jasné, že to nemohla dělat obsluha stroje, jelikož se zde pracuje s obrovskou elektrickou energií. S řešením přišel americký inženýr David H. Dulebohn spolu se svou skupinou lidí, kdy upravili drátovou řezačku na NC stroj. Ten pracoval na principu optického sledování vlákna, které kopírovalo tvar součásti. Po zdokonalení počítačové techniky se v 70. letech postupně předělávaly elektroerozivní stroje na CNC EDM. Zde hlavní úlohu tvořil počítač, který kontroloval celý obráběcí proces spolu s kvalifikovanou obsluhou. [5; 6]

2.3 Základní princip eroze

Elektroerozivní obrábění má velkou výhodu, že dokáže obrábět prakticky všechny elektricky vodivé materiály. K tomu je potřeba započítat, že materiál nástroje bývá většinou méně pevný než materiál obráběný. Příkladem nástroje může být měď, která dokáže svými elektricky vodivými vlastnostmi řezat kalené oceli. Obrovskou nevýhodou eroze však je popsat princip, jak vlastně funguje, a co je k ní potřeba. U frézování nebo soustružení je možné vidět stroje a nástroje v pohybu, tudíž není složité obráběcí proces kontrolovat pomocí většího či menšího úběru materiálu, regulací otáček nebo posuvu. Je to tedy založeno všechno na mechanickém pohybu daných segmentů, který nám společně tvoří obráběcí proces. Elektroerozivní obrábění je založeno na principu vzniku výboje mezi dvěma elektrodami, kde mohou nastat jednotlivé případy [1]:

- a) výboj ve velmi řídkém plynu,
- b) výboj ve vzduchu nebo v plynu při normální teplotě a tlaku,
- c) výboj v dielektrické kapalně.

Tyto výboje se nemusí pohybovat jen při obrábění, ale našly také velké využití v oblasti tváření nebo svařování. Na základě toho vznikla následná voltampérová charakteristika (obr. 2.4), která rozděluje jednotlivé vlivy výboje. [1]

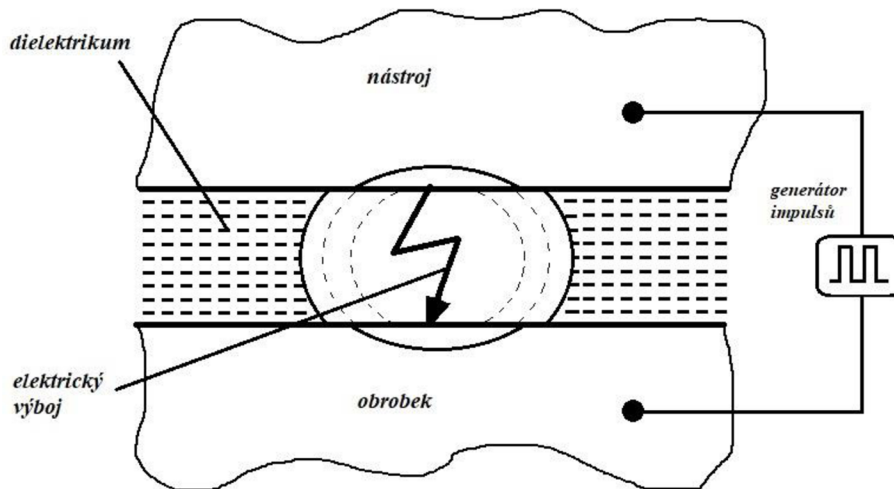


Obr. 2.4 Závislost napětí a proudu v průběhu odlišných forem elektrického výboje mezi dvěma elektrodami na vzduchu [1].

Při stručné analýze diagramu lze konstatovat, že části [1]:

- 0 – A ukazují úseky jevů, které je možno spatřit v jednoduché elektronice,
- B – C tento úsek se používá ke zmenšení drsnosti u tvarově složitých forem,
- C – D úsek s negativním tvarem charakteristiky napětí ukazuje neočekávané výboje a využívá se zejména u elektroerozivního obrábění, u kterého prochází proud mezi katodou a anodou ve velmi krátkém čase,
- D – E ukazuje oblast vysokých teplot. Tento úsek nachází své místo u svařovacích a tvářecích operací.

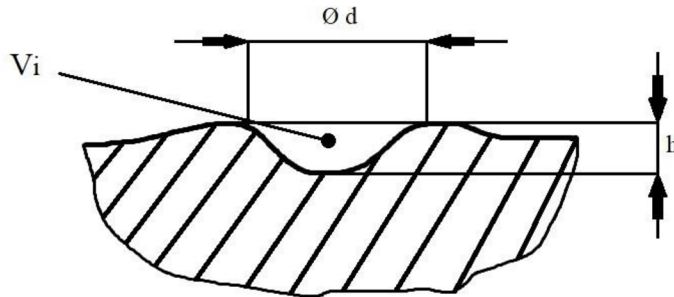
Elektroerozivní obrábění se dá také přeložit jako elektrotermické obrábění probíhající za daných podmínek v dielektrické kapalině, která je elektricky nevodivá. Postup obrábění využívá výskyt elektroeroze způsobené elektrickými výboji mezi dvěma elektrodami – obrobek (+) a nástroj (-). Elektrický výboj vznikne díky impulsu jednosměrného elektrického proudu (DC) mezi nástrojem (zapojen jako anoda) a obrobkem (katoda), současně jsou obě elektrody od sebe vzdáleny od 0,001 mm až do 0,1 mm (obr. 2.5). V místě, kde dojde k výboji na povrchu obráběné součásti, se materiál povrchu prudce zahřeje až na teploty okolo 10 000 až 12 000 °C. Při této teplotě se už většina materiálů nejen že taví, ale i odpařují. Během tedy krátkého okamžiku se skupenství mění z pevného na plynné a minimalizuje se tím maximálně vytvořený odpad materiálu. V místě zásahu vzniká kráter, který se postupně zvětšuje v souladu s elektrickými výboji. Musí se samozřejmě počítat s tím, že v místě zásahu nastává tepelně ovlivněná oblast, to znamená, že ne všichni materiál se odpařil či odtavil. Vznikají zde postupně obrobene mikročástice součásti, které jsou pro další operační výboj škodlivé, proto se musí z mezery mezi elektrodami odstranit pomocí proudu dielektrické kapaliny. [7]



Obr. 2.5 Princip elektroeroze [7].

Výboj na povrchu mezi elektrodami, to je hlavní role v elektroerozivním obrábění. Výbojem se rozumí vodič elektrického proudu v plynném skupenství. Nosnými prvky proudu jsou elektricky nabitě částice tzv. elektrony a kationty vznikající při konečné fázi ionizace plynu mezi katodou a anodou. Nabitě částice obdrží v elektrickém poli pohybovou energii, která se posléze odevzdává povrchu elektrod. Stručně se dá říci, že celý obráběcí proces je založen na principu přeměny elektrické energie na energii tepelnou. Elektroerozivní obrábění není jediné, které s tímto principem pracuje. Velké využití také našlo v oblasti svařování na jejímž principu pracuje elektronové svařování (Electron-beam welding) nebo svařování plazmovým obloukem (Plasma arc welding). U těchto procesů taktéž vzniká ionizovaný plyn, v němž se přeskupují elektrony vysokou rychlostí. Po dopadu na povrch svařovaného dílce pronikají tyto elektrony do určité hloubky, kde předají svoji kinetickou energii částicím daného materiálu, který se následně prudce ohřeje na vysokou teplotu. Ve svařovacích procesech je však princip povýšen o další elementy jako je fokusace paprsku elektronů nebo urychlení elektronů pomocí třetí elektrody, která má záporné napětí oproti katodě, a její elektrické pole ovlivňuje dráhu i proud elektronů. Fokusace slouží k usměrnění elektronů do určitého bodu ve svařovaném dílci a ovlivňuje tvar konečné podoby svaru. Nutno konstatovat, že u svařovací technologie musí být svar chráněn pomocí ochranného plynu před okolním prostředím, které může konečný svar degradovat. Tento plyn se dá přirovnat k dielektriku, které taktéž plní funkci ochrany. [7; 8]

Z počátku se stroje elektroerozivního obrábění koncipovaly pouze na elektrický výboj mezi elektrodami. Tento způsob se brzy zavrhl, jelikož elektrické výboje neměly tak velký účinek na elektrody, aby se daly použít na úběr materiálu. Proto se musel najít způsob, jak zaručit plnou účinnost výboje pro obráběcí operaci. Navrhl se způsob dielektrika mezi elektrodami, které daný proces vzniku elektrického výboje podpoří pro úběr materiálu. Vznikly tak nové faktory, které jsou potřeba pro plně funkční výboj pro úběr materiálu. Jedním z nich je prostorová hustota výboje, která je klíčovým faktorem pro vznik malých dutin na povrchu elektrod, kde jejím přesně odpovídajícím odrazem je objem, průměr a hloubka kráteru. [7; 8]



Legenda: V_i – odebraný objem materiálu [mm^3], d – průměr dutiny [mm], h – výška dutiny [mm].
Obr. 2.6 Dutina vytvořená elektrickým výbojem [7].

Profily dutiny vznikají jako konečná fáze výboje (obr 2.6). Jsou tedy závislé, jak na velikosti elektrického výboje, tak na době jeho trvání. Objem kráteru je dán vztahem [1]:

$$V_i = \frac{\pi r^2 h}{2} \quad [\text{mm}^3], \quad (2.1)$$

kde : r je poloměr [mm]

h je výška kráteru [mm].

Díky vypočtenému objemu tak je možné vypočítat potřebnou energii pomocí vztahu [1]:

$$\frac{V_{ia}}{k_a} = W_i \quad [J] \quad \text{nebo} \quad \frac{V_{ic}}{k_c} = W_i \quad [J], \quad (2.2)$$

kde: k_a a k_c – koeficienty vztahující se k anodě a katodě,

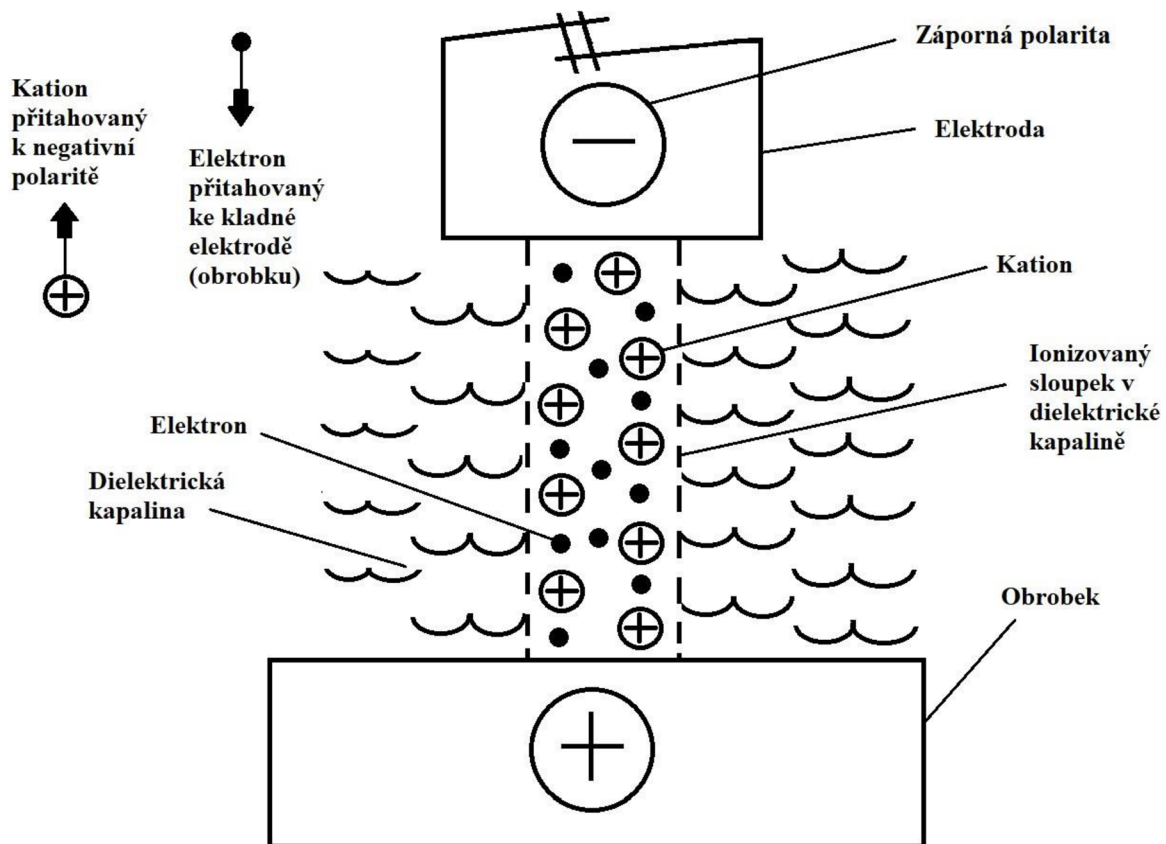
W_i [J] – vybíjecí energie.

Stručně lze konstatovat, že vyhodnocení probíhá na základě poměru průměru k výšce dutiny. Tento poměr však nemusí být konstantní a může se různě měnit v závislosti na parametrech nastavení výboje (čas, doba průběhu, energie), dielektrické kapalině nebo na chemickém složení elektrod (katody a anody). Poměr $h:d$ by se při správném nastavení krátkých impulsů měl pohybovat okolo hodnot 0,1 až 0,002. Konečný výsledek vzhledu vytvořené dutiny má velký význam na přesnost rozměru, drsnost obrobené plochy a účinnost operace. [1; 7]

2.3.1 Parametry výboje

Krom samotného elektrického výboje je důležitá také jeho polarita během procesu (obr. 2.7), jelikož rozrušování samotného výboje není na daných elektrodách stejnorodé. Na anodě bývá rozrušování větší než na samotné katodě. Polarita se však dá snadno zaměnit a závisí to na více činitelů. Jedním z nich jsou [7]:

- vzdálenosti mezi elektrodami,
- průbojnost a vodivost dielektrické kapaliny,
- znečištění dielektrika.



Obr. 2.7 Polarita ve výboji [8].

Vznik elektrického výboje dochází většinou tam, kde se vyskytuje pól s napětím, které má největší elektrický potenciál. Díky působení tohoto pólu se uvedou do pohybu elektricky nabitě částice kationty a anionty, které se nesou ve formě elektronů. Tyto prvky se vlivem působení elektrických sil zrychlují a dosahují vysoké rychlosti. Vznikne tak ionizovaný vodící sloupek, ve kterém začíná mezi elektrodami proudit elektrický proud sloužící jako základ pro vznik výboje mezi elektrodami. Vytvoří se tím tak plazmové pásmo, ve kterém dosahuje teplota až 3000 – 12 000 °C. Tyto jednotlivé výboje probíhají v jednotlivých fázích procesu [7]:

1. Fáze

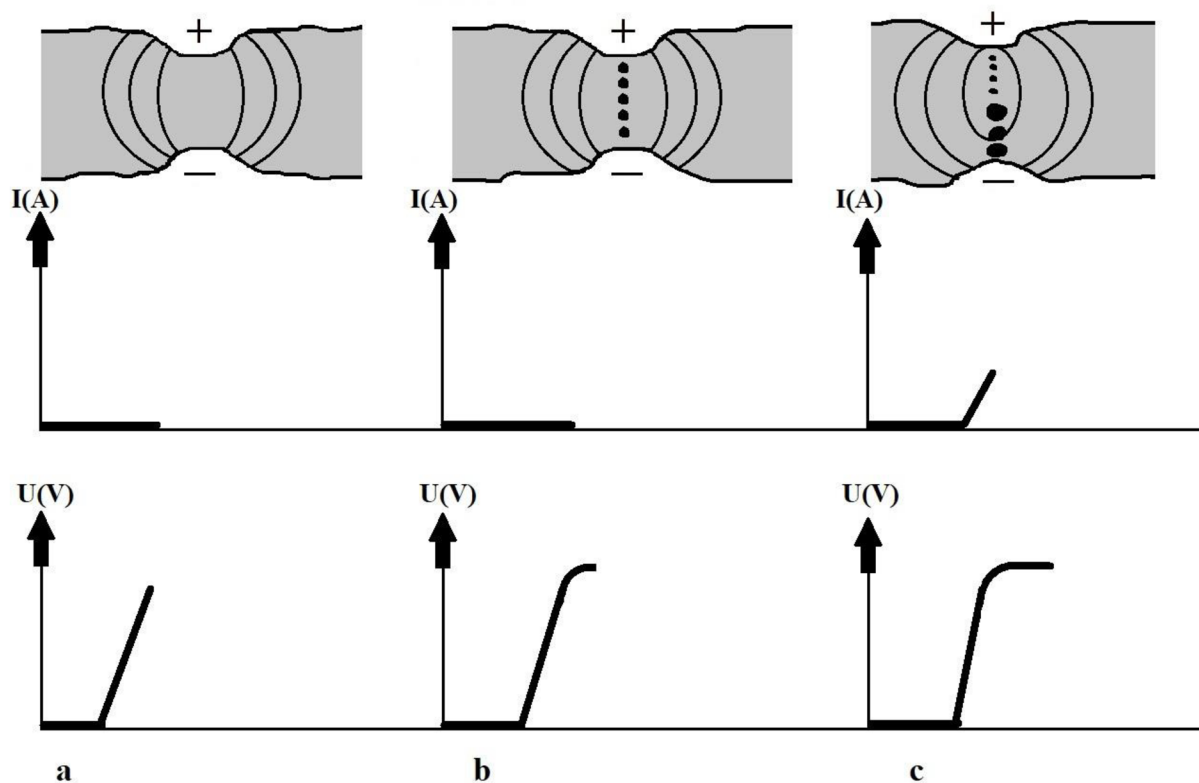
Pokud se zesílí elektrické pole, tak mezi elektrodami dojde k polarizaci jednotlivých molekul a iontů v dielektriku. Vlivem nerovnosti povrchu elektrod se v místě s minimální vzdáleností vytvoří místo, které slouží jako ohnisko pro vznik gradientu (obr. 2.8 a). Elektricky nabitě částice postupně míří do tohoto místa. [7]

2. Fáze

Napětí v této fázi dosáhne nejvyšší úrovně. Následně elektricky vodivé částice vytvoří přechodné mosty jako základní prvek pro tvorbu a zapálení výboje (obr. 2.8 b). [7]

3. Fáze

Ze záporné elektrody (katody) jsou emitovány elektrony, které se srážejí s neutrálními částicemi v obrobku. Elektrony se naváží do valenčních vrstev částic a tvoří tak kladné a záporné ionty. Ve sloupku tak vznikají kationty a anionty, které vytvoří zionizované prostředí (obr. 2.8 c). [7]



Obr. 2.8 Průběh v elektrickém poli (1) [7].

4. Fáze

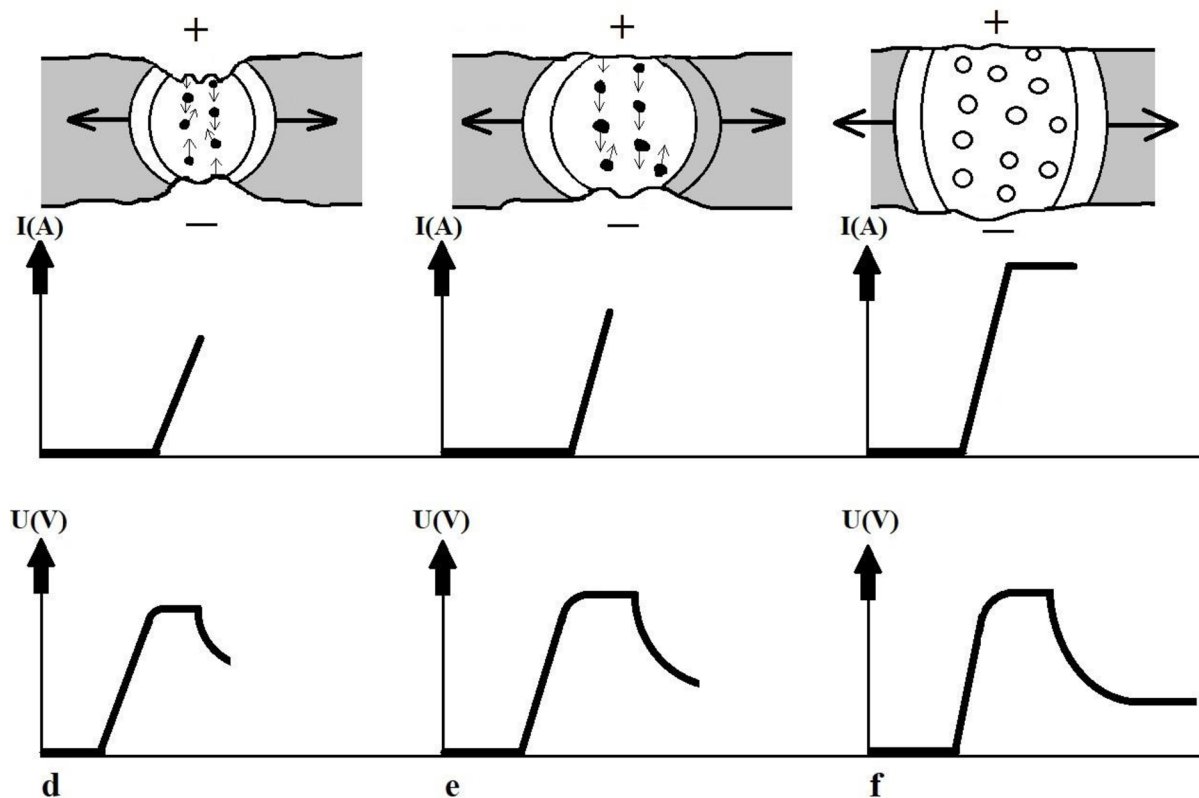
Ionty obklopují ohnisko budoucího výbojového sloupku a tím pádem klesá jeho odpor. V prostoru mezi elektrodami začne proudit proud. Vytvoří se vodivý sloupek z plazmy a vzroste teplota na povrchu elektrod. Napětí na elektrodách klesá a roste proud (obr. 2.9 d). [7]

5. Fáze

Vlivem vysoké teploty se začne odpařovat dielektrikum a vzniká díky tomu plynová bublina. Částice v procesu vzájemně na sebe působí a narážejí do sebe, během tohoto procesu si předávají kinetickou energii, která se následně vlivem tření mění na tepelnou. Nárazy elektronů na anodu a iontů na katodu vzniká ohřev elektrod, které se následně taví a odpařují. Proud vzroste a napětí dosahuje hodnot vhodných pro zápalnou teplotu výboje (obr. 2.9 e). [7]

6. Fáze

Velmi silný rozptyl bubliny a intenzivní tavení a vypařování materiálu (obr. 2.9 f). [7]



Obr. 2.9 Průběh v elektrickém poli (2) [7].

7. Fáze

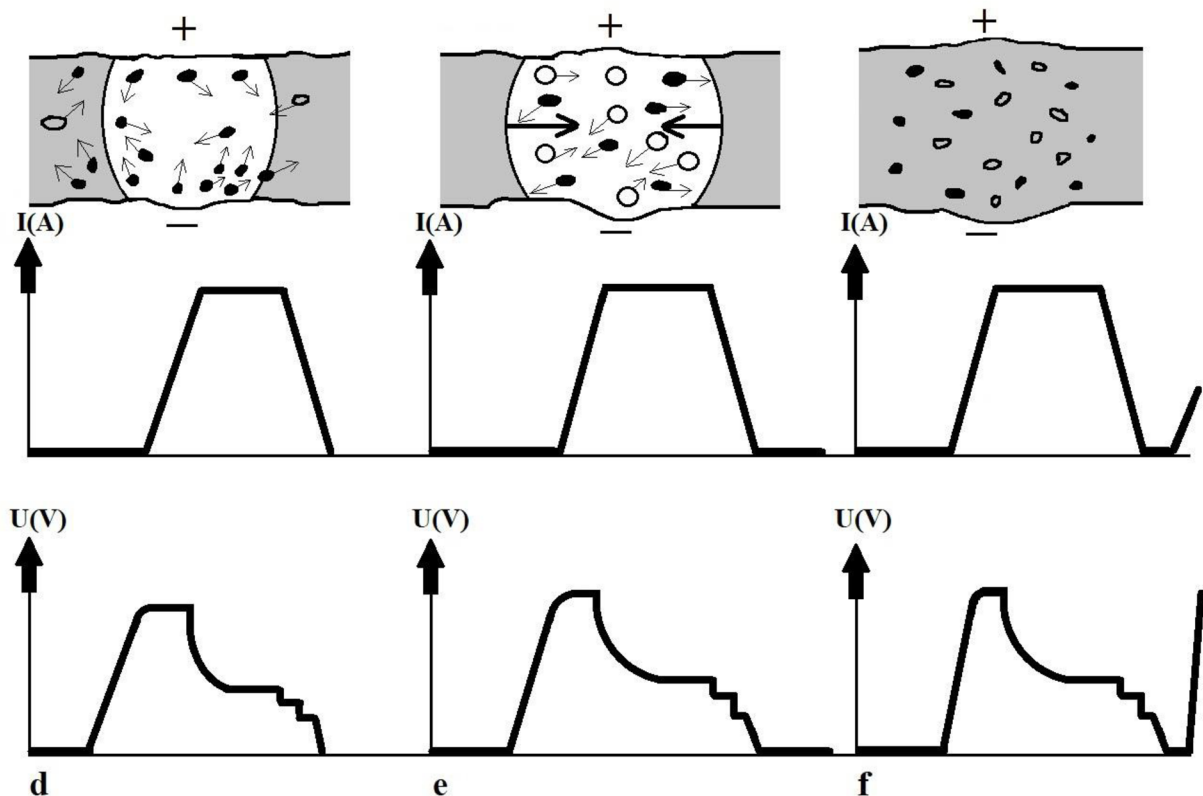
V této fázi nastává „výbuch“ plynové bubliny neboli vyrovnání tlaků směrem do středu. Síly elektrického pole a snížení tlaku plynu (kavitace) způsobí porušení materiálu vytrháváním taveniny do prostoru. Tímto způsobem vzniká dutina neboli kráter (obr. 2.10 g). [7]

8. Fáze

Zmizení bubliny, zaniknutí výboje a zánik proudu a napětí jsou charakteristickým znakem pro tuto fázi. Do kráteru vniká dielektrická kapalina, která zde má funkci chlazení a zabraňuje průniku tepla hlouběji do materiálu. Materiál, který se vlivem výboje odebral, zůstává ve formě mikročástic a ve tvaru kuliček, které vznikly z taveniny obrobku. Tyto mikročástice jsou v určitém množství potřebné pro vznik poslední fáze obráběcího procesu (obr. 2.10 h). [7]

9. Fáze

Poslední fáze procesu, kdy se proces vrací zpět na začátek první fáze. Dielektrická kapalina je znečištěna mikročásticemi z elektrického výboje a obsahuje skupinu volných iontů, který slouží jako základ pro tvorbu nového výbojového sloupku (obr. 2.10 i). [7]

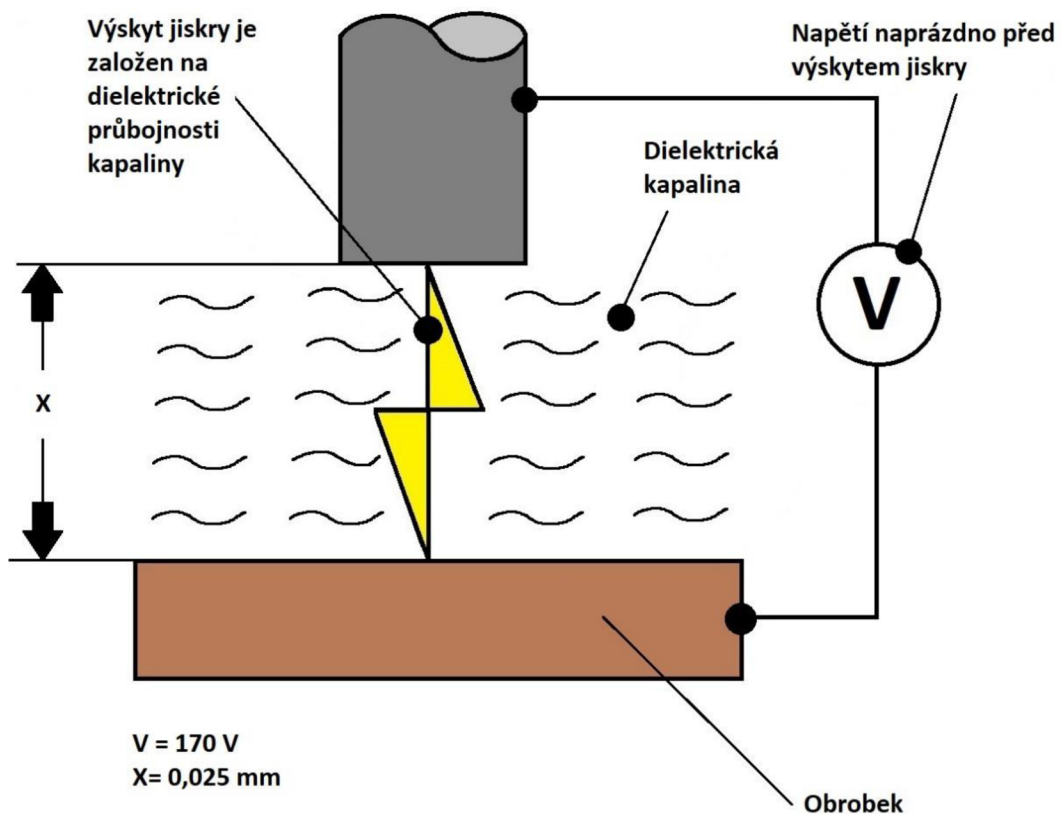


Obr. 2.10 Průběh v elektrickém poli (3) [7].

Důležitý fakt, který zaručuje správný chod procesu jednotlivých fází, je regulace přísuvu nástrojové elektrody a nastavení pracovní mezery. Proto každý elektroerozivní stroj obsahuje servomechanismus, který má za úkol tuto mezeru udržovat v konstantní vzdálenosti. Pokud by byla mezeru moc velká, tak by daný výboj nemusel být tak účinný, nebo by vůbec nemusel nastat. [8]

2.3.2 Ionizace

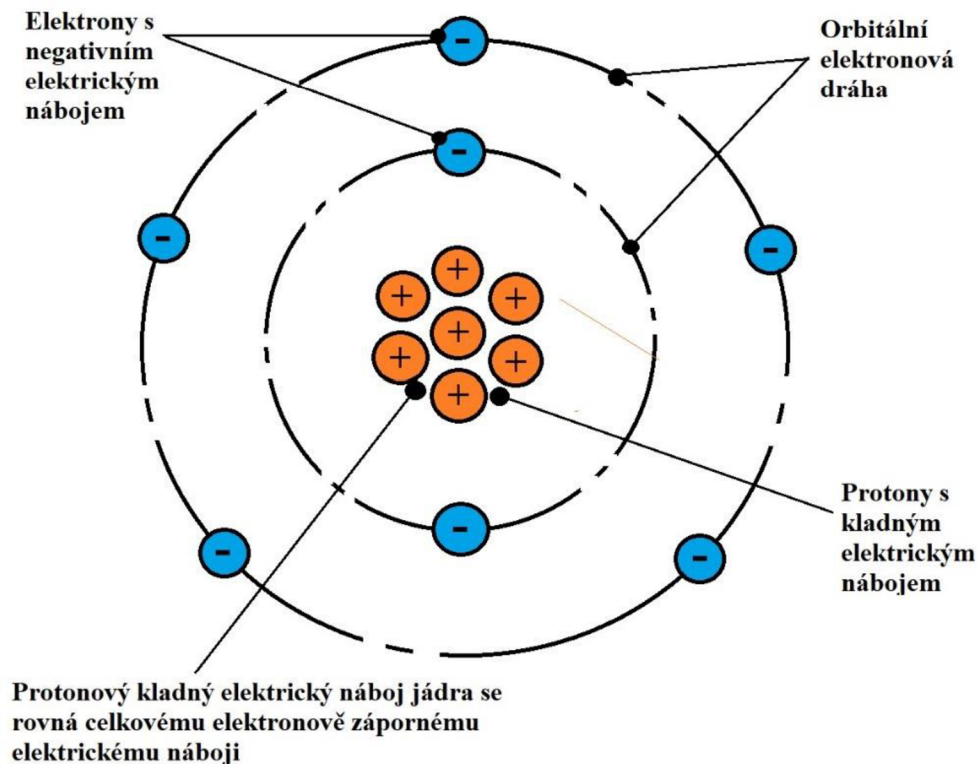
Ionizace je děj, při kterém se z neutrálního atomu stává iont. Opačným dějem, kdy se z iontů stávají neutrální atomy či molekuly je rekombinace. Ionizační proces nevzniká samovolně a musí být uměle vyvolán určitým zdrojem. U elektroerozivního obrábění se používají většinou zdroje stejnosměrného napětí (DC) z důvodu lepší stability vedení a kontroly elektrického proudu při obráběcím procesu. Než dojde k samotnému úběru materiálu, tak se předem musí nastavit jednotlivé parametry pro správný výboj. Jeden z parametrů je správně nastavit rozmezí elektrod tak, aby následný vzniklý výboj obsahoval správnou velikost energie potřebné k obrábění. V praxi se většinou pohybuje rozmezí mezi 0,01 až 0,025 mm. Při počáteční fázi se nástrojová elektroda posouvá směrem k obrobku, tak aby byla nastavená již zmíněná vzdálenost mezi nejbližšími body. Během doby předstihu elektrody se mezi elektrodou a obrobkem aplikuje napětí o velikosti 170 V. Toto napětí se nazývá napětí naprázdno, protože mezi elektrodou a obrobkem neproudí žádná elektrina. Při napětí rovném 170 V a rozteči 0,025 mm dielektrická kapalina ionizuje a mění se z elektrického izolátoru na elektrický vodič (obr. 2.11). Elektrický proud tak proudí mezi elektrodou a obrobkem přes ionizovanou dielektrickou kapalinu, která krom přenosné funkce plní i funkci ochrannou před okolní atmosférou. Po ionizaci dielektrické kapaliny elektrina pokračuje v průtoku kapalinou, dokud není vypnuta. Po vypnutí dielektrická kapalina deionizuje (rekombinuje) a opět se stává elektrickým izolátorem. Tento proces ionizace a deionizace dielektrika probíhá pro každou obráběcí jiskru, která se může pohybovat ve velikosti frekvence 1 000 Hz. Všechny vstupy typu napětí, proudu a frekvence pulzů návrháři zakomponovali jako součást sestavy napájecího zdroje, a je tak možné na displeji pozorovat a měnit reference pro podmínky obrábění. [8; 10]



Obr. 2.11 Dielektrická průbojnost [8].

Pojem ionizace se zařazuje do oblasti atomové fyziky, kde se vztahy mezi protony, neutrony a elektrony zkoumají na daleko větší úrovni. Základem všeho je atom, který je tvořen jádrem s elektrony na oběžné dráze obíhající kolem něj. Jádro se skládá z protonů, které mají kladný elektrický náboj, a z neutronů, které nemají žádný elektrický náboj, a tak je možné jejich přítomnost v ionizaci zcela ignorovat. Elektrony mají záporný elektrický náboj a tvoří protipól kladně nabitým protonům. U každého atomu, který je v klidném stavu, se počet protonů a elektronů navzájem rovná. Výsledkem tedy je, že elektrický náboj v normálním vyváženém atomu je nulový. [8; 10]

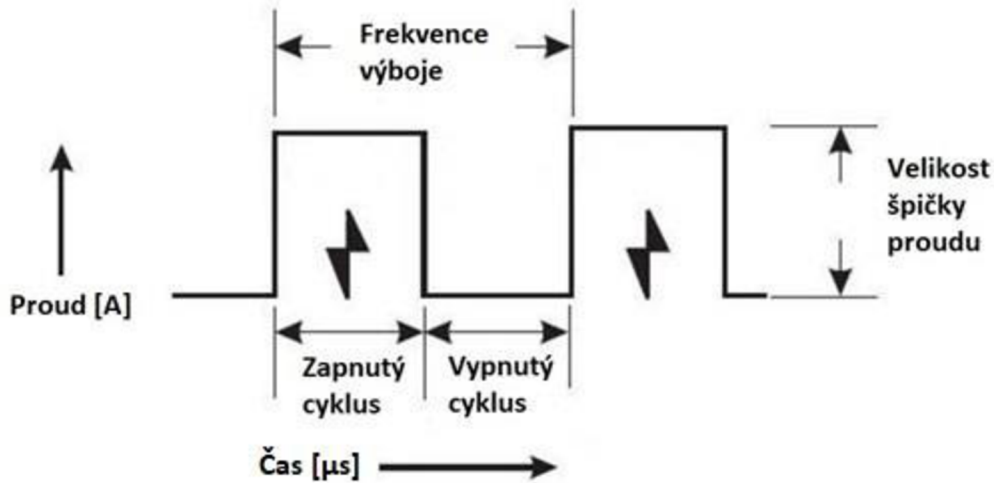
Vlivem dodání určité elektrické energie nastane stav, kdy se může jeden z elektronů vychýlit a opustit tak svou oběžnou dráhu kolem jádra atomu. Tento letící elektron se v atomové fyzice označuje jako volně letící elektron, který svou kinetickou energii předává atomům obráběné součásti, kde se daná energie mění na tepelnou, a dochází tak k odpaření nebo odlomení mikročástic obrobku. Atom s chybějícím elektronem již není v rovnovážné poloze a stává se z něho kladně nabitý iont, který je následně přitahován k záporné elektrodě (katodě). [8; 10]



Obr. 2.12 Elektrický náboj v atomu [8].

2.4 Pracovní podmínky

Vybíjecí energie, jednosměrný elektrický proud a napětí nejsou jedinými parametry, které je nutné nastavit. U praktického využití elektroerozivních výbojů je také potřeba nastavit správnou frekvenci výbojů z hlediska odpovídajícího úběru materiálu součásti. Frekvence výbojů v tomto případě znamená, jak rychle se budou dané výboje objevovat a jak rychle budou schopné vytvořit vyhloubeninu v daném objemu. [11]



Obr. 2.13 Průběh frekvence a impulzů [11].

Celkové množství odebraného materiálu za určitou časovou jednotku je dáno součtem objemů na katodě a anodě. [11]

$$V_{a,c} = \sum V_{ia,c} \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}. \quad (2.3)$$

V závislosti na přiváděné energii určitých výbojů W_i je možné konstatovat, že

$$V_a = \sum nk_a \eta_d W_i = Nk_a \eta_d W_i \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (2.4)$$

$$V_c = \sum nk_c \eta_d W_i = Nk_c \eta_d W_i \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (2.5)$$

kde k_a, k_c jsou již zmíněné faktory závislé na materiálu elektrod a způsobu přivodu dielektrické kapaliny,

η_d – účinnost elektrického výboje,

n [s^{-1}] – četnost impulzů za danou časovou jednotku,

N – celkové množství impulzů za určitou dobu. [1; 11]

Kvalita a hodnota proudu či napětí impulzu se dá vypočítat jako střední hodnota jednoho impulzu při době jeho trvání τ [1;11]:

$$I_{im.st.} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} i(t) dt [A], \quad U_{im.st.} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u(t) dt [V] \quad (2.6)$$

kde: $i(t)$ [A] – proud výboje,
 $u(t)$ [V] – napětí výboje,
 τ [s] – doba jedné periody.

Z toho se následně dá vyjádřit energie impulzu

$$W_i = \int_0^{\tau} u(t) \cdot i(t) dt [J]. \quad (2.7)$$

Pro střední hodnotu proudu a napětí v době jedné celé periody za určitý čas T [s] existuje vztah

$$I_{st} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt [A], \quad U_{st} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt [V]. \quad (2.8)$$

Efektivní hodnoty proudu a napětí se vyjadřují vztahem

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} [A], \quad U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} [V]. \quad (2.9)$$

a též střední hodnota energie jednotlivého impulzu

$$W_{im.st.} = \frac{W_i}{\tau} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u(t) \cdot i(t) dt [J], \quad (2.10)$$

a střední energie v době celé jedné periody je

$$W_{st} = \frac{W_{im.st.}}{T} = W_{im.st.} \cdot f [J], \quad (2.11)$$

kde f je frekvence (Hz nebo s^{-1}).

Vztahy (2.4) a (2.5) se také dají upravit a můžou mít podobu tvaru (2.12), kde následně plyne, že určité množství odebraného materiálu je přímo úměrné přivedené střední energii výbojů a frekvenci, jelikož pro tento případ lze považovat $k_{a,c}$ a η_d za konstanty. [1; 11]

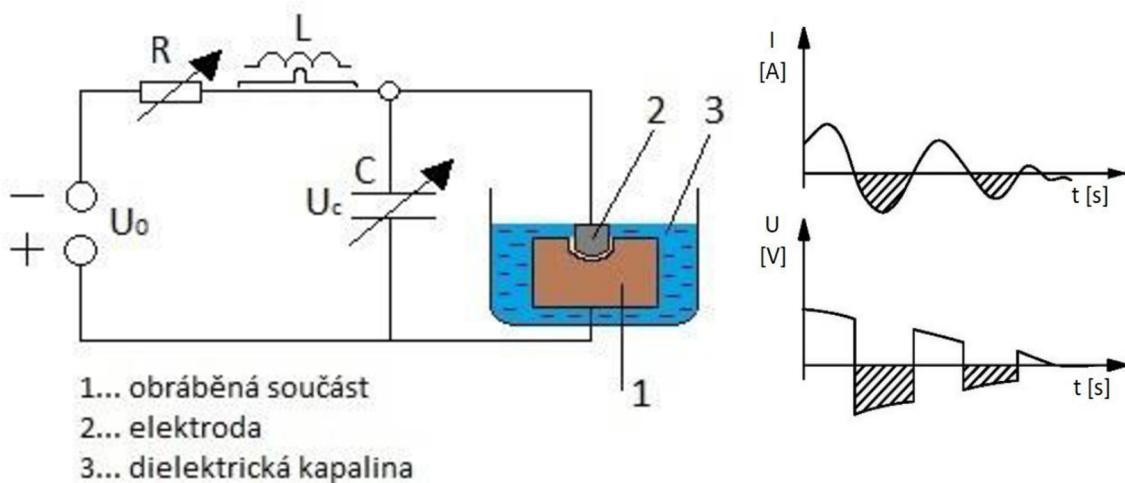
$$V_{a,c} = k_{a,c} \eta_d f \int_0^{\tau} u(t) \cdot i(t) dt \quad [mm^3 \cdot s^{-1}], \quad (2.12)$$

2.5 Zdroje elektrické energie (EDM)

Napájecí zdroj u EDM je hlavním centrem každé obráběcí operace. Za posledních 40 let se zdroje mnohokrát inovovaly a vylepšovaly s ohledem na rychlost obrábění, efektivitu a hlavně na elektrický příkon, který hrál největší roli. Stroje se vylepšovaly krom USA i v evropských zemích, a tak vznikly spousty různých druhů zdrojů pro obráběcí proces. Všechny tyto zdroje však měly jeden společný cíl, a to přeměnit elektrickou energii na tepelnou energii, která zajistí obráběcí proces. Sestavy napájecích zdrojů obsahují podsestavy pro stejnosměrný napájecí zdroj, servořízení, rozvod střídavého elektrického napájení a ochranu proti stejnosměrnému oblouku. Nejpoužívanější zdroje ve výrobě jsou polovodičové generátory, nezávislé generátory a relaxační generátory (RC a RLC). [8; 12]

2.5.1 Závislé generátory RC a RLC

Závislé generátory se řadí mezi nejstarší zdroje pro napájení obvodu. Jsou složeny ze servopohonu, kondenzátoru zapojeného paralelně a rezistoru zapojeného do série s nástrojem a obráběnou součástí. Základní činností generátoru je neustálé periodicky opakující se vybíjení a nabíjení kondenzátoru na určitou hodnotu vhodnou pro obráběcí režim. Nabíjení kondenzátoru probíhá ze zdroje stejnosměrného napětí skrze rezistor a následné vybíjení probíhá v jiskřišti. Vybíjení nastane v okamžiku, kdy velikost napětí dosáhne průrazové hodnoty, která změní dielektrikum z nevodivého vztahu na vodivý. Závislé generátory dostaly toto označení proto, že jsou závislé na opakovací frekvenci. Výboje jsou zde krátké v rozsahu $t_i = 10^{-4} - 10^{-7} s$. Zapojení RC a RLC obvodu je znázorněno na obr. 2.14. [2; 13]



Obr. 2.14 Základní obvod RC a RLC generátoru a jeho časový průběh proudu I a napětí U [13].

Jak už bylo řečeno, tak kondenzátor C je napojen k jiskřišti paralelně (vedle sebe). Jiskřiště je tvořeno nástrojovou elektrodou a obráběnou součástí. Dohromady tvoří celek uzavřený obvod, který je napájený ze zdroje stejnosměrného napětí U_0 přes odpor R na napětí U_c , při kterém nastane průraz dielektrické kapaliny. Toto napětí však nemusí být konstantní, jelikož je ovlivněno vzdáleností elektrod a hlavně množstvím nečistot na povrchu elektrod. V poslední fázi se nahromaděný náboj na kondenzátoru v krátkém intervalu vybije díky vzniklému výboji. Pro tento cyklus existuje základní fyzikální vztah [2; 13]:

$$W_c = \frac{1}{2} C \cdot U_c^2 \text{ [J]} \quad (2.13)$$

kde: C [F] – kapacita kondenzátoru,
 U_c [V] – napětí na kondenzátoru,
 W_c [J] – nahromaděná energie na kondenzátoru.

Přibližně polovina energie nahromaděné na kondenzátoru W_c se nevybije ve 100 % míře. Musí se počítat s tím, že se polovina energie ze stejnosměrného zdroje ztratí na předem předřazeném odporu R (Ω). Další ztráty energie probíhají na obvodu směrem k jiskřišti a hlavně u vzniku samotného výboje. V součtu nakonec vychází na obráběcí proces přibližně 25 % energie. Toto číslo se zdá být malé, ale v součtu s opakovací frekvencí to pro obráběcí proces je plně dostačující. Opakovací frekvence se opakuje ve stejném intervalu, a tak se dá vyjádřit nabíjecí časovou konstantou K_n [2]:

$$K_n = R \cdot C \text{ [-]} \quad (2.14)$$

Opakovací frekvence se následně určuje vztahem:

$$f = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C} \text{ [Hz]} \quad (2.15)$$

Napětí na kondenzátoru se dá jednoduše vyjádřit pomocí vztahu $U_c = 0,8 \cdot U_0$, kde U_0 , je napětí měřené na výstupních bodech stejnosměrného zdroje. Z výše vyjádřených veličin se určuje množství obrobeného materiálu a produktivita práce, která je vázaná na akumulované energii na kondenzátoru [2]:

$$Q_m = K_n \cdot \eta \cdot f \cdot W_c = K_n \cdot \eta \cdot \frac{1}{2 \cdot R \cdot C} \cdot \frac{C \cdot U_c^2}{2} \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.16)$$

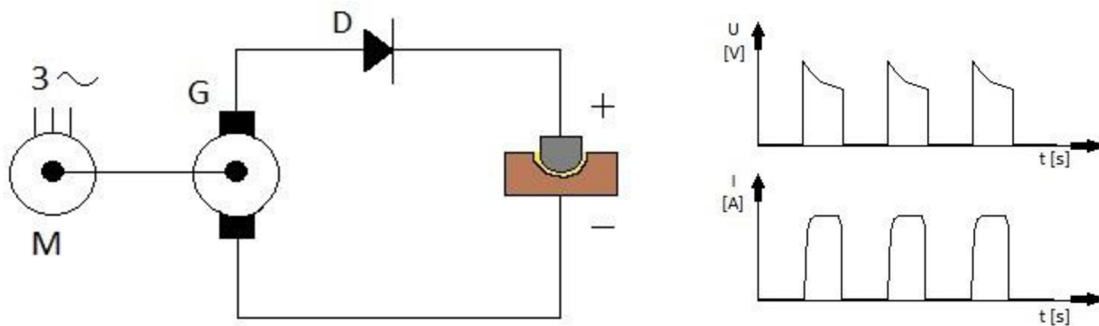
kde: K_n [-] – nabíjecí časová konstanta,
 η [-] – účinnost výboje (0,20 – 0,35),
 f [Hz] – opakovací frekvence,
 W_c [J] – energie nahromaděná na kondenzátoru,
 R [Ω] – odpor R,
 U_c [V] – napětí na kondenzátoru.

2.5.2 Nezávislé generátory

Tyto druhy generátorů jsou poměrně ve výrobě rozšířené. Nejsou závislé na poměrech v jiskřišti, tudíž nastavení pracovního procesu není tak složité jako v předchozím případě u RLC a RC generátorů. Hlavní výhodou je zde možnost nastavit generaci impulzů s vhodným tvarem a vyšší energií při jednotlivých výbojích o velké frekvenci. Ve strojírenství se rozlišují dva typy generátorů: rotační a polovodičový. [2; 13]

Rotační generátory

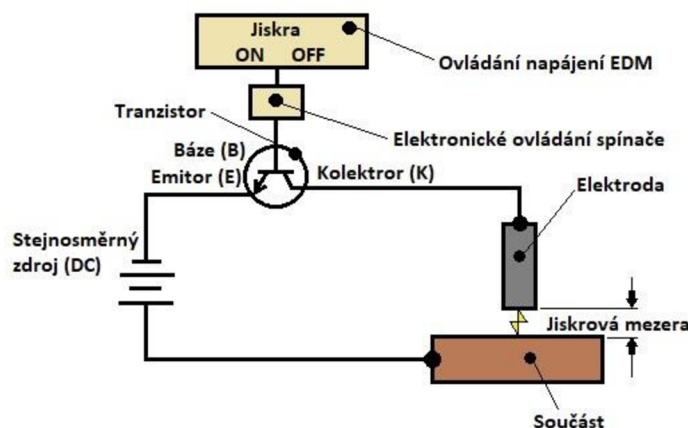
Zde hlavní úlohu tvorby napětí tvoří generátor (dynamo), který je poháněn pomocí převodů z třífázového asynchronního motoru (obr. 2.15). Generátor následně vytvoří impulzy, který přes diodu (D) pokračují směrem k jiskřišti. Opakovací frekvence impulzů dosahuje hodnot okolo 400 Hz se střídáním délky trvání impulzů k délce mezery. Doba trvání impulzů je tu ovšem dlouhá, a tak se může naskytnout situace, kdy převažuje čas působení iontové vodivosti v plazmovém sloupci. Zapojení obvodu je v tomto případě opačné než u RLC obvodu. Kladný pól je zapojený na nástrojovou elektrodu a záporný pól je zapojen na obráběnou součást. Polovodičová dioda má zde za úkol zamezit průrazu v jiskřišti opačným směrem. [2]



Obr. 2.15 Základní obvod rotačního generátoru a jeho časový průběh proudu I a napětí U [13].

Polovodičové generátory

U těchto generátorů (obr. 2.16) je charakteristické snadné nastavení frekvenčních hodnot a jejich následná rychlá regulace. Celkové opotřebení nástrojové elektrody je zde v porovnání s ostatními metodami obrábění nejmenší. Je zde možnost nastavit obráběcí proces tak, aby pracovalo více elektrod současně. Další obrovská výhoda je vysoká spolehlivost při velkém odebrání materiálu, který se pohybuje v rozsahu $6\,000$ až $8\,000\text{ mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. U polovodičových generátorů je také možné nastavit frekvenci pulzů v rozsahu 500 Hz až 50 kHz . [12]



Obr. 2.16 Základní tranzistorový obvod polovodičového generátoru [8].

2.5.3 Opotřebení elektrody a volba polarity

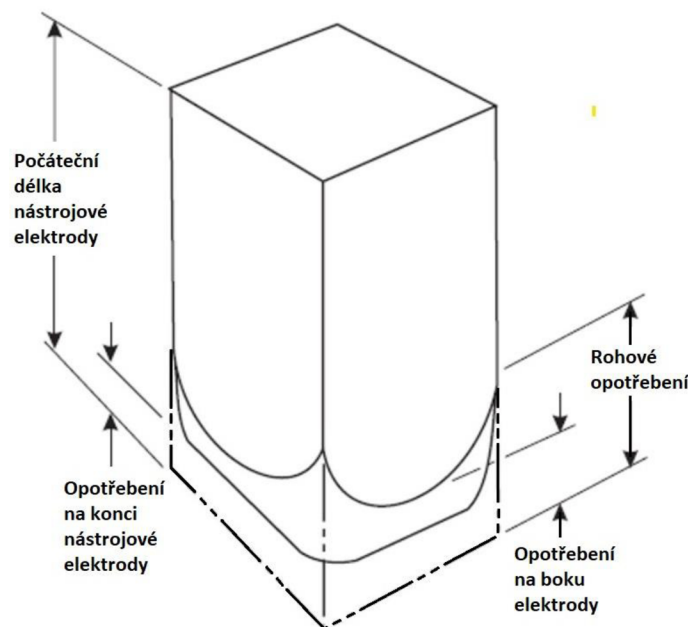
Na počátku děje převažuje ve výbojovém sloupci tzv. *elektronová vodivost* (více energie se uvolňuje na anodě). Tento děj nastává během krátkých impulzů. Obrobek je potom zapojen jako kladný (anoda) a nástrojová elektroda jako záporná (katoda). Použijí-li se naopak dlouhé impulzy, tak následně převažuje vodivost iontová a více energie se uvolňuje v oblasti katody. Zde se volí opačná varianta a to obrobek – katoda a nástroj – anoda. [2]

Množství a velikost odebraného materiálu [2]:

$$\gamma = \frac{V_n}{V_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.17)$$

kde: V_0 [mm³.min⁻¹] – množství obrobeného materiálu z obrobku

V_n [mm³.min⁻¹] – množství odebraného materiálu z nástrojové elektrody



Obr. 2.17 Opotřebení nástrojové elektrody [8].

Důvody opotřebení (obr. 2.17) elektrody jsou [2]:

- oddělování velkých částí kovu v důsledku velké hustoty elektronů,
- narušení operačního cyklu elektrody v důsledku kolísání proudu výboje,
- rozrušení v důsledku mechanických nárazů vzniklých kavitací,
- chyby ve struktuře materiálu elektrody (pórovitost).

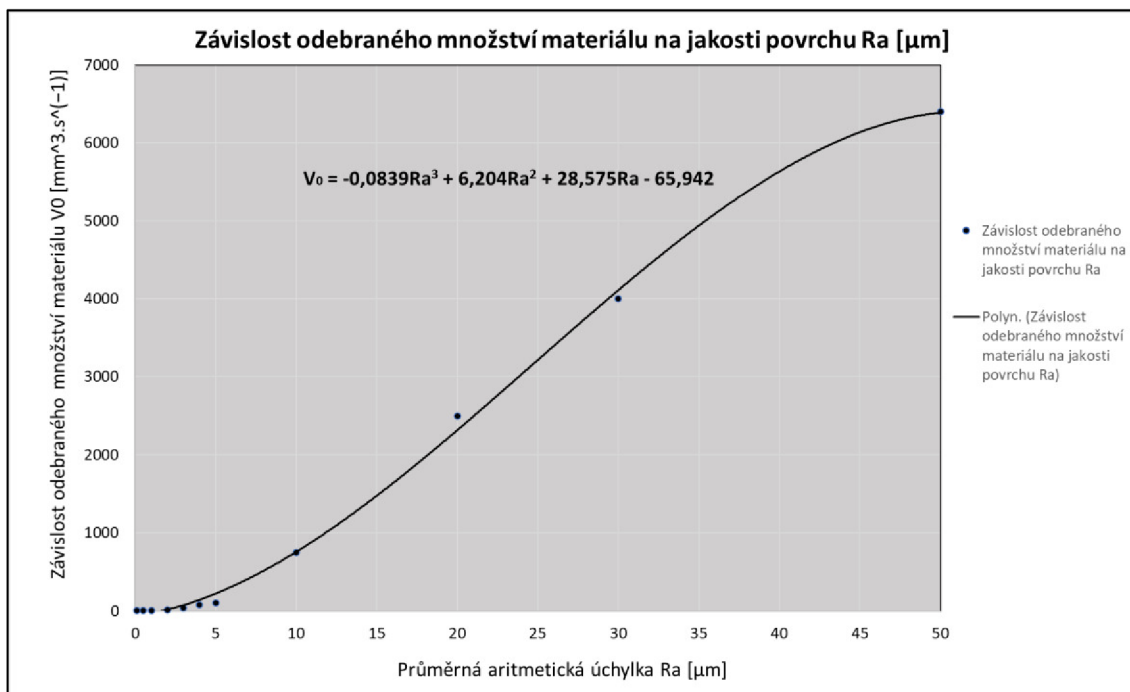
Na snižování opotřebení povrchu elektrody je třeba volit velký počet výbojů o velmi slabé energii z hlediska jakosti povrchu. U běžně používaných generátorů se frekvence jisker při polodokončovacích operacích nastavuje na hodnotu 3 000 až 5 000 Hz a při konečném opracování se hodnota zvýší na 10 000 až 30 000 Hz. Aby se elektrody opotřebovávaly co možná nejméně, tak je nezbytné nastavit trvání výboje v rozmezí 1/3000 až 1/5000 s. Vliv na opotřebení je dán hlavně vlastnostmi generátorů, a proto je nutné brát v úvahu pracovní charakteristiky generátoru z hlediska požadavku na soubor výrobků. [2; 13]

2.6 Jakost obrobeného povrchu

Jelikož vybíjecí energie ovlivňuje hlavně tvar a překrývání určitých kráterů obráběného povrchu, je lepší a jednodušší zohledňovat pracovní podmínky jako funkce drsnosti povrchu s uvedením její hloubky Rz nebo střední aritmetické odchylky Ra (obr. 2.18). Hlavní rozdíl oproti konvenčnímu obrábění je, že se zde místo usměrněných stop po nástroji (soustružnický nůž, fréza) vytvoří staticky nepravidelné krátery od jednotlivých výbojů. Obrobený povrch tak bude mít charakteristiky jakosti ve všech směrech stejný. Při porovnání s parametrem jakosti u konvenčního způsobu a u elektroerozivního způsobu obrábění vychází najevo, že i když je hodnota jakosti povrchu totožná, tak z hlediska mikrogeometrie je možné spatřit rozdíly v jednotlivých operačních vrstvách obrobku. Přesnost rozměrů a kvalita povrchu u elektroerozivního obrábění, které je možné docílit, jsou znázorněny v tab. 2.1. [2; 7]

Tab. 2.1 Přesnosti rozměru a kvalita povrchu u obrábění EDM [1].

	Přesnost rozměru [mm]	Ra [μm]	Rz [μm]
Hrubé opracování	$(\pm 0,02) - (\pm 0,5)$	$6 < x$	25
Střední opracování	$(\pm 0,01) - (\pm 0,02)$	2 – 6	8 – 25
Jemné opracování	$(\pm 0,005) - (\pm 0,01)$	0,5 – 2	$x < 6$
Leštění	až $\pm 0,002$	0,2 – 0,8	$x < 2,5 - 4$



Obr. 2.18 Závislost jakosti povrchu na odebraném množství materiálu [7].

Kvalita povrchu souvisí zejména s energií jednotlivých výbojů, která stanovuje velikost vytvořených kráterů na povrchu součásti. Z technologického hlediska se počítá s tím, že nejlepší kvalita povrchu se dosáhne při nižších hodnotách proudu, krátkých impulzech a při vysokých frekvencích výbojů. Zde ale bohužel nastane nevýhoda velkého opotřebení nástrojové elektrody. I když je každý jednotlivý náboj soustředěn a cílen na malý povrch, tak i zde dochází k vysokému tepelnému zatížení. Materiál se na jednotlivých místech povrchu začne odtavovat ve formě malých kuliček, nebo dokonce se může částečně odpařit při extrémně vysokém tepelném zatížení. Tyto kuličky se vlivem tlakové vlny vymrští do prostoru mezi elektrodami a přilepí se na hrany vytvořených kráterů. Jsou několikanásobně menší než krátery, ale pokud se nahromadí ve větších vrstvách, tak mohou výrazně ovlivnit parametr jakosti obrobeneho povrchu. [7]



- 1 – mikrovrstva nasycená částicemi dielektrika (chemické sloučeniny vytvořené difuzí),
- 2 – vrstva zahrnující materiál nástrojové elektrody (při zapojení nástroje na záporný pól),
- 3 – *bílá vrstva* silně nauhličená, opět ztuhnutá tavenina, jemná struktura materiálu martenzitu,
- 4 – pásmo termického ovlivnění, přesahuje rozměr bílé vrstvy, v oblasti 3–4 vyjadřuje zaklenou a popuštěnou strukturu výchozího materiálu,
- 5 – pásmo plastické deformace vzniklé od rázu tlakového impulzu.

Obr. 2.19 Stav povrchové vrstvy součásti po elektroerozivním obrábění [7].

Vlivem působení vysokých teplot dochází na povrchu součásti k velkým strukturálním a chemickým změnám. Tyto změny vyvrcholí v tzv. *bílé vrstvě*, která je závislá přímo na vybíjecí energii impulzů. Pokud se tato vrstva bude metalograficky zkoumat, tak vyjde najevo, že je dokonale stejnorodá (homogenní) (obr. 2.19). Při jejím několikanásobném zvětšení tak je možné spatřit její laminární charakter. Tloušťka *bílé vrstvy* se pohybuje při hrubovacích operacích v řádu několika setin mm. Zpravidla to bývá okolo 3 – 200 μm . Při středním a dokončovacím opracování se považuje za nepatrnou. Co se týká změn samotné krystalové struktury materiálu, tak nebyly po hrubém ani po dokončovacím opracování pozorovány. Studie této vrstvy dokázala, že je vytvořena díky rychlému ztuhnutí z předchozího roztaveného materiálu, který tepelně reagoval s dielektrikem. Při obrábění materiálu, který obsahuje určité množství uhlíku, se v *bílé vrstvě* vyskytují stopy austenitu a martenzitu. [2; 7]

Celkový napěťový stav na povrchu obráběné součásti je součet tahových a tlakových činností, které nastanou během ohřívacího a chladicího cyklu. Velikost a hloubka rozložení zbytkového napětí je závislá na parametru impulzu a na samotných fyzikálně-mechanických vlastnostech povrchové vrstvy. Zpravidla platí, že zbytkové napětí roste se zvětšující se energií impulzu. Zde hodně záleží na druhu obráběného materiálu a jeho mechanických vlastnostech, protože zde hrozí velká pravděpodobnost překročení meze pevnosti a mohou tak vzniknout nepohodlné trhliny, které budou mít vliv na životnost obrobku. [2]

2.6.1 Vliv povrchu na mechanické vlastnosti

Pokud se technolog rozhoduje, jestli obrobít součást konvenčním způsobem nebo pomocí elektroerozivního stroje, musí vzít v úvahu krom množství a ceny i následné technologické a mechanické vlastnosti, které musí budoucí obrobek obsahovat, aby plnil svůj účel bez jakýkoliv problémů. Mezi tyto vlastnosti se zejména řadí [7]:

- *Odolnost proti opotřebení*, které je v porovnání s konvenčními způsoby obrábění daleko vyšší, jelikož zde je přítomnost *bílé vrstvy*, která vykazuje známky tvrdosti a otěruvzdornosti. Další možnost, jak se dá vysvětlit větší odolnost proti opotřebení je, že povrch obroben elektroerozivním způsobem obsahuje určitou mikrogeometrii, která pomáhá lepšímu udržení mastného filmu při mazacích operacích.
- *Mechanická pevnost* je při staticky zátěžových operacích prakticky stejná s konvenčně upravenými povrchy. Problém však nastává při opracování povrchu SK karbidů, které posléze nevykazují tak dobrou pevnost v ohybu jako povrchy karbidů, které jsou konvenčně obrobené.
- *Únavová pevnost* je díky přítomnosti přetavené vrstvy a zbytkových napětí o něco menší než u konvenčně zpracovaných povrchů. Hlavní roli zde hraje tvorba mikrotrhlin, které při ochlazovacích režimech mohou vzniknout díky zbytkovému napětí. V historii se prováděly zkoušky odstranění bílé vrstvy, které v součtu zlepšily únavovou pevnost v řadu několika jednotek procent.
- *Odolnost proti korozi* je podobná jako u mechanicky obrobených obrobků. Hlavní roli zde hraje drsnost povrchu (R_a , R_z). Se zmenšujícími hodnotami drsnosti povrchu bude odolnost proti korozi výrazně stoupat. Významný vliv na to z pohledu odolnosti proti korozi může mít mikrogeometrie povrchu, která je u elektroerozivního obrábění ve všech směrech stejná.

Požadovaná drsnost se u elektroerozivního obrábění volí podle vztahu [12]:

$$R_{max} = K_n \cdot W_i [\mu m] \quad (2.18)$$

kde: K_n [–] – konstanta získaná z experimentů,

W_i [J] – energie výbojů,

R_{max} [μm] – maximální výška profilu povrchu.

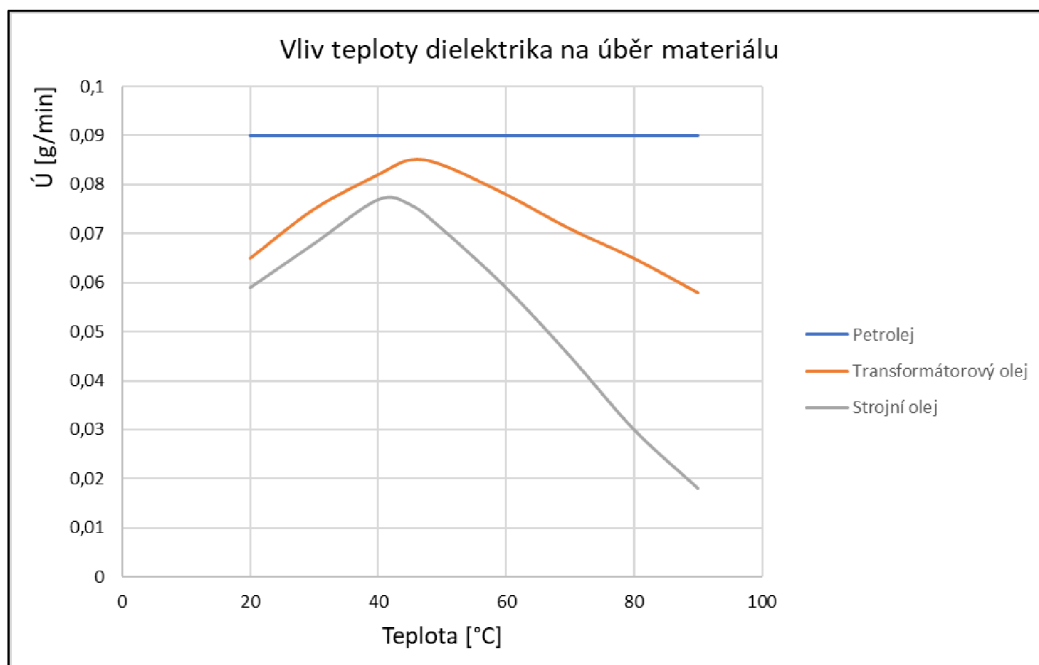
Z maximální výšky profilu R_{max} je tak možné přiměřeně určit hodnoty průměrné aritmetické úchylny od profilu – R_a a průměrné hodnoty z absolutních hodnot 5 maxim a 5 minim profilu křivky a to pomocí vztahu $R_{max} = 6 \cdot R_a$ a $R_z = (4 - 6) \cdot R_a$. [14]

2.7 Dielektrická kapalina

Dielektrická kapalina (dielektrikum) vyplňuje prostor mezi elektrodami a má důležitý vliv na celý obráběcí proces a je nezbytně nutné si dávat pozor při její volbě, jelikož ne vždy se dá použít stejná kapalina na stejný pracovní proces. V praxi se nejčastěji používají kapaliny typu petrolej, transformátorový olej, strojní olej, destilovaná deionizovaná voda nebo vodní sklo. Každá z těchto kapalin má svoje výhody a nevýhody, ale všechny musí zaručit [1]:

- průbojnost, aby byl zaručen dostatečný odpor mezi katodou a anodou (vzdálenost bývá okolo 0,01 mm a někdy i menší) tak, aby působení elektrického proudu skrze obě elektrody vytvořilo výboj. Výbojové napětí se v praxi pohybuje v rozmezí 60 až 300 V,
- chlazení elektrod, aby nedošlo k tavení nebo k jinému poškození,
- malou viskozitu a dobrou smáčivost kvůli rychlé obměně izolace pro výboj,
- chemickou neutralitu, aby nedošlo ke korozi,
- vysokou teplotu vzplanutí, aby nedošlo k požáru,
- nulový zápach a zamezení vzniku jedovatých spalin či plynů,
- stálost, snadnou vyrobiteľnost a musí splňovat hygienické a ekologické požadavky.

Důležitým faktorem je také teplota dielektrika, pod jakou je přiváděna do pracovního procesu. Jak je známo z fyziky, tak u většiny kapalin platí, že čím větší je teplota, tak tím menší je hustota kapaliny. Tento úkaz je možné vidět níže na obrázku (obr. 2.20), kde je vyjádřen diagram závislosti úběru materiálu na druhu dielektrické kapaliny při odlišných teplotách. [1; 7]

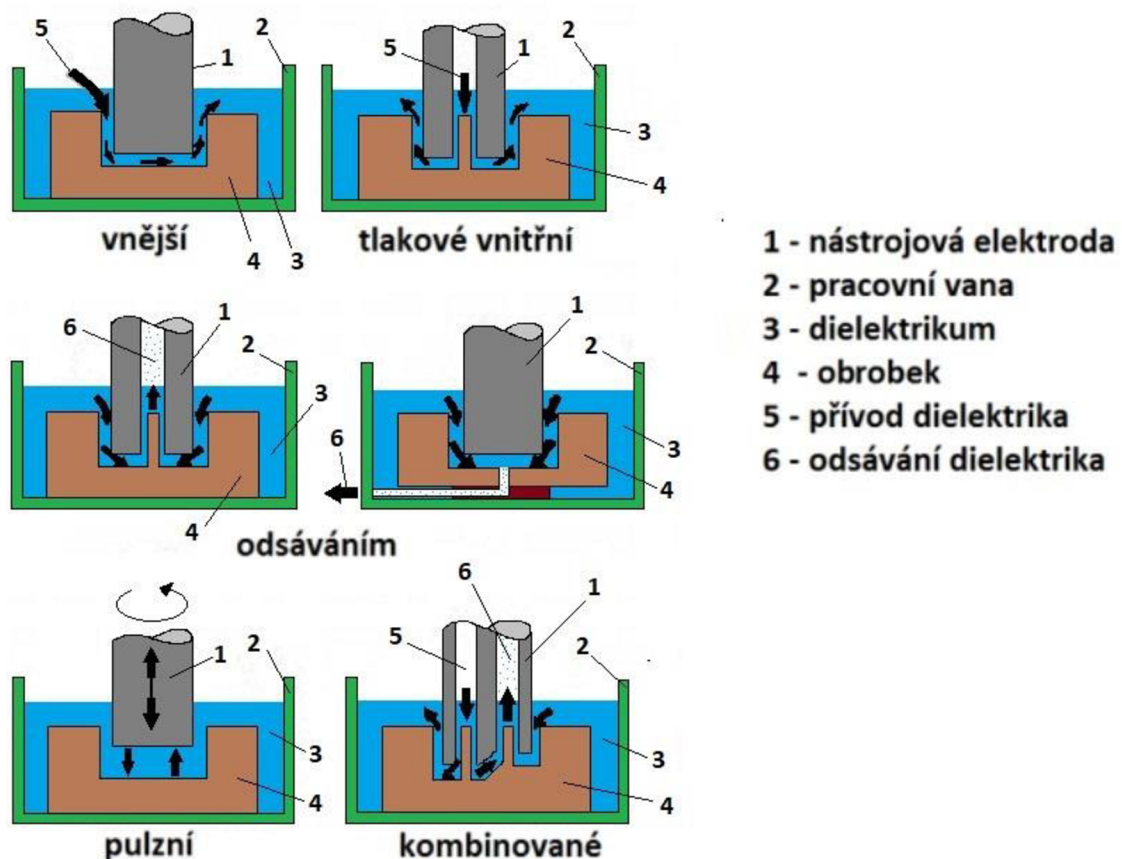


Obr. 2.20 Vliv teploty dielektrika na obrábění [7].

2.7.1 Způsoby vyplachování

Součástí dnešních moderních strojů jsou přídavná soustrojí nebo agregáty, které mají za úkol ochlazovat a hlavně čistit dielektrickou kapalinu. Tato činnost se nazývá vyplachování, které má několik podob (obr. 2.21) a to [15]:

- *vnější vyplachování* – nejpoužívanější metoda při opracování hlubších dutin a může se kombinovat s metodou *pulzující*,
- *vnitřní tlakové vyplachování* – dielektrikum je přiváděno skrze nástrojovou elektrodu do pracovního prostoru. Tento způsob je náročný na tvarovou přesnost na bočních stranách, jelikož hrozí riziko bočních výbojů,
- *vyplachování odsáváním* – dochází zde k odsávání dielektrika skrze nástrojovou elektrodu a zaručuje velmi tvarovou a rozměrovou přesnost,
- *pulzující vyplachování* – dochází zde k přerušení procesu elektroeroze na dobu 0,1 až 10 s a zároveň během této doby se vzdalují elektrody do vzdálenosti max 10 mm. Zvětší se tak pracovní mezera mezi nástrojem a obrobkem dojde k dokonalému propláchnutí. Nevýhodou však je, že používá jen u vyspělých CNC strojů, kde lze tento způsob vyplachování naprogramovat,
- *kombinované vyplachování* – jedná se o kombinaci *vnitřního* a *vnějšího* způsobu vyplachování.



Obr. 2.21 Způsoby vyplachování [15].

2.8 Nástrojové elektrody

Nástrojové elektrody musí být konfigurovány tak, aby měly vysokou teplotu tavení a dobrou elektrickou vodivost. Z obecného hlediska se skládají z fixační a pracovní části. Pracovní část je přímo účastníkem obráběcího procesu a fixační část slouží k nastavení polohy a upevnění pracovní elektrody. Pracovní části jsou většinou vyráběny z materiálů, které tolik nepodléhají elektroerozivním účinkům. Mezi tyto materiály se řadí měď, hliník, wolfram, zlato a grafit nebo různé směsi těchto prvků. Fixační část nebo také pomocná část se mohou vyrábět z materiálů lacinějších, které by více vyhovovaly dané pracovní činnosti. U volby materiálů pro obráběcí proces se musí vzít v úvahu řada faktorů: trvanlivost, cena, stabilita procesu, výroba nástrojové elektrody a její rozměr. [7; 16]

- **Měď a její slitiny** – vykazuje vynikající pracovní výsledky při nižším průtoku proudu a krátkých impulzech. Bod tavení mědi se pohybuje okolo 1 000 °C a je velmi odolná proti elektroerozivním účinkům. Nejčastěji se používá na jemné dokončovací operace, kde je schopná dosáhnout velmi malé jakosti povrchu (R_a menší jak 0,5 μm). Mezi velké výhody patří schopnost obrábět karbidy (WC). Hlavní nevýhodou mědi jsou obtížná dosažitelnost a cena a při porovnání s grafitem i menší životnost. [7; 16]
- **Grafit** – nekovový nejčastěji vyskytující se nástrojový materiál u EDM. Mezi hlavní výhody patří obrobitelnost, trvanlivost a odolnost proti opotřebení. Využívá se zejména u hrubovacích operacích při vysokém toku proudu a dlouhém trvání impulsu (schopnost pracovat při teplotách 3 000 °C, nevzniká vnitřní pnutí). Grafit má menší teplotnou roztažnost než měď, a tudíž se dá lépe obrábět. Další výhodou je velmi malá hmotnost, což je dobré pro výrobu velkých elektrod. [7; 16]
- **Mosaz** – má daleko menší pracovní životnost než měď. Používá se pro zpracování velkých úzkých hlubokých otvorů. Není drahá a je poměrně lehkou obrobitelná. [7; 16]
- **Wolfram** – má vysokou trvanlivost, ale velkou nevýhodou je jeho obrobitelnost. Je velmi pevný a je problém z tohoto kovu vyrábět tvarově složitě elektrody. Používá se jen u mikroděrování (dráty do \varnothing 0,2 mm) ocelí a žáruvzdorných slitinách. [7; 16]
- **Wolframová měď** – (slitina 50 – 80 % W, 50 – 20 % Cu) je velmi používaný materiál pro výrobu elektrod. Wolfram zde nosí charakteristiky otěruvzdornosti a vysokého bodu tavení (3 400 °C). Měď zde zaručuje vysokou tažnost a lepší obrobitelnost. Nevýhodou je zde malý úběr materiálu a vysoká cena pořízení. [7; 16]
- **Hliníkové slitiny** – používají se hlavně na předběžné obrábění děr bez velkých přechodů osazení u součástek vyrobených z ocele a karbidů. [7; 16]

Tab. 2.2 Fyzikální vlastností materiálů u nástrojových elektrod [16].

Parametr	Jednotky	Materiály nástrojových elektrod				
		Měď	Grafit	Mosaz	Wolfram	Wolfram. měď
Hustota	$\text{g} \cdot \text{cm}^3$	8,95	2,25	7,2 - 8,87	19,3	14,85
Měrný elektrický odpor	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	1,7	35-185	7,5	5,65	3,85
Tepelná vodivost	$\text{W} \cdot \text{K}^{-3}$	385	25	26-233	165	220
Teplota tání	°C	1085	3650	810 – 1030	3370	1085 – 3410

2.8.1 Rozměry nástrojových elektrod

Rozměry nástrojových elektrod jsou závislé na několika faktorech, které vstupují do obráběcího procesu, a to jsou [7;16]:

- požadovaný průměr díry – $\varnothing D$,
- velikost pracovní mezery (a v zahraničí označované GAP),
- jakost obrobené plochy (Rz),
- tloušťka narušeného povrchu (z),

Rozměry elektrody na hrubovací operaci vychází ze vztahu [7]:

$$d = D - 2(a + Rz + z) = D - 2M \quad [mm] \quad (2.19)$$

Kde: M – minimální hodnota, o kterou musí být elektroda menší, aby se dosáhl požadovaný průměr D .

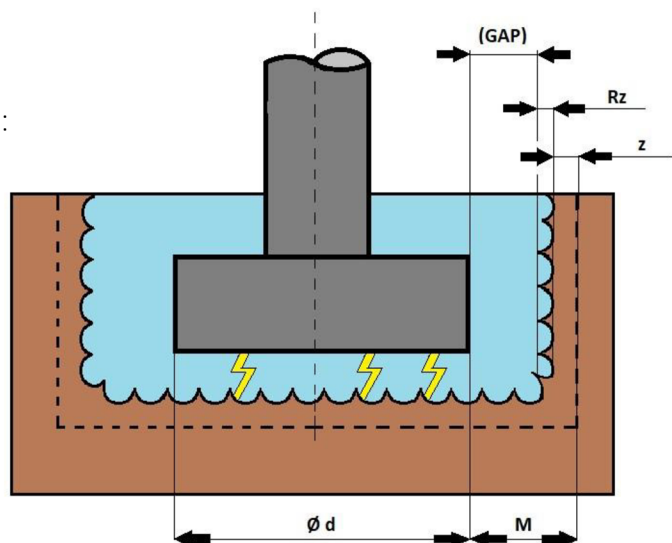
Velikost pracovní mezery (GAP) vychází z nastavení a chodu generátoru (parametr impulzů, dielektrikum). Tato velikost je dána normativem předepsaný výrobcem stroje. Většinou se tato hodnota pohybuje mezi hodnotami 0,01 až 0,5 mm. Blíže tuto hodnotu určí předem nastavená hodnota jakosti povrchu Ra , u které platí, že současně s její velikostí roste i hodnota a . V této hodnotě jsou současně zahrnuty i chyby, které mohou vzniknout během hrubovací operace. Hlavním zdrojem tvarových chyb jsou boční výboje, které vzniknou kvůli opotřebení elektrody. Opotřebení způsobí změnu velikosti elektrody a tím pádem se mění i velikost a tvar obráběné plochy. Například zde hrozí, že budoucí dutina bude mít určitou kuželovitost, která by nemusela zaručovat funkčnost obrobku v budoucím pracovním procesu. Dá se tomu zabránit úpravou tvaru elektrody pomocí osazení nebo použitím výplachu odsáváním. [7; 16]

Hodnota tloušťky narušeného povrchu (z) má význam jen u velkých výbojů. Pohybuje se v rozmezí 0,005 – 0,01 mm. V tuto chvíli je potřeba uvedenou hodnotu odebrat pomocí dokončovací operace. [7]

Rozměry elektrody na dokončovací operace:

$$d = D - 2a \quad [mm]$$

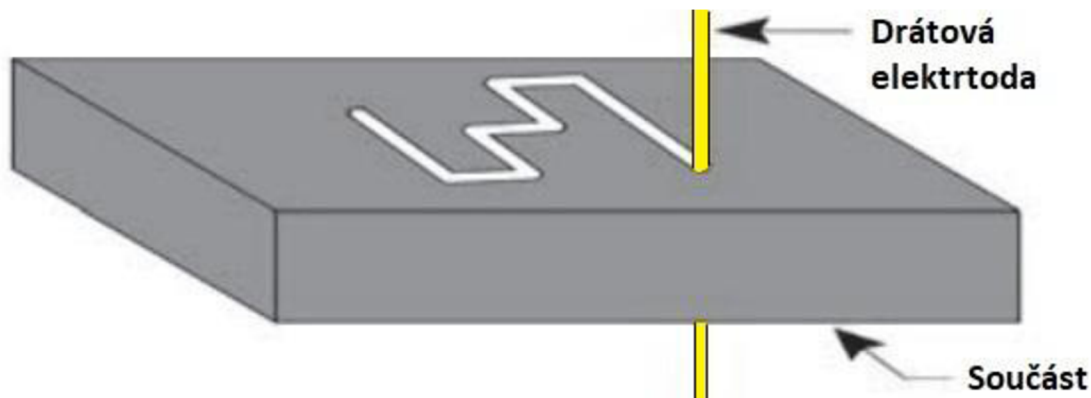
GAP - velikost pracovní mezery
z - tloušťka narušeného povrchu
M - hodnota zmenšení rozměru elektrod
d - průměr elektrody
Rz - maximální výška nerovnosti povrchu



Obr. 2.22 Rozměr elektrody [7].

3 TEORIE DRÁTOVÉHO ŘEZÁNÍ (WEDM)

Elektroerozivní obrábění drátem (WEDM) je široce uznávaný netradiční proces odstraňování materiálu používaný k výrobě součástí se složitými tvary a profily (obr. 3.1). Je považován za jedinečnou adaptaci EDM procesu, který používá elektrodu k inicializaci jiskrového procesu. Tato praktická technologie je založena na konvenčním EDM jiskření s využitím široce uznávané bezkontaktní techniky odstraňování materiálu. Od zavedení technologie do výroby se zjednodušil způsob výroby nástrojů a raznic na nejlepší alternativu výroby v mikroměřítku s nejvyšším stupněm rozměrové přesnosti a kvality povrchové úpravy. [7; 8]



Obr. 3.1 Drátová metoda [21].

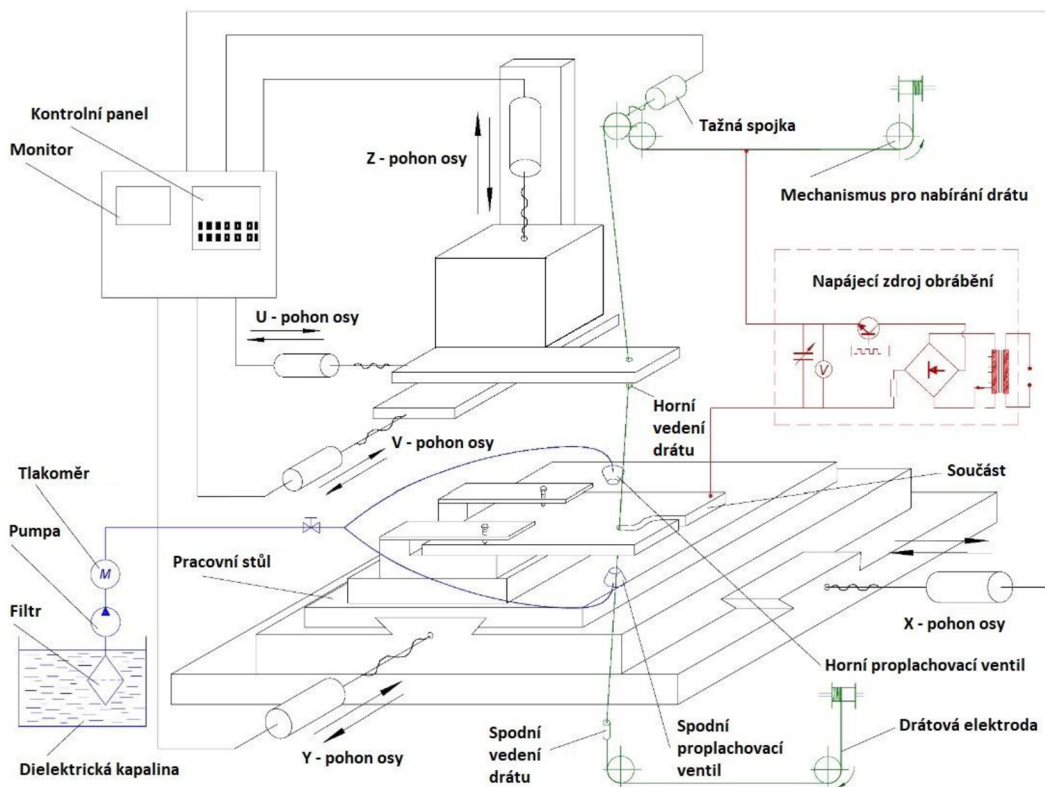
Drátová technologie je vysoce výhodná při obrábění rovinných ploch a útvarů. Je nejpoužívanější v oblasti výroby přesných lisovacích nástrojů, ke stříhání rotorových plechů a dále v oblasti automobilového průmyslu, kde se pomocí drátového řezání vyrábí brzdová obložení. Další uplatnění se našlo v oblasti leteckého a lékařského průmyslu, kde se pomocí drátového řezání tvarově upravovaly brusné kotouče, ze kterých se v dokončovacích operacích brousily cílené obrobky. [2]

V průběhu několika desítek let zůstal proces drátového řezání konkurenceschopnou a ekonomickou možností obrábění, která splňuje náročné požadavky na obrábění způsobené krátkými vývojovými cykly produktů. Riziko zlomení a ohybu drátu však podkopalo plný potenciál procesu, což drasticky snížilo efektivitu a přesnost provozu. Významné množství výzkumů zkoumalo různé metodiky pro dosažení potřebných a správných cílů. Analyticky se optimalizovala celá struktura a četné parametry procesu, které nakonec zamezily riziku zlomení nebo ohnutí drátu, což zlepšilo celkovou spolehlivost obrábění. [8; 17]

Technologie WEDM byla poprvé představena do zpracovatelského průmyslu na konci 60.let minulého století. Vývoj procesu byl výsledkem hledání techniky, která by nahradila pevnou elektrodu používanou v EDM. V roce 1974 použil D.H. Dulebohn sledovací systém optických linek pro automatické řízení tvaru dílu, který má být obráběn procesem drátové technologie. Do roku 1975 popularita technologie rychle rostla, protože poskytovala možnosti, které lépe zapadly do průmyslového odvětví. Ke konci roku 1970 byl do WEDM iniciován počítačový systém číslicového řízení (CNC), který přinesl zásadní vývoj obráběcího procesu. V důsledku toho byly široké možnosti procesu WEDM rozsáhle využívány pro jakékoliv druhy obrábění průchozím otvorem. [8; 17]

3.1 Proces WEDM

Mechanismus odstraňování materiálu WEDM je velmi podobný konvenčnímu EDM procesu, který zahrnuje erozní efekt produkovaný elektrickými výboji (jiskrami). Ve WEDM je materiál erodován z obrobku řadou frekvenčně jdoucích jisker vyskytujících se mezi obrobkem a drátem oddělených proudem dielektrika, které je nepřetržitě přiváděno do obráběcí oblasti. Dnešní proces WEDM se však běžně provádí na obrobcích, které jsou zcela ponořeny v nádrži naplněné dielektrickou kapalinou. Taková metoda ponoření WEDM podporuje stabilizaci teploty a účinné proplachování zejména v případech, kdy má obrobek různou tloušťku. Proces využívá elektrickou energii generující plazmový kanál (sloupek) mezi katodou a anodou a přeměňuje ji na tepelnou energii, která se pohybuje v rozmezí 8 000 – 12 000 °C nebo i více, čímž inicializuje značné množství ohřevu a tavení materiálu. Když je pulzující stejnosměrný zdroj pracující na frekvenci mezi 20 000 a 30 000 Hz vypnut, plazmový kanál se rozpadne a následně zanikne. To způsobuje náhlé snížení teploty, což umožňuje cirkulující dielektrické tekutině vypláchnout roztavené částice z povrchu pólů ve formě mikroskopických úlomků. Zatímco mechanismy odstraňování materiálu EDM a WEDM jsou podobné, jejich obráběcí vlastnosti nejsou stejné. WEDM používá tenký drát nepřetržitě prováděný skrze obráběnou součást. Drát je řízený mikroprocesorem, který umožňuje obrábění dílů složitých tvarů s mimořádně vysokou přesností. Na řezané ploše lze také dosáhnout různého stupně kuželovitosti v rozsahu od 0° do 15° pro obrobek o tloušťce 100 mm. Mikroprocesor má také za úkol neustále udržovat pracovní mezeru (GAP) mezi drátem a obrobkem, která se pohybuje od 0,025 do 0,05 mm. [17; 18]



Obr. 3.2 Pracovní schéma WEDM [23].

WEDM eliminuje potřebu komplikovaných předem tvarovaných elektrod, které jsou běžně vyžadovány v EDM k provádění hrubovacích a dokončovacích operací. V případě WEDM musí drát projít několika obráběcími průchody podél profilu, který má být obráběn, aby bylo dosaženo požadované rozměrové přesnosti a kvality povrchové úpravy. [19; 20; 22]

3.2 Vybavení WEDM

Mechanický systém WEDM zahrnuje CNC řízený pracovní stůl (X–Y), na kterém je obrobek upnut, a mechanismus pohonu drátu elektrody pro nepřetržitý pohyb obrobkem s mechanickým napětím mezi dvojicí vodičů drátu (obr. 3.2). Podle výšky obrobku je spodní vedení drátu stacionární a horní vodičko může být přemístěno podél osy Z. Mechanismus také zahrnuje pohyb horního vedení v kartézských souřadnicích (U–V) poháněnými servomotory za účelem získání kuželových ploch. Napájecí zdroj (generátor) umožňuje různé formy elektrických impulzů. Díky němu se mohou jiskry přizpůsobit pracovním podmínkám. Další faktor, který ovlivňuje pracovní proces je dielektrická kapalina. Existují 3 kategorie procesů, jak se může dielektrická kapalina dostat do pracovního oběhu a to [22]:

- *Ponořený typ WEDM*, když jsou drátová elektroda a obrobek ponořeny do dielektrické kapaliny,
- *Neponořený (koaxiální proplachování) typu WEDM*, když dielektrická kapalina dosáhne prostoru kolem drátové elektrody v obráběcí zóně z horní a spodní trysky,
- *Suchý a téměř suchý WEDM*, když je dielektrická kapalina nahrazena minimálním množstvím atmosférického plynu nebo jiného plynu. V tomto případě jsou ekologické požadavky lépe splněny.

V posledních desetiletích vývoj a zlepšování numerických řídicích subsystémů vytvořily silný impuls pro navrhování a vývoj nových zařízení WEDM. Dříve stroj obsluhovali vysoce kvalifikovaní pracovníci, kteří museli mít patřičné vzdělání jak ve strojírenském, tak i v elektrickém odvětví, jelikož první software pro zařízení WEDM byl poměrně komplikovaný. Postupně se však díky vývoji dostalo k jednoduššímu softwaru, který umožňuje lepší automatizaci výroby a hlavně snadnější obsluhu, u které není potřeba vysoce kvalifikovaná obsluha. [22]

3.2.1 Faktory ovlivňující měření výkonnosti

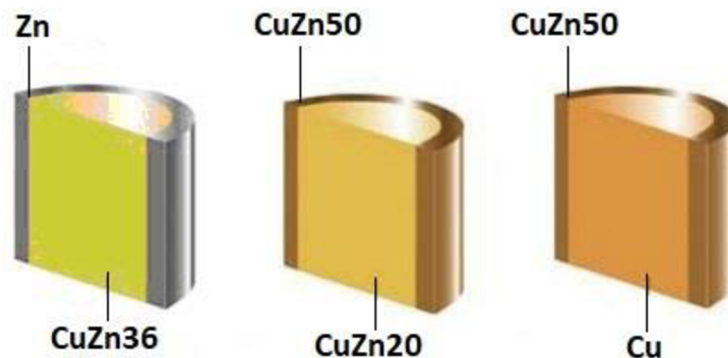
Pokrok je základní doménou zejména ve strojírenské technologii. Všechny stroje a zařízení budou mít tendenci v budoucnu se posouvat z hlediska výkonnosti a rychlosti dopředu. U WEDM technologie je však problém, že nedokáže konkurovat technologiím typu: plazma, laser, vodní paprsek. Tyto technologie jsou z hlediska rychlosti daleko efektivnější. Technologie drátového řezání by se tak v budoucnu měla ubírat jiným směrem, aby se mohla nadále uplatnit v odvětví. Zde je seskupení určitých zlepšení, které by se u procesu WEDM mohlo zvážet [22; 23]:

- zlepšení týkající se obráběcího zařízení a jeho provozu,
- vznik hybridních obráběcích procesů s přizpůsobením obráběcího zařízení požadavkům těchto procesů,
- zlepšení geometrického tvaru drátu a chemického složení materiálů drátu,
- použití procesu WEDM pro nové materiály, včetně zlepšení vlastností povrchů zpracovávaných v důsledku aplikace WEDM,
- identifikace optimálních podmínek pro rozvoj procesu WEDM.

3.3 Drátové elektrody

Drátové elektrody musí obsahovat určité mechanické a termomechanické vlastnosti, aby konečný řez měl, co nejlepší povrch s co možná největší přesností. Pro přesný řez je nutné, aby elektroda vstupovala do obrobku napnutá a vyrovnaná, jelikož každá nepatrná nerovnost se může promítnout na kvalitě povrchu řezu. [7]

Nástrojové elektrody pro WEDM musí mít velmi vysokou elektrickou vodivost, dostatečnou pevnost v tahu a také vynikající rozměrovou přesnost. Kromě toho je nezbytná i nízká teplota tání, která napomáhá ke snížení času potřebného pro ionizaci dielektrika. Taková materiálová charakteristika jako je houževnatost a tvrdost, mají určitý vliv na přetrhávání drátu. [24]



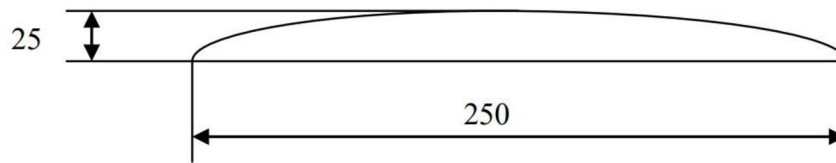
Obr. 3.3 Průřezy povlakovaných drátů [2].

Nejčastěji používané materiály na výrobu drátů jsou měď, mosaz, pozinkovaná měď nebo pozinkovaný mosaz. V minulosti došlo i na experimenty se zlatem nebo stříbrem. Obvykle používaná mosaz při výrobě drátů obsahuje 35 – 37 % Zn. Tyto dráty se vyrábějí tažením za studena a díky tomu vznikají na povrchu zpevněné vrstvy, které zvyšují výkon řezání. Ve výrobě drátů se experimentuje, jak s množstvím obsahu Zn, tak i s novými druhy povlaků jako jsou ocelové dráty povlakované mědí nebo dráty povlakované grafitem. Všechny tyto druhy modifikací poskytují výhody zlepšení vodivosti nebo nízký koeficient tření během odvíjení, což v určité míře zamezuje přetržení drátu. [7]

Dráty se také dělí podle pevnosti na [7]:

- Měkké – $R_m < 450$ MPa,
- Polotvrdé – $R_m = 450 - 800$ MPa,
- Tvrdé – $R_m > 800$ MPa.

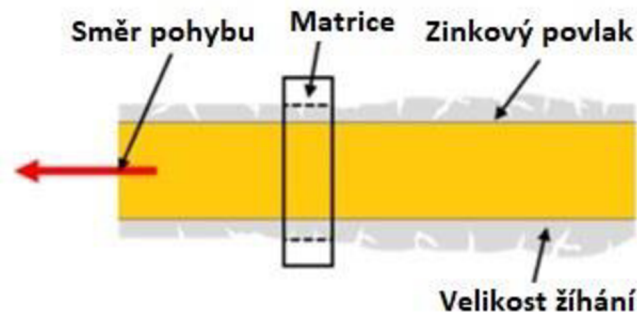
Pevnost drátu a jeho průměr rozhodují o procesu obrábění. Tvrdé a vysokopevné dráty se používají na závěrečné dokončovací operace. Zachovává se zde vysoká napjatost, která zaručuje přímý a přesný řez. Dalším důležitým poznatkem je samotné dodávání drátu ke stroji. Dráty musí být lesklé a nesmí být v žádném případě tvarově porušené nebo překroucené. U rozvinutého stavu drátu o délce 250 mm nesmí nastat větší prohnutí jak 25 mm viz obr. 3.4. [7]



Obr. 3.4 Prohnutí drátu [2].

3.3.1 Způsob přípravy drátu

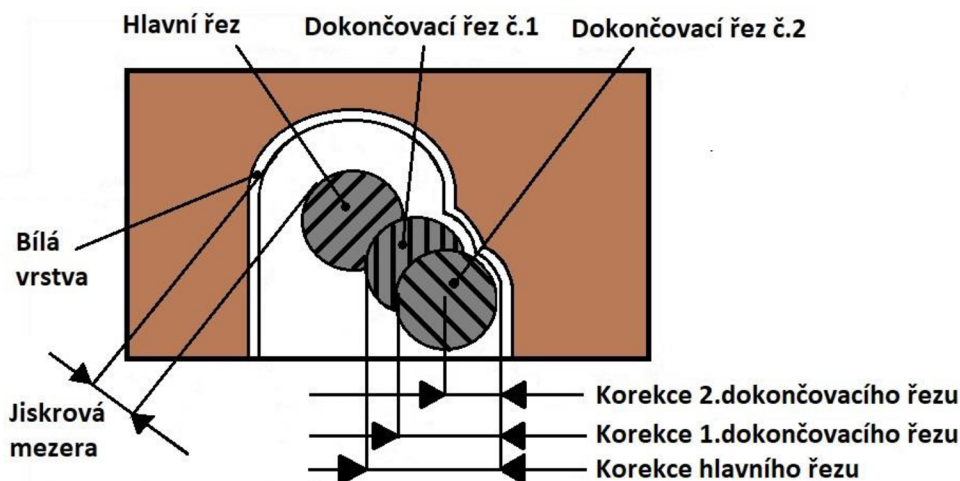
1. **Odlévání:** Hlavním materiálem drátěného jádra je mosaz, která se skládá ze zinku (25 hm. %) a mědi (74,8 hm. %). Některé mikroelementy jsou dodávány ke zlepšení mechanické pevnosti jádra drátu, jako je P (0,05 hm. %), Mg (0,05 hm. %) a Mn (0,08 hm. %). Teplota kontinuálního lití byla 950 – 1250 °C. [25]
2. **Povlak:** V důsledku efektu tepelné koroze se drátová elektroda ve WEDM opotřebovává nebo praská. Povlak na drátové elektrodě se roztaví nebo vypaří dříve než jádro drátu, jelikož má povlakový prvek nízkou teplotu tání a je vystaven většímu tepelnému zatížení. Aby účinnost byla efektivní, tak se musí volit povlak, který je na extrémní podmínky vhodný a vydrží dlouhou dobu. Jeden z nejvyužívanějších povlaků je Zn, který se na uvedený drát dostává způsobem galvanického pokovování. Před pokovování musí drát projít povrchovou úpravou v kyselině sírové nebo dusičné (moření) a následně projde oplachem vodou nebo upravenou zásaditou kapalinou. Během nanášení povlaku se galvanický proud a galvanické napětí pohybují okolo 1 500 – 3 000 A a 150 – 220 V. Výsledná povrchová vrstva zinku se pohybuje v řádu hodnot 5 – 20 μm . Po vysokoteplotním zatížení se vytvoří tlakové a tahové napětí v jádru drátu, jelikož součinitel tepelné roztažnosti jádra je vyšší než součinitel povlakové vrstvy. Hrozí tedy výskyt mikrotrhlin, které by znehodnotily obráběcí proces. Drát s povlakem se tedy musí tepelně upravovat. [25]
3. **Žihání:** Teplota žihání je 700 °C na dobu 3 – 5 s. Žihací proces však k tvorbě mikrotrhlin plně nezamezí. Je schopen ho pouze minimalizovat na určitou úroveň tak, aby byl plně zaručen pracovní proces elektrody. Mikrotrhliny jsou jeden z důvodů proč se elektroda nemůže opakovaně používat, jelikož by nešel nastavit stabilní proces obrábění. [25]
4. **Proces tuhnutí a deformování:** Během toho procesu prochází elektroda matricí o průměru 0,25 mm (obr. 3.5), kde je upravena na konečný tvar, který se použije na obráběcí proces. V současné době se však pracuje s materiály, které budou výhodnější k obráběcímu procesu a hlavně se budou nechat použít opakovaně. [25]



Obr. 3.5 Vzor povlakovaného drátu [25].

3.4 Princip řezání

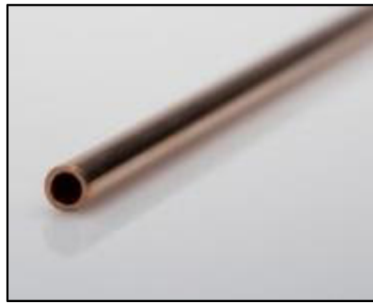
Samotný princip řezání se liší podle toho, jakého stavu jakosti povrchu se má dosáhnout. Stejně jako u konvenčních technologií jsou i zde počáteční hrubovací a posléze dokončovací operace, aby se co možná nejvýhodnější cestou dosáhlo požadovaného povrchu. Na základě těchto technologických operací se mohou lišit řezné rychlosti, způsob vyplachování dielektrikem, vstupní elektrický proud s napětím, energie výboje, volba elektrody, způsob vedení elektrody a její korekce. Samotné stanovení korekce je nejdůležitějším poznatkem, jelikož nese největší váhu při výkonu samotného řezu, který je podmíněn průměrem elektrody, jiskrovou mezerou a přídavkem na obrábění (obr. 3.6). Při hrubovacích operacích se nastavuje větší vybíjecí energie, která způsobí větší velikost řezu a úběr materiálu. Vlivem toho vzniká velká teplotní oblast, při které materiál mění svoji homogenitu (*bílá vrstva*). Důležité je, aby nebyla však narušena konečná kontura řezaného obrobku. Při této příležitosti se musí dávat větší pozor při nastavení přídavků. U dalších řezů, které se považují za dokončovací, se dodávaná energie zmenšuje, tím pádem se zmenšuje velikost řezu a tepelné zatížení obrobku. Při každém dokončovacím řezu se stanovuje menší přídavek, aby se dosáhlo, co nejkvalitnější jakosti povrchu obrobku. Poslední fáze nastavení korekce u poslední dokončovací operace by za správných podmínek měla dosahovat velikosti průměru elektrody s šířkou jiskrové mezery. Pokud jsou všechny vstupní parametry na správných hodnotách, tak je možné dosáhnout úchylky Ra až na hodnoty okolo 0,3 μm . [9; 26]



Obr. 3.6 Vzor korekce [9].

Před vstupem drátu do řezacího procesu je zapotřebí stanovit startovací otvory z důvodu počátečního vedení drátu. Drát nemůže být veden z boku, jelikož hrozí nežádoucí tvarové změny, které by narušily budoucí pracovní proces součásti. Startovací otvory se mohou vyrábět buď samotným vrtáním před tepelnou úpravou, nebo po tepelné úpravě pomocí hloubicí trubičkové elektrody. Startovací otvory mají průměr okolo 3 mm, aby provlečení drátu nebylo komplikované. Trubičkové elektrody jsou k dosažení v mosazné a měděné variantě. Mosazné je možné používat na všechny typy materiálů, které se dají elektroerozivně obrábět. Měděné se používají na obrábění wolframu nebo tvrdokovu. Dále se dělí na [2; 27]:

- jednokanálové – jeden otvor skrze elektrodu, vhodné pro klasické děrování,
- vícekanálové – od průměru 1,2 mm, používají se tam, kde je zapotřebí děrovat slepé díry a neřešit posléze likvidaci středového ostrůvku, nebo také pro děrování hlubokých děr.



Průměr (mm)	Délka (mm)
0.15	150
0.2	150
0.3	150
0.4	150
0.5	150
0.6	150
0.7	150
0.8	150
0.9	150
1.0	150

a) jednokanálové



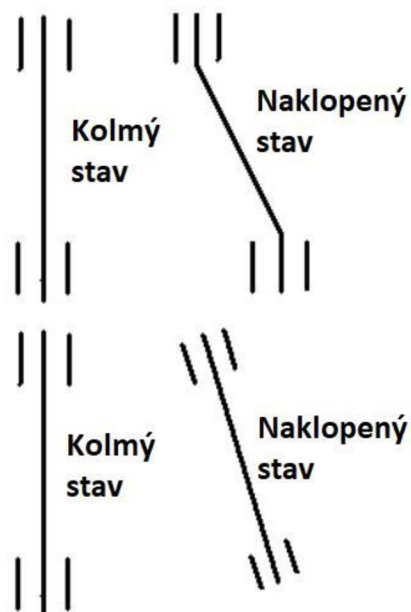
Vnější průměr (mm)	Délka (mm)
0.4	300
0.5	300
0.6	300
0.7	300
0.8	300
0.9	300
1.0	300
1.1	300
1.2	300
1.3	300

b) vícekanálové

Obr. 3.7 Startovací elektrody (trubičky) [28].

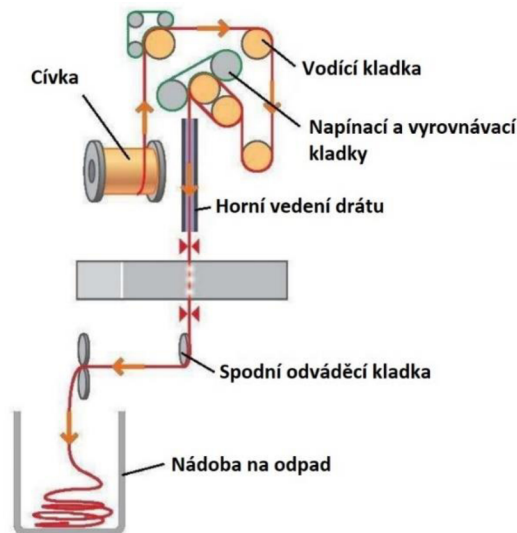
3.4.1 Způsoby vedení řezu

Stejně jako u frézovací technologie, tak i u drátové technologie řezání je pracovní stůl schopen se pohybovat ve dvou osách X a Y (obr. 3.2). Osa Z v tomto případě reguluje vzdálenost základní roviny od pracovní roviny neboli výšku řezané součásti. Osy U a V slouží k regulaci pracovní roviny, která pomocí vodící hlavy, horní a dolního toroidu je schopna vést řezací proces pod určitým úhlem. [2]

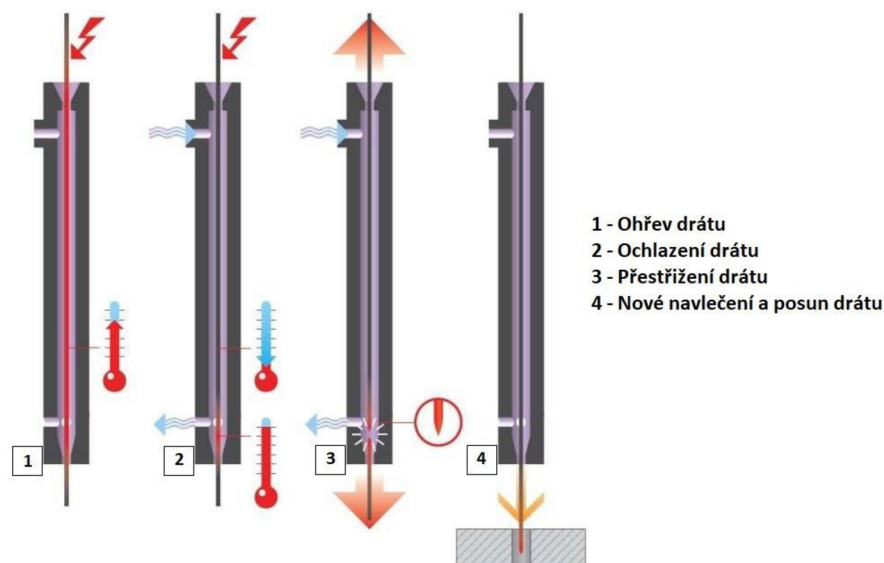


Obr. 3.8 Schéma naklápění vodiček [2].

Drátová elektroda se postupně odvíjí z cívky skrze vodící kladky a napínací systém směrem k hornímu vedení. Pomocí horního vedení (vodící hlava a toroid) a tlaku dielektrické kapaliny je drát postupně posouván skrze obrobek směrem ke spodní vodící hlavě. Drát během vodícího procesu musí být plně natažený, aby nedošlo k nepříjemné komplikaci. Je nezbytné, aby splňoval požadavky uvedené na obrázku 3.4. Celý vodící mechanismus je navíc u většiny strojů přizpůsoben tak, že je možné obrábět i pod úhlem 30 až 45° pomocí posunu v osách U a V. Po samotné řezací operaci je už drát nepoužitelný, a tak se odvádí do nádoby, ze které je potom ekologicky likvidován. Nepříjemná situace nastane, když je drát poškozen a přetržen během řezacího procesu. Dříve stroje neměly zavedená automatická zařízení, což komplikovalo výrobu, když musela obsluha navíjet drát manuálně pomocí ručního náradí. Dnes mají stroje zavedenou automatiku, kterou i využívají při dokončovacích procesech, kdy je drát úmyslně přestřížen a zase je navinut v jiné startovací díře. Pokud tedy dojde k nečekanému přestřížení drátu, tak stroj začne automaticky koncový drát ohřívát a následně chladit pomocí stlačeného vzduchu, aby se vyrovnalo napětí v drátu a dosáhlo se stabilizovaného stavu. Při konečné fázi se drát provede skrze obrobek pomocí vodící hlavy a tlaku dielektrické kapaliny. Názorné schéma navlečení drátu je zobrazeno na obr. 3.10. [29]



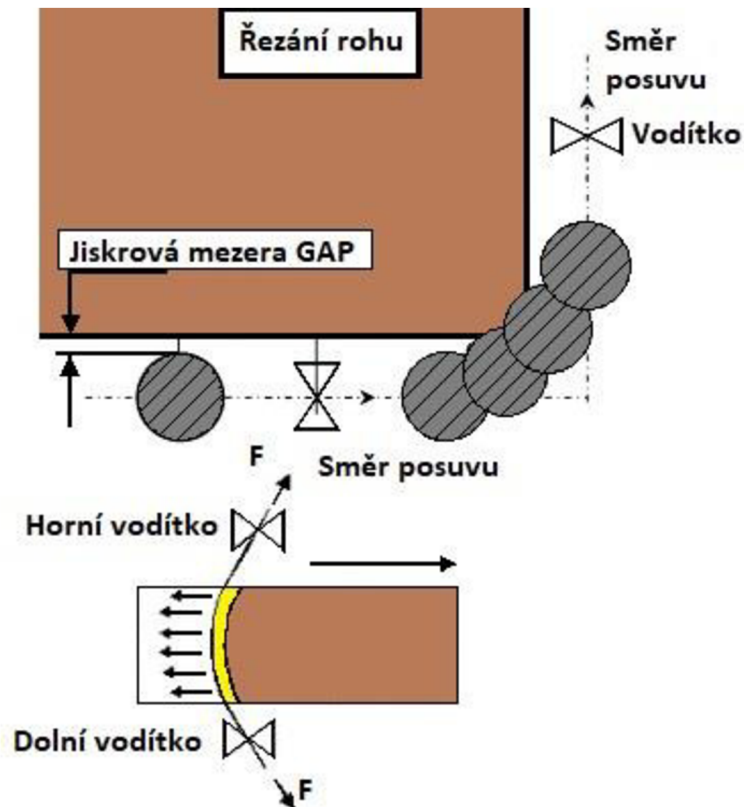
Obr. 3.9 Vedení drátu [29].



Obr. 3.10 Příprava drátu pro návlek [29].

3.5 Strategie řezání

Během řezacího procesu působí na drátovou elektrodu určité síly a vibrace, které vedou k jeho ohybu. Během tohoto procesu může nastat situace, kdy se drát nepatrně odchýlí od předem naprogramované polohy. V této chvíli nastane rozdíl vzdáleností mezi naprogramovanou a skutečnou polohou, který se obecně nazývá *zpoždění drátu*. V rámci toho nastane tak situace, kdy je přesnost řezaného dílu mírně narušena. Parametry narušení nastanou u rovinnosti stěny a u profilu obrobku zejména v místech, kde se mění směr pohybu vodiček naprogramované podle NC programu (obr. 3.11). [30]

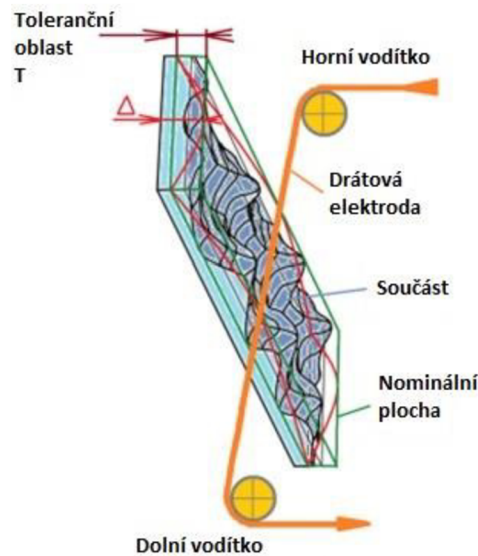


Obr. 3.11 Ukázka špatného řezu a soudečkovitosti [30].

Predikce přesnosti řezání rohů vyžaduje důkladnou znalost deformace drátu, který je ve výboji v jednotlivých časových intervalech. Proto se u moderních strojů zavedly modifikace vodících hlav, kde byly instalovány senzory, které analyzují chování drátu v tepelných a dynamických podmínkách. V pracovním procesu jsou přirozené frekvence systému vypočteny pomocí základního modelu volných vibrací drátu drženého na konci. I když zavedení moderních zařízení zlepšilo řezný proces, tak pořád je na čem stavět, jelikož tyto modifikace jsou omezené zejména kvůli obtížím při modelování tlumících účinků zavedených v systému jak třením mezi drátem a vedením, tak dielektrickým vyplachováním. Z těchto důvodů je tedy potřeba zanechat přídatky a tolerance, ke každému řeznému procesu, aby nenastala situace ohrožení kontury povrchu obrobku. [2; 30]

3.5.1 Stanovení tolerancí

I přes vysokou kvalitu obráběné plochy po WEDM existují geometrické odchylky od jmenovité hodnoty pro rovinné a zakřivené plochy. V případě maximální odchylky od požadovaného geometrického tvaru hovoříme o největší vzdálenosti Δ , která určuje skutečnou vzdálenost od požadované nominální roviny. Toleranční oblast geometrických odchylek tak představuje prostorově omezenou plochu mezi jmenovitou a tolerovanou plochou. Tyto dvě oblasti jsou od sebe vzdáleny předepsanou tolerancí T (obr. 3.12). Z toho vyplývá, že pro kvalitní výrobu technologií WEDM je klíčové, aby se skutečná obráběná plocha nacházela v prostoru mezi nominální a tolerovanou plochou. Zde je však třeba zdůraznit, že tato oblast pro nejmodernější komponenty používané v automobilovém a leteckém průmyslu se v současné době pohybuje v řádu mikrometrů. [31]

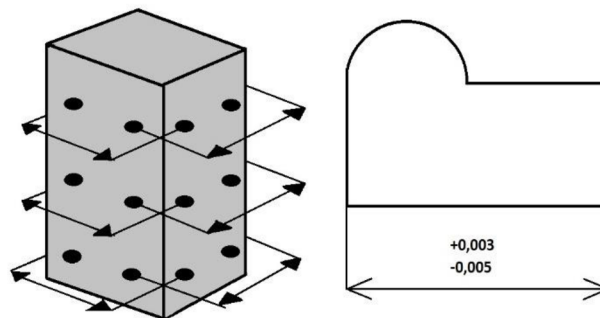


Obr. 3.12 Toleranční oblast [31].

Kontrola stanovení tolerancí je uvedena na názorném příkladu, kde jsou postupně zobrazeny kontrolní body pro měření T_{KM} . [2]

Příklad výpočtu T_{KM} podle obr. 3.13 .

$$T_{KM} = \frac{+0,003 - 0,005}{2} = \pm 0,004 \text{ mm} \quad (3.1)$$



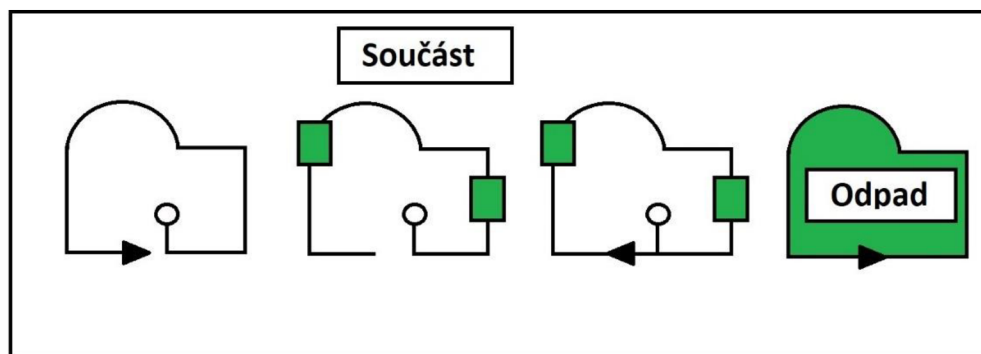
Obr. 3.13 Kontrolní body pro měření [2].

3.5.2 Řezný proces

V běžné praxi se řezný proces rozděluje na řezání *matrice* a řezání *razníku*. V obou případech je nezbytné definovat, která složka bude obrobek a která bude odpadní materiál. Podle daného výběru se následně volí technologické základny a můstky, které jsou potřebné zejména při dokončovacích operacích.

Řezání matrice

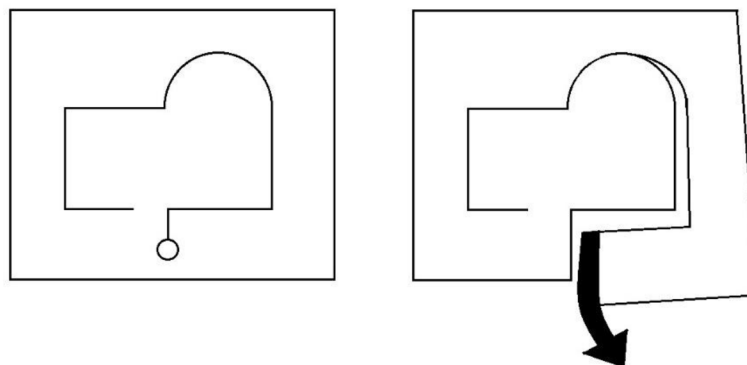
U řezání matric je typické, že vyřezaná kontura se považuje za odpad viz obr. 3.14. Obvykle se řeže více kontur matric, a tak je zapotřebí určit správnou posloupnost operací. V praxi se obvykle řeže jeden hlavní řez a 2 až 3 dokončovací operace v závislosti na jakosti povrchu. U hlavního řezu se volí na obrobku body, kde zůstane dílec viset na můstku. Směr řezání se většinou volí proti směru hodinových ručiček, jak je znázorněno na obrázku. Před dokončovací operací se vypadávající dílec přemostí měděnými pásky a přilepí lepidlem, aby byla zaručena elektrická vodivost v okamžiku odlomení. Provede se operace odříznutí můstku ve směru hodinových ručiček ze startovacího bodu. Dílec se následně sundá a provedou se dokončovací operace buď samotnou drátovou elektrodou, nebo pomocí konvenčních strojů. [2]



Obr. 3.14 Řezání matric [2].

Řezání razníku

U řezání razníku je nezbytné volit takovou strategii, aby nebyla ohrožena kontura řezané části. Na počátku technologie WEDM se při řezání razníku nevolily startovací otvory, jelikož se to zdálo zbytečné a prodlužovalo to čas výroby. Narazilo se však na problém s rozměry konečného dílce, jelikož drátová elektroda při postupu k dílci postupně vytvořila mezeru. Tato mezeru se postupně rozšiřovala a vznikalo tak pnutí na dílci, které začalo pružit, což se následně projevilo na konečném rozměru. Správná a nesprávná strategie řezání je zobrazena na obr. 3.15. [2]



Obr. 3.15 Řezání razníku [2].

4 AUTORSKÝ NÁVRH A VÝROBA DÍLCE

V této kapitole je popsána praktická ukázka výroby dílu ve strojovém parku dané střední firmy, která se pohybuje v průmyslovém odvětví přes 30 let.

4.1 Firma VKV HORÁK s.r.o.

Jedná se vyloženě o českou firmu, která se zaměřuje zejména na konstrukci, vývojové práce v oblasti strojírenství, nástrojařství a kovoobrábění. Během své existence si firma díky profesionálnímu přístupu a kvalitě produkce vypěstovala stálý příjem zákazníků. Společnost se i nadále rozvíjí zejména v oblasti výrobních technologií a konstrukce. [32]

VKV HORÁK s.r.o. nabízí zejména návrhy, výrobu prototypů, výrobu mechanických dílů nebo sestav pro přístrojovou mechaniku a s tím související výrobu nástrojů, přípravků, tvářecích a vstřikovacích forem pro kusovou i sériovou výrobu. V rámci strojírenské činnosti je hlavním cílem společnosti nabídnout zákazníkovi moderně 3D zpracovaný návrh a konstrukci, vývoj prototypu a konstrukci nástrojů včetně jejich výroby. Firma proto využívá nejmodernější výpočetní techniku, software a technologie. Do podnikatelského profilu firmy patří také vývoj databázového informačního systému Pedant, který je určen pro kontrolu a zefektivnění činnosti managementu malých a středních firem. Společnost provozuje svoji činnost v novém, moderním zázemí a výrobních prostorách, které přispívají k zajištění kvality a efektivnosti výroby. [32]

Výroba probíhá v zrenovovaném objektu s moderním vybavením, kvalifikovanou pracovní obsluhou a řízením výroby splňujícím požadavky systémů řízení kvality (QMS) spadající pod normu ISO 9001. Velký základ výroby tvoří nové CNC obráběcí stroje se spolehlivým softwarovým vybavením. [32]



Obr. 4.1 Firma VKV HORÁK s.r.o. [32].

4.2 Návrh střížníku

Jako navrhovaná součást byl zvolen střížník (obr. 4.1) pro dokončovací operaci vystřihování. V návrhu jsou zachovány jednotlivé vstupní parametry, které se v rámci mezí shodují s literaturou. Proto jako materiál je zvolena nástrojová ocel 19 436, která se řadí mezi chromové ledeburické ocele a která je přímo určena na výrobu hlubokotažných, ohýbacích a střížných nástrojů, jelikož obsahuje dobré vlastnosti typu: odolnost proti opotřebení, dobrou řezivost, vysokou trvanlivost a dobrou prokalitelnost. Prvky obsahující složení oceli jsou zobrazeny v tabulce 4.1. [33]

Tab. 4.1 Složení nástrojové oceli 19 436 [33; 42].

Chemické složení			
C [%]	Cr [%]	Si [%]	Mn [%]
1,9 - 2,2	11 - 13	0,1 - 0,6	0,2 - 0,6

Vlastnosti: odolnost proti opotřebení, stálost rozměrů, dobrá řezivost, nízká houževnatost, vhodná k nitrídování, obtížně se brousí, horší obrobitelnost, kalitelná v oleji a na vzduchu.

Použití: Střížné, lisovací a řezné nástroje, zuby pilových listů

Teplota tváření: 850 – 1050 °C

Žihání na měkko: 800 – 830 °C

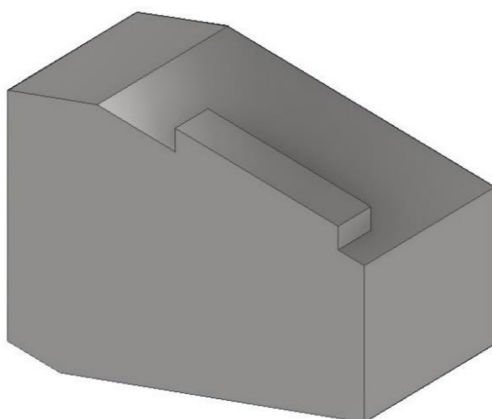
Tvrdość v žíhaném stavu: 248 HB

Kalení: 960 – 980 °C, olej, horká lázeň – 400 °C

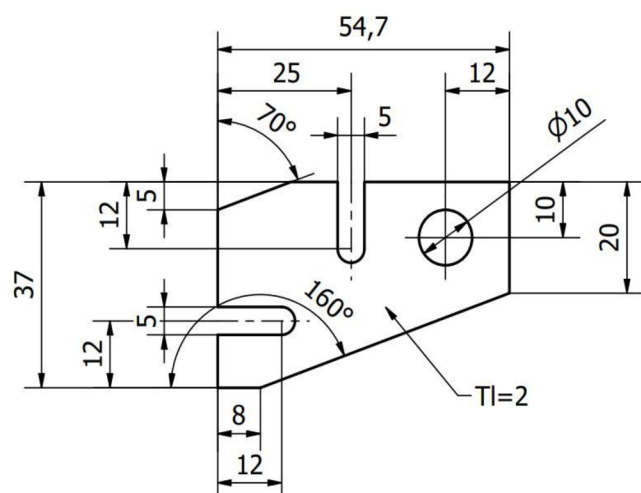
Optimální popouštěcí teplota: 170 – 190 °C

Mez kluzu $R_{p0,2}$: 1100 – 1500 MPa (při HRC 37 – 54)

Mez pevnosti R_m : 1800 – 2100 MPa (při HRC 37 – 54)



Obr. 4.2 Návrh 3D modelu střížníku.



Obr. 4.3 Výkres výstřížku.

4.2.1 Vystřížek

Střížník bude sloužit k operaci vystříhování součásti zobrazené na obr. 4.3. Daná součást je pouze fiktivní, a tak případné tolerance přesnosti nejsou nutné zahrnovat. Materiál součásti se volí obyčejná neušlechtilá uhlíková konstrukční ocel 11 343, která je válcovaná za studena a je velmi vhodná pro střížné operace. Pro daný materiál bylo zjištěno, že mez pevnosti R_m se pohybuje okolo hodnoty 300 – 350 MPa a napětí ve smyku $\tau_s = 240 – 300$ MPa. K určení střížné síly je potřeba znát součinitel opotřebení břitu, který je zvolen $n = 1,3$. Pro následující výpočty bude zvoleno $R_m = 320$ MPa. [34; 35]

Střížná síla

Výpočet střížné síly se vypočítá podle vztahu [34]:

$$F = n \cdot S \cdot \tau_s \quad [N] \quad (4.1)$$

kde: n [-] – součinitel otupení (1,0 – 1,5),
 S [mm²] – plocha stříhu,
 τ_s [MPa] – střížný odpor ($R_m \cdot 0,8 = \tau_s$),
 l [mm] – obvod stříhu,
 t [mm] – tloušťka výstřížku.

$$l = 54,7 - (5 \cdot \tan 70) + 20 + \left(\frac{46,7}{\cos 20}\right) + 8 + 32 + \left(\frac{5}{\cos 70}\right) = 165,3 \text{ mm}$$

$$S = l \cdot t = 2 \cdot 165,3 = 330,6 \text{ mm}^2$$

$$F = 1,3 \cdot 330,6 \cdot 320 \cdot 0,8 = 110\,023,68 \text{ N} \cong 110\,000 \text{ N} = 110 \text{ kN}$$

Celková střížná síla pro vystřížení součásti činí 103,5 kN, což by se dalo přirovnat k nákladnímu automobilu o hmotnosti 11 t. Musí se tedy zvolit střížný nástroj, který bude bez problémů pracovat s touto silou a nebude hrozit riziko poruchy a kolize.

$$\sigma \cdot S = F \quad [N] \quad (4.2)$$

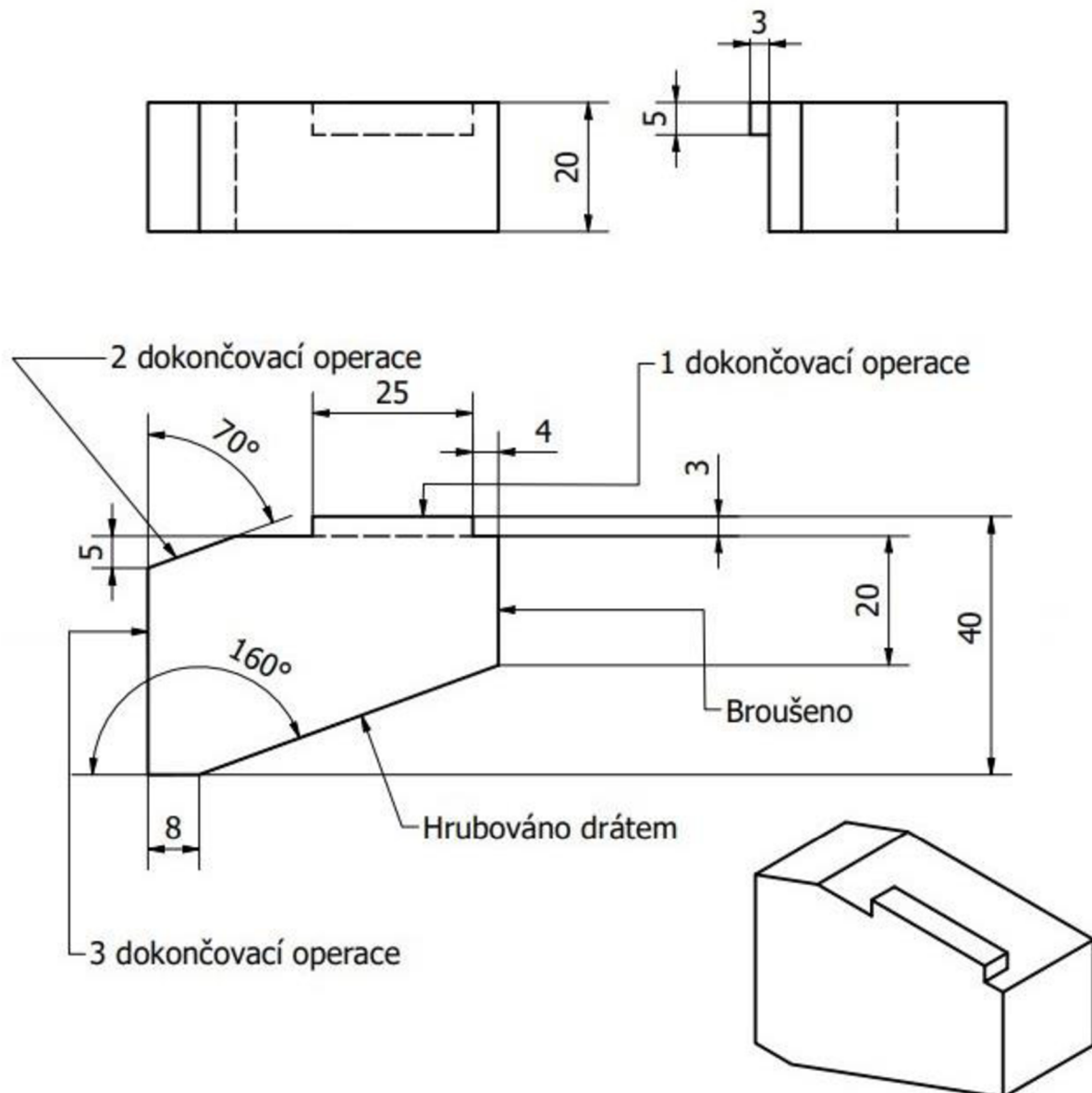
kde: σ [MPa] – mez kluzu $R_{p0,2} = 1100$ MPa,
 S [mm²] – plocha střížného nástroje podle programu Inventor = 1592,8 mm².

$$1100 \cdot 1592,8 = 1\,752\,080 \text{ N} \cong 1\,750\,000 \text{ N} = 1752 \text{ kN}$$

Z následného výpočtu vyplývá, že zvolený nástroj z materiálu nástrojové oceli 19 436 je zvolen správně, jelikož jeho maximální hodnota, při které může plnit funkci s ohledem na rozměry je 1 752 kN. Tato hodnota je 15-krát větší než hodnota potřebná pro vystřížení součásti.

4.3 Hlavní rozměr

Jmenovité rozměry tvoří hlavní tvar a profily obráběných součástí, ale aby byla zachována správná funkčnost a pracovitost součásti, tak se musí zahrnout jednotlivé typy rozměrových a geometrických tolerancí. Tím to pravidlem se řídí každá obráběcí centra, která vytváří jmenovité obrobky. Elektroerozivní drátové řezání není výjimkou a i zde se užívá velké množství jak rozměrových, tak i geometrických tolerancí. V této práci na ně však nebude upřednostněna velká pozornost, jelikož se bude porovnávat jakost a samotná struktura povrchu jednotlivých stran součástí. Proto se dané plochy řezaly s odlišným počtem dokončovacích operací, které jsou znázorněny na obr. 4.4 a budou později vyhodnoceny.



Obr. 4.4 Výkres střížníku.

4.4 Technologický postup výroby střížníku

Na výrobě se postupně vystřídaly 3 různé druhy strojů. Celá fáze výroby se postupně rozložila na 7 jednotlivých operací znázorněných v tab. 4.2. Podle programu ESPRIT, který je součástí softwaru drátového zařízení vychází celkový výrobní čas 119 minut a 25 vteřin. Tento čas je pouze fiktivní záležitost, jelikož celkový realistický čas od volby polotovaru po konečnou kontrolu součásti vyšel přes 2 h 50 minut. Důvodem se na začátku stalo prasknutí drátu při špatném nastavení vodících parametrů, kde čas opravy činil okolo 30 minut. Problém byl následně vyřešen a žádné jiné komplikaci neproběhly. Další důvod prodloužení času výroby je oddělené nastavování posuvů a rychlostí na ovládacím panelu. Rychlosti a posuvy se zmenšily, aby nenastalo riziko přetrhnutí drátu, jelikož se obráběla nástrojová ocel 19 436, která je na tom se svojí elektrickou vodivostí poměrně hůře než globálně nastavená ocel v programu ESPRIT.

Tab. 4.2 Technologický postup.

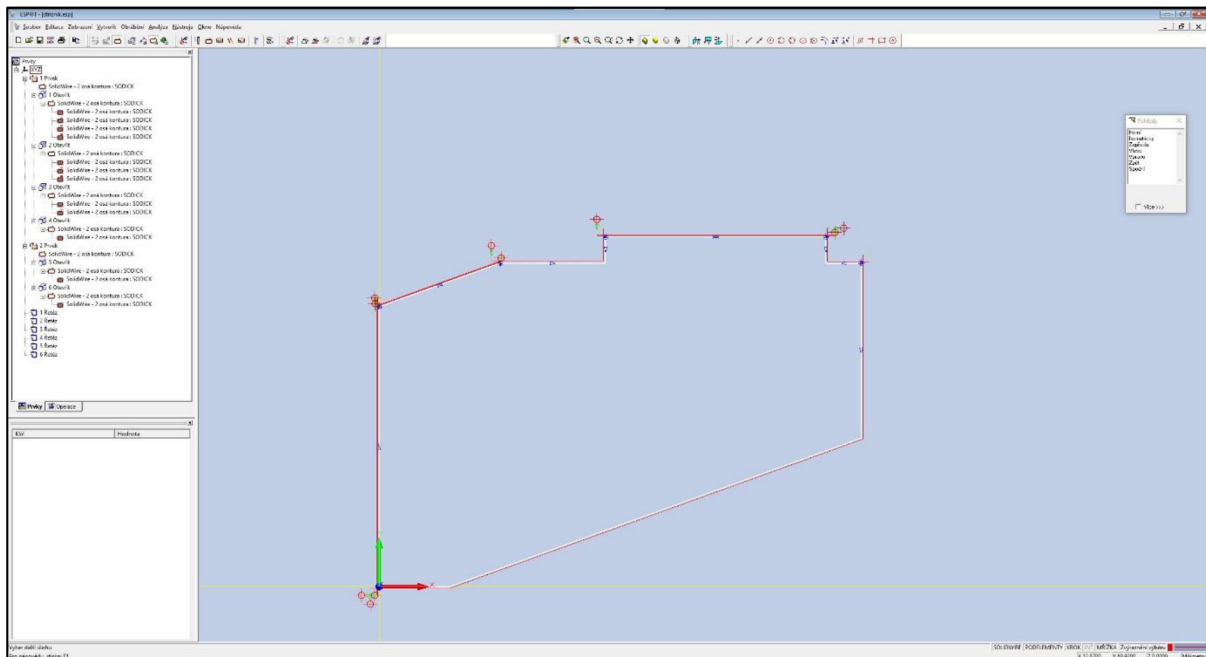
Technologický postup							
Název součásti			Hmotnost [kg]	Materiál	Průměr elektrody [mm]	Materiál elektrody	
Střížník			0,25	19 436	0,25	CuZn36	
Číslo operace	Třídící číslo	Stroj	Popis práce	Čas seřízení [min]	Řezací čas [min]	Rychlost řezu [mm.min ⁻¹]	Vzdálenost řezu [mm]
00/00			Volba polotovaru 150 x 45 x 21	0,3			
01/01	99989	Vrtačka startovacích otvorů SY-2030	Upnutí polotovaru, vycentrování, vrtání otvorů Ø 3	2	14,15	1,55	22
02/02	09262	Ruční pracoviště	Sražení hran u otvorů, odjehlení, očištění	0	5	0,00	
03/03	99989	Drátová řezačka Sodic AQ400L	Upnutí polotovaru, vycentrování v přípravku, provléknutí drátu, spuštění programu	2			
			Řezání nahrubo		7,83	4,09	32
			1.dokončovací operace		7,86	4,07	32
			2.dokončovací operace		7,46	4,29	32
			3.dokončovací operace (dle výkresu)		5,53	5,79	32
			Řezání nahrubo		4,15	3,52	14,62
			1.dokončovací operace		2,35	6,22	14,62
			2.dokončovací operace (dle výkresu)		2,7	5,41	14,62
			Řezání nahrubo		6,46	3,87	25
			1.dokončovací operace (dle výkresu)		3,83	6,53	25
			Řezání nahrubo		4,18	3,59	15
			Řezání nahrubo		2,45	2,86	7
			Řezání nahrubo		17,96	4,33	77,7
						Vyjmutí polotovaru, otočení, upnutí, vycentrování v přípravku, provléknutí drátu, spuštění programu	5
04/04	99989	Drátová řezačka Sodic AQ400L	Řezání nahrubo (doříznutí)		8,7	2,07	18
05/05	09262	Ruční pracoviště	Odjehlení, očištění, celková úprava	2			
06/06	35581	Horizontální magnetická bruska BRH – 20 A	Broušení určené strany (dle výkresu)		3		
			Broušení čela		2,5		
07/07	09863	OTK	Kontrola	2			
				Celk. čas seřizovací [min]	Celk. čas řezací [min]	Celk. čas výrobní [min]	Celk.vzdálenost [mm]
				13,3	106,11	119,41	361,56

4.5 Vytvoření NC programu

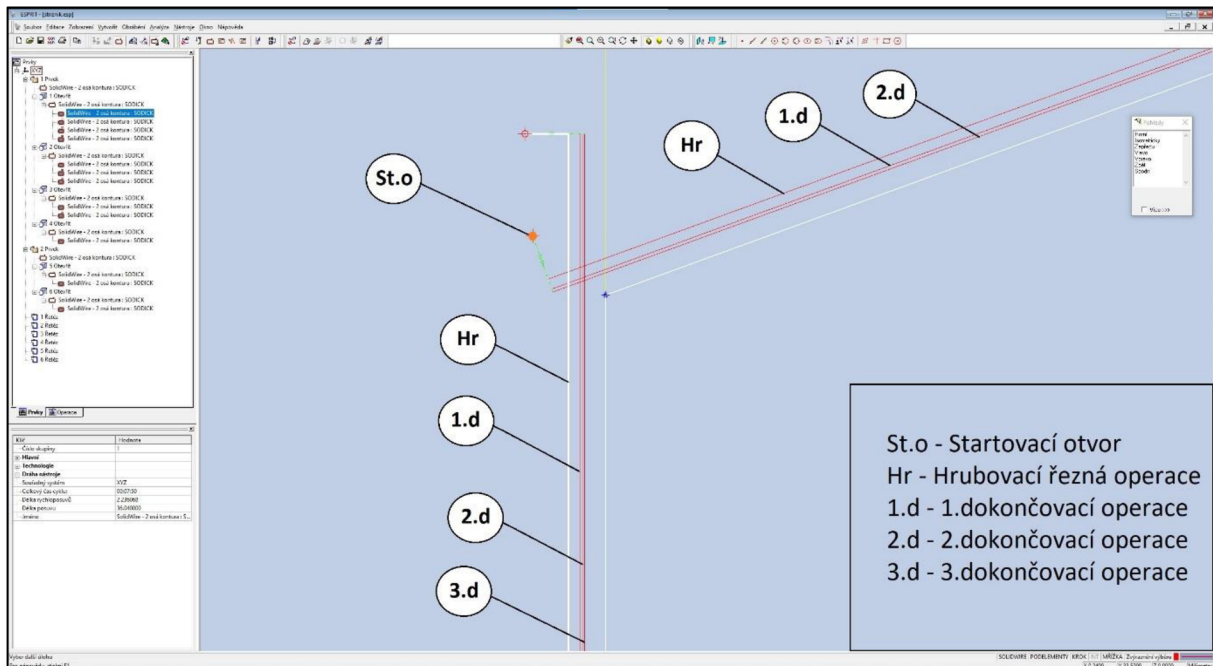
Celý výrobní proces počínaje volbou polotovaru se udával v prostorech firmy VKV Horák s.r.o. Základním jádrem výroby součásti však byl NC program, který se vytvářel v programu ESPRIT CAD/CAM. Tento program díky svým univerzálním obráběcím cyklům patří mezi největší elitu programů určených pro drátové řezání. Nabízí celou škálu cyklů, ve které jsou zahrnuty operace typu ovládnání drátu, ovládnání nádrže, hrubé řezání, dokončovací řezání a manipulace s horním i dolním vodítkem. [36]

Konturování je zde nejflexibilnější a nejčastěji používaný cyklus. Nabízí přímé řezání, kuželové řezání a řezání pod úhlem. Díky podpoře pokročilého kuželosečkového programování je zde možnost automaticky obrobit i geometrii s pokročilými změnami kužele. Základem celého konturování je 4-osý systém, který je založen na synchronizaci horní roviny UV a spodní roviny XY. [36]

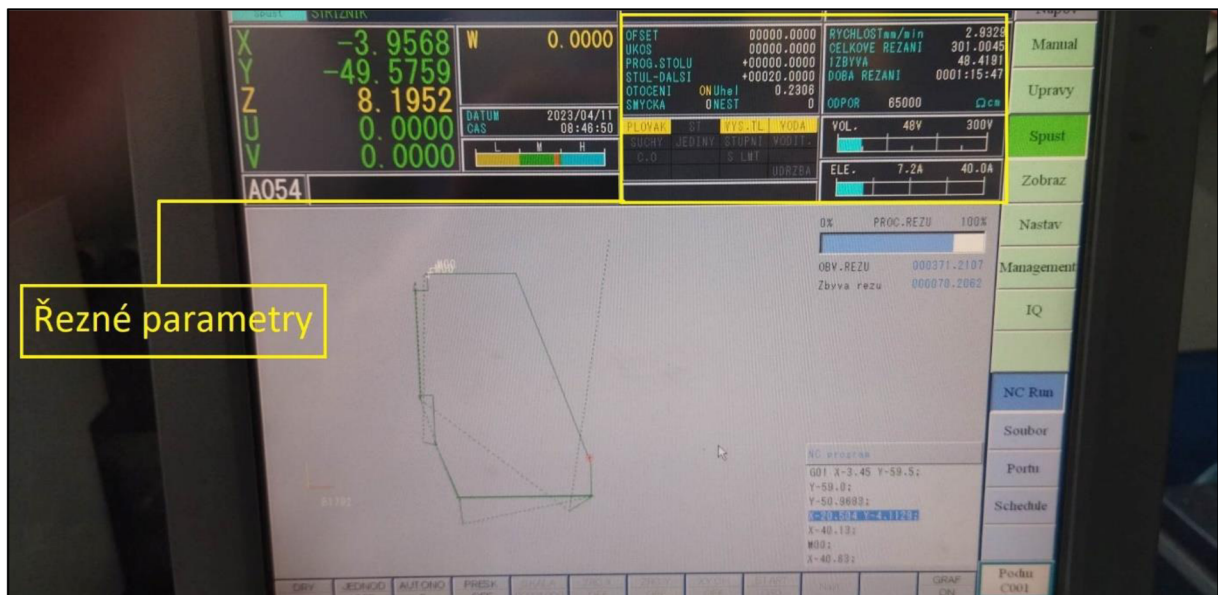
V první fázi programování bylo nutné si vytvořit samotný model, který se vytvořil v 3D softwaru SOLIDWORKS, kde byl vytvořen návrh polotovaru a samotné jmenovité rozměry součásti. Odsud se všechny vstupní parametry včetně modelu exportovaly do softwaru ESPRIT (obr. 4.5). V tomto programu se začaly tvořit nejprve startovací otvory pro vrtačku SY-2030 a následně se vytvořily kontury (obr. 4.6) pro všechny operace označené na výkresu. Jako předposlední fáze bylo určit průměr drátu, vybíjecí energie, nájezdy a přejezdy u kontur, tvorba můstku, způsob odstranění můstku a nakonec nastavit počty hrubovacích a dokončovacích operací. Na závěr se musel určit typ post processoru, který následně vygeneroval potřebný G-kód. V něm byly kompletně zaznamenány vstupní parametry a dráhy elektrody zavedené v kartézském systému souřadnic. Tento kód se následně pomocí firemní sítě převedl do ovládacího panelu, kde se zkusily první simulace, které vyvrátily kolize, a tak byl program prohlášen za úspěšný. Obsluha stroje nastavila a dopravníka poslední parametry a spustila program řezání. Řezání proběhlo bez vážnějších komplikací, pokud se nepočítá prasknutí drátu, které bylo opraveno.



Obr. 4.5 Zobrazení profilu střížníku v softwaru ESPRIT.



Obr. 4.6 Zobrazení řezných operací v softwaru ESPRIT.



Obr. 4.7 Zobrazení ovládacího panelu.

Jakmile se převedl G-kód z programu ESPRIT do ovládacího panelu, tak se s ním převedly i všechna privilegia a vstupní parametry. Software ESPRIT už tedy neměl kontrolu nad řezným procesem a celý proces byl tak řízen jen z ovládacího panelu. Zde se musely upravit parametry vstupního napětí, proud průrazu dielektrika a řezné rychlosti, jelikož program ESPRIT doporučoval všechny hodnoty příliš vysoké, včetně řezné rychlosti, která činila $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Podmínky se tak na panelu upravily, jak je možné vidět na obr. 4.7, kde vychází hodnoty rychlost řezání $3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, napětí 48 V a elektrický proud 7,2 A. Kompletní vstupní parametry pro obráběcí program jsou zobrazeny v příloze 2 a 3.

4.6 Strojový park

Na výrobě se kompletně podílelo trio strojů: drátová řezačka AQ400L, vrtačka pro startovací otvory SY-2030 a magnetická bruska BRH-20 A. Všechny tyto stroje se podílely na konečném rozměru a povrchu součásti.

Drátová řezačka Sodick AQ400L

Jedná se o zastupitele 5. generace elektroerozivních drátových strojů vyrobených pod štítkem firmy Sodick. Na strojírenském trhu se tento zastupitel objevil v roce 1999 a nastal velký průlom v elektroerozivním obrábění, jelikož se zde v soustavě objevují první lineární motory, které dovolí nastavit pracovní roviny do různých poloh, a tím jsou schopné usnadnit obsluhu a výrobu. Od roku 1999 bylo vyrobeno více než 27 000 kusů těchto strojů a i nadále pro ně vznikají různá mechanická a softwarová vylepšení. Podrobnější charakteristika a rozměry drátové řezačky jsou zobrazeny v příloze 1. [39]

Vrtačka pro startovací otvory SY-2030

Jedná se o doplněk k drátové řezačce Sodick, kde se nastavují a vytvářejí startovací otvory pro průchozí drátovou elektrodu. Ve praxi se vrtačka také využívá pro odstraňování zlomených nástrojů, šroubů nebo kolíků. Používají se zde mosazné a měděné trubičkové elektrody, které dosahují $\varnothing 0,3 - 3$ mm, a je s nimi možné obrábět i tvrdé zakalené nástrojové ocele nebo slinuté karbidy, které jsou elektricky vodivé. [40]

Horizontální magnetická bruska BRH – 20 A

Tento stroj slouží od roku 1989 a používá se pro broušení rovinných ploch. Nabízí se zde možnost brousit plochy do velikosti rozměru až 630 mm do hmotnosti 130 kg. Velkou výhodou je zde upínání, kde se využívá magnetická deska o velikosti 600 x 200 mm. [41]



Obr. 4.9 SY- 2030.



Obr. 4.8 Sodick AQ400L.



Obr. 4.10 Magnetická bruska BRH – 20 A.

4.7 Vstupní parametry

Správné nastavení parametrů je nejdůležitější předpoklad pro správně provedený řez v daných rozměrech o potřebné jakosti povrchu. Během výroby střížníku se celkově zadávalo 15 vstupních parametrů, kde každý z nich je nositelem určité charakteristiky, která se později podepsala na konečném výsledku výroby. Výroba střížníku byla ojedinělá tím, že každá jeho strana se lišila počtem hrubovacích a dokončovacích operací, proto bylo zapotřebí vytvořit pro každou operaci odlišné vstupní parametry. Přehled vstupních parametrů je znázorněn v tab. 4.3, tab. 4.4, tab. 4.5, tab. 4.6.

Tab. 4.3 Vstupní parametry pro Plochu 3 (3 dokončovací operace).

Vstupní parametry Plocha 3															
Název operace	ON	OFF	IP	HRP	MAO	SV	V	SF	C	PIK	CTRL	WK	WT	WS	WP
hrubování	014	013	2215	000	242	+030.0	8.0	0080	0	000	0000	025	160	130	050
1.dokončování	002	011	2215	000	000	+053.0	5.0	1065	0	000	0000	025	180	130	140
2.dokončování	001	014	2210	000	000	+042.0	2.0	1066	0	000	0000	025	180	130	240
3.dokončování	015	014	0515	000	000	+016.0	0.0	1097	0	000	0000	025	180	130	240

Tab. 4.4 Vstupní parametry pro Plochu 2 (2 dokončovací operace).

Vstupní parametry Plocha 2															
Název operace	ON	OFF	IP	HRP	MAO	SV	V	SF	C	PIK	CTRL	WK	WT	WS	WP
hrubování	014	013	2215	000	242	+030.0	8.0	0080	0	000	0000	025	160	130	055
1.dokončování	002	023	2215	000	750	+053.0	8.0	6080	0	000	0000	025	160	130	012
2.dokončování	000	001	1015	000	000	+030.0	7.0	7050	0	008	0000	025	160	130	012

Tab. 4.5 Vstupní parametry pro Plochu 1 (1 dokončovací operace).

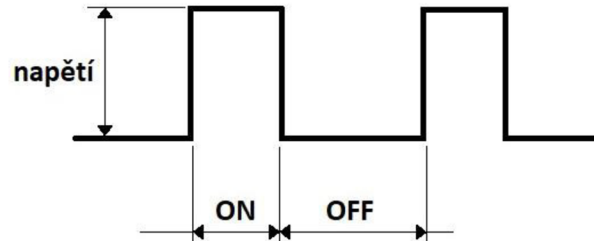
Vstupní parametry Plocha 1															
Název operace	ON	OFF	IP	HRP	MAO	SV	V	SF	C	PIK	CTRL	WK	WT	WS	WP
hrubování	014	013	2215	000	242	+030.0	8.0	0080	0	000	0000	025	160	130	055
1.dokončování	002	023	2215	000	750	+053.0	8.0	6080	0	000	0000	025	160	130	012

Tab. 4.6 Vstupní parametry pro hrubovanou plochu.

Vstupní parametry Plocha hrubovaná															
Název operace	ON	OFF	IP	HRP	MAO	SV	V	SF	C	PIK	CTRL	WK	WT	WS	WP
hrubování	014	013	2215	000	242	+030.0	8.0	0080	0	000	0000	025	160	130	050

ON – doba impulsu

Elektroerozivní obrábění je založené na dvou po sobě jdoucích, časově oddělených výbojů. Hodnota „ON“ určuje dobu vybíjecího impulsu. Čím vyšší je nastavená hodnota, tím větší nastane vybíjecí energie a tím rychlejší bude obrábění. Během toho však nastane rozšíření jiskrové mezery, což může vyvolat snížení kvality povrchu. První číslice zde znázorňuje druh elektroerozivního procesu a další dvě ukazují hodnotu doby ON.



Obr. 4.11 Zobrazení režimu ON a OFF.

OFF – doba mezery

Doba mezery mezi dvěma impulzy je vyjádřena třímístným číslem a znázorňuje dobu, kdy je napětí odpojeno. První číslice znázorňuje druh elektroerozivního provozu a následující dvě znázorňují určitou dobu mezery.

IP – kvalita povrchu

Zadává se pomocí čtyřmístných dat. První místo označuje požadovanou kvalitu povrchu, která se rozděluje na 0 – dokončování a 1 – 2 hrubování. Druhá číslice označuje připojení spínacího obvodu. Poslední dvě číslice určují maximální hodnotu vybíjecího proudu.

HRP – synchronizace

Skládá se ze čtyř parametrů:

- **H - napájecí obvod vysokého napětí** (určuje spouštěcí režim, popř. synchronní obvod),
- **R – spouštěcí obvod** (určuje zda je třeba spuštění spouštěcího režimu),
- **P – synchronní obvod vysokého napětí** (definuje hodnotu odporu a určuje zda je třeba použít synchronní obvod vysokého napětí).

○ Spouštěcí obvod:

Tento dodatečný obvod ke standardnímu obvodu eroze vede ke stabilizaci impulsu bezprostředně před jiskrovým přeskokem. Čím vyšší je nastavená hodnota, tím nižší je impedance (odpor) a tím vyšší je energie.

○ Synchronní obvod vysokého napětí:

Tento dodatečný obvod má za úkol zlepšit stabilitu vybíjecích impulsů během doby výboje. Platí stejně jako u spouštěcího obvodu pravidlo, že čím vyšší je nastavená hodnota, tím nižší je impedance a tím vyšší je energie.

MAO – stabilita obrábění

Jedná se o složku, která určuje konkrétní kritéria potřebná ke stabilizaci obrábění. Zadává se pomocí třímístného kódu, kde se na každé místo řadí číslice od 0 do 9. Označení se rozděluje na:

- **M** – definuje úroveň napětí pro posouzení stability procesu,
- **A** – určuje kolikrát má být doba OFF prodloužena,
- **O** – ve stabilním procesu se nepoužívá, ale v nestabilním určuje délku doby ON.

SV – regulace šířky mezery (servonapětí)

Parametr SV reguluje šířku mezery posuvem drátu vpřed a vzad, jelikož se s proměnlivými podmínkami v mezeře během elektroerozivního procesu mění také pracovní napětí. V procesu pracuje tak, že pokud spínací napětí překročí stanovenou hranici, tak se drát přisune blíže k obrobku. Jestliže je napětí nižší než požadovaná hodnota, tak se drát vrací zpět do výchozí pozice (posuv neprovádí samotný drát, ale pracovní stůl v osách X a Y). Hodnoty se zadávají v rozmezí 0 – 255. Čím vyšší je nastavená hodnota, tím větší je mezera mezi elektrodou a obrobkem.

V – napájecí napětí u mezery

Ukazuje jaké je nastavené napětí (V) v obráběcím procesu, čím vyšší je nastavená hodnota, tím vyšší je vybíjecí energie.

SF – rychlost posuvu stolu

Stanovuje se čtyřmístným číslem. První číslice stanovuje provozní druh servořízení a další tři stanovují rychlost posuvu.

V praxi se rozdělují tři druhy servořízení:

- **standardní** – skutečné napětí mezery se srovnává s referenčním servonapětím „SV“ a na základě tohoto srovnání se optimalizuje míra posuvu,
- **servořízení konstantní rychlosti** – konstantní poježdění stolu bez ohledu na stávající podmínky jiskrové mezery,
- **servořízení SMT** – u tohoto řízení se kromě referenčního servonapětí a napětí mezery uplatňuje také poměr impulzů při chodu naprázdno.

Příklad posuvu stolu

SF X080 8,0 mm. min⁻¹

C – kapacita

Tento prvek stanovuje hodnotu kondenzátoru, který je zapojen paralelně k mezeře. Čím více je zde nastavená hodnota, tím větší je pak vybíjecí energie. Tím se stabilizuje obráběcí proces. Pokud je však hodnota příliš vysoká, tak hrozí rozšíření jiskrové mezery a zároveň tím hrozí i zhoršení kvality povrchu. Vyjadřuje se jednomístným číslem (0 – 4).

WK – výběr drátu

První číslice určuje materiál drátu, druhá a třetí číslice průměr drátu.

Průměr drátu: Přímé zadání (jednotka: 25 μm)

Příklad: $\varnothing 0,25 \text{ mm} = 025$

Materiál drátu:

0XX ... mosaz (tvrdá)

1XX ... mosaz (měkká)

3XX ... wolfram

4XX ... molybden

WT – napětí drátu

Nastavení ovlivňuje velikost napětí drátu, přičemž vyšší napětí se nastavují při řezání svislých poloh, aby se zamezilo vibracím, a nižší napětí při řezání šikmých a kuželových ploch.

Příklad: WT = 160 odpovídá napětí drátu 1600 g

WS – rychlost odvíjení

Rychlost odvíjení je závislá přímo na velikosti obráběné součásti. Čím vyšší je obráběná součást, tím rychlejší odvíjení se zadává, jelikož zde hrozí velké opotřebení drátové elektrody.

Příklad: WS = 130 odpovídá rychlosti chodu 13 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$.

WP – frekvence výplachu

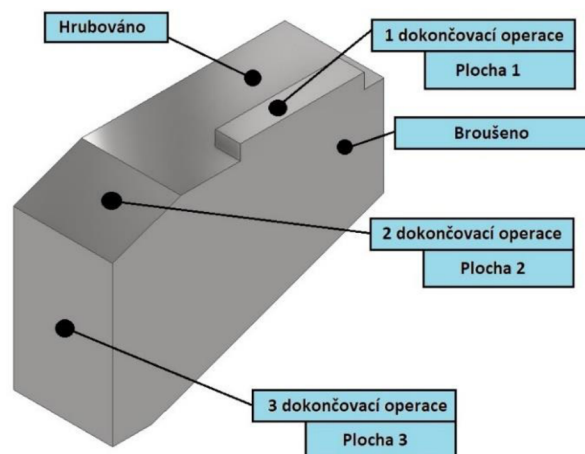
Tento prvek ovlivňuje tlak přívodu dielektrické kapaliny do místa řezného procesu a následně výplach. Čím jsou hodnoty vyšší, tím je výplach větší, a tudíž je možné nastavit rychlejší řezný proces. Pokud jsou hodnoty malé, tak řez musí být pomalejší, ale zase se dosahují přesnější rozměry při obrábění.

Příklad: WP = X55 odpovídá frekvenci invertoru vysokotlakého výplachu 55 Hz.

WP = X12 odpovídá frekvenci invertoru vysokotlakého výplachu 12 Hz.

5 MĚŘENÍ POVRCHU ŘEZANÉ SOUČÁSTI

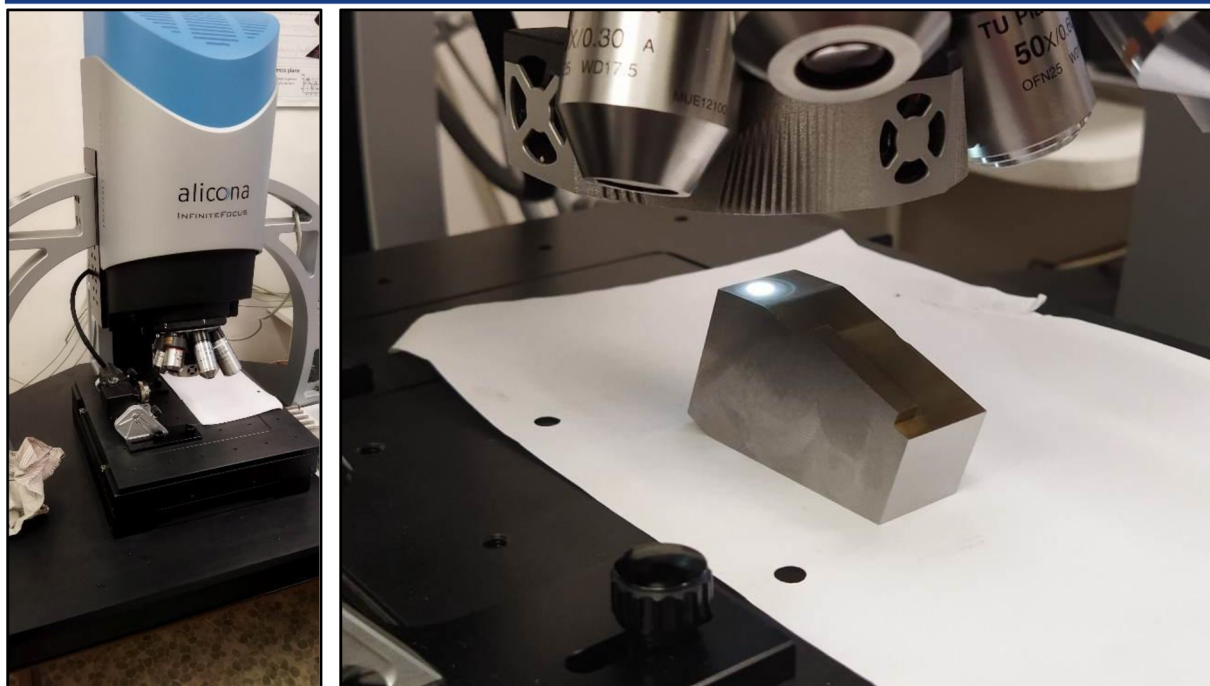
Řezný proces, jak už bylo řečeno, se provedl tak, že u každé plochy součásti se provedl jiný počet řezných operací (obr. 4.13). Na těchto plochách se následně vyhodnotila samotná střední aritmetická úchylka Ra a největší výška profilu Rz. Vyhodnocení se zaměří konkrétně na plochy hrubovací, s jednou dokončovací operací, se dvěma dokončovacími operacemi a se třemi dokončovacími operacemi, které byly provedeny na drátové řezačce. Na součásti byla provedena také operace broušení, na které nebude brána tak velká pozornost. Broušená plocha zde slouží jen k porovnání s řezanými plochami. Původní myšlenka byla vyrobit více součástí, kde by každá součást byla řezána s odlišnými počty operací. Z ekonomických a časových důvodů se však rozhodlo provést všechny dokončovací řezy na jedné součásti.



Obr. 4.13 Střížník se zobrazením řezných operací.

5.1 Postup měření na přístroji Alicona

Samotné měření probíhalo v prostorách fakulty strojního inženýrství v Brně na optickém 3D přístroji Alicona InfiniteFocus (obr. 4.14 a). Tento metrologický nástroj se řadí mezi přesné, rychlé univerzální přístroje, které pracují s tolerancemi v rozsahu μm a $\text{sub-}\mu\text{m}$. Komponenty jsou zde měřeny plošně s vysokým rozlišením nezávisle na velikosti, materiálu, geometrii, hmotnosti a kvalitě povrchu. Řada osvědčených a nových funkcí kombinuje funkce systému měření drsnosti (Ra, Rq, Rz/Sa, Sq, Sz) s vlastnostmi souřadnicového měřicího přístroje. Hlavní princip tohoto zařízení je "variace zaostření" k měření tvaru a drsnosti povrchů. Zaostření kombinuje malou hloubku ostroty optického systému s vertikálním skenováním, aby poskytl topografické informace. Kromě topografických informací, které je možné vyhodnotit, Alicona také poskytuje výstup CCD (charge-coupled – device) a RGB (Red, Green and Blue colors), které umožňují barevné zobrazení ve formách určitých map s výškovou a barevnou rozlišností. Alicona je vynikající pro většinu technických povrchů, ale bojuje s vysoce leštěnými povrchy, které mají silnou odrazivost. [37; 38]



a) Alicona InfiniteFocus

b) Snímání povrchu součásti

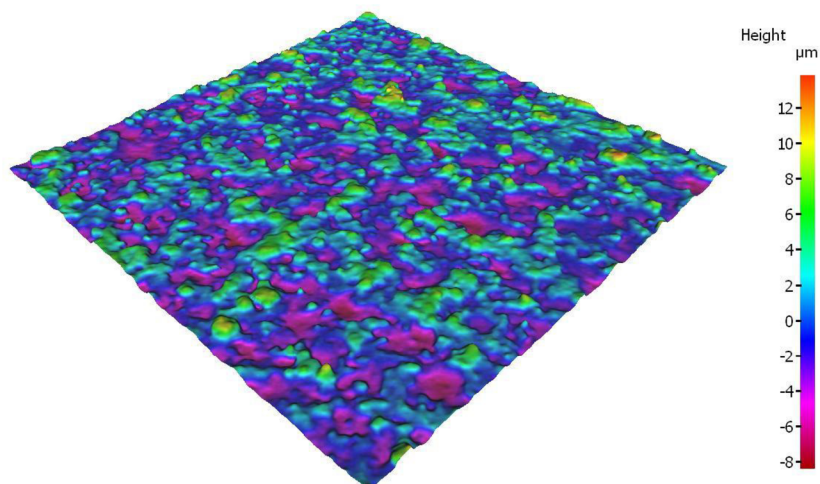
Obr. 4.14 Měření jakosti povrchu střížníku.

Než byla součástka plně vložena do kompetence měření výškového profilu povrchu, tak se musely provést čisticí operace. Součást byla očištěna v acetonu a plně odmaštěna, jelikož z výroby byla znečištěna. Po vyčištění byla položena na desku mikroskopu a podložena bílým papírem, aby se zaručil kontrast snímání (obr. 4.14 b). Objektív se na přístroji nastavil na optické zvětšení $\times 20$. Mikroskop je propojen s počítačem, kde se nastavily snímací atributy jako je vzdálenost snímání, ostrost snímání a rychlost snímání. Po následném zvážení se rozhodlo provést snímací proces ve vzdálenosti $l_r = 4$ mm, jelikož při větší vzdálenosti se objevovaly chyby snímání a výsledky nebyly analyzovány. Směr měření je zobrazen na obr. 4.21. Výsledné hodnoty snímání jsou zobrazeny v tab. 4.7. Kompletní výstupní hodnoty z přístroje Alicona jsou zobrazeny postupně v přílohách 4, 5, 6 a 7.

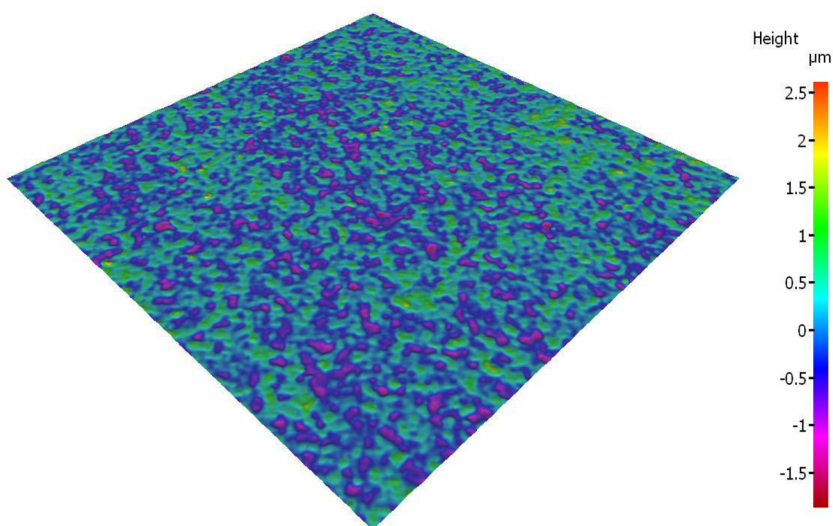
Tab. 4.7 Výstupní hodnoty z mikroskopu Alicona.

		Ra [μm]	Rz [μm]
1 dokončovací operace	1	2,391	14,634
2 dokončovací operace	2	0,348	2,568
3 dokončovací operace	3	0,531	3,523
Hrubováno	0	3,244	24,253

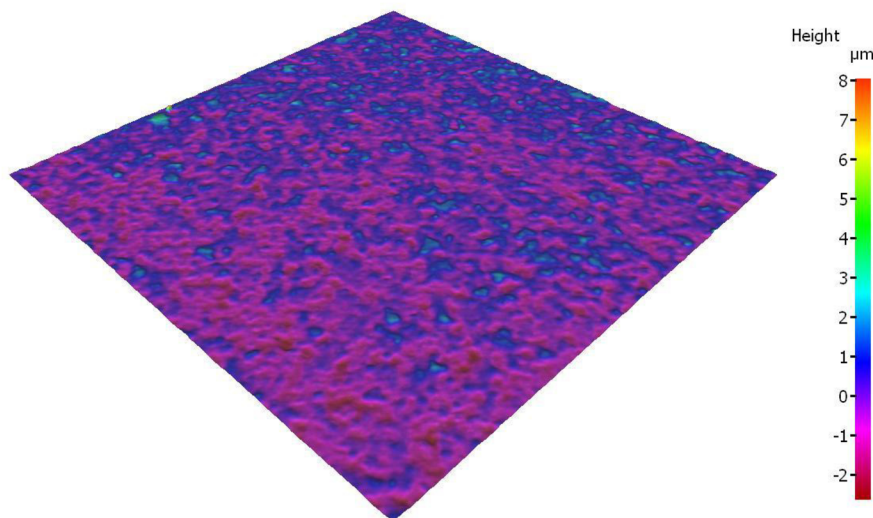
Výstupní hodnoty ukázaly překvapující výsledky. Konkrétně se jedná o rozdíl mezi 3. a 2. dokončovací operací, kde výchozí hodnoty vychází 0,531 pro 3.dokonč.operaci a 0,348 pro 2.dokonč. operaci. V obecné literatuře se předpokládá pravidlo, že se zvyšujícím se počtem řezných operací se zlepšuje jak rozměrová přesnost, tak i přesnost povrchové jakosti. Analýza a snímání daných povrchů bylo provedeno na více místech a neustále vycházely totožné nebo podobné výsledky. S předpokládanou chybou měření mikroskopu se měřící proces provedl také na drsnoměru SJ- 210, který je součástí metrologického zařízení u firmy VKV HORÁK s.r.o. I zde výsledky ukazovaly podobné hodnoty měření se stejným rozdílem mezi 2. a 3. operací. Došlo k závěru že chyba měřících zařízení nebyla na místě. Chyba se nejdříve přisuzovala k samotnému stroji, který slouží ve firmě již 12 let a mohlo zde dojít k určitým provozním důsledkům, které během procesu řezání povrch znehodnocují.



Obr. 4.15 Měření výškového profilu povrchu 1.dokončovací operace.



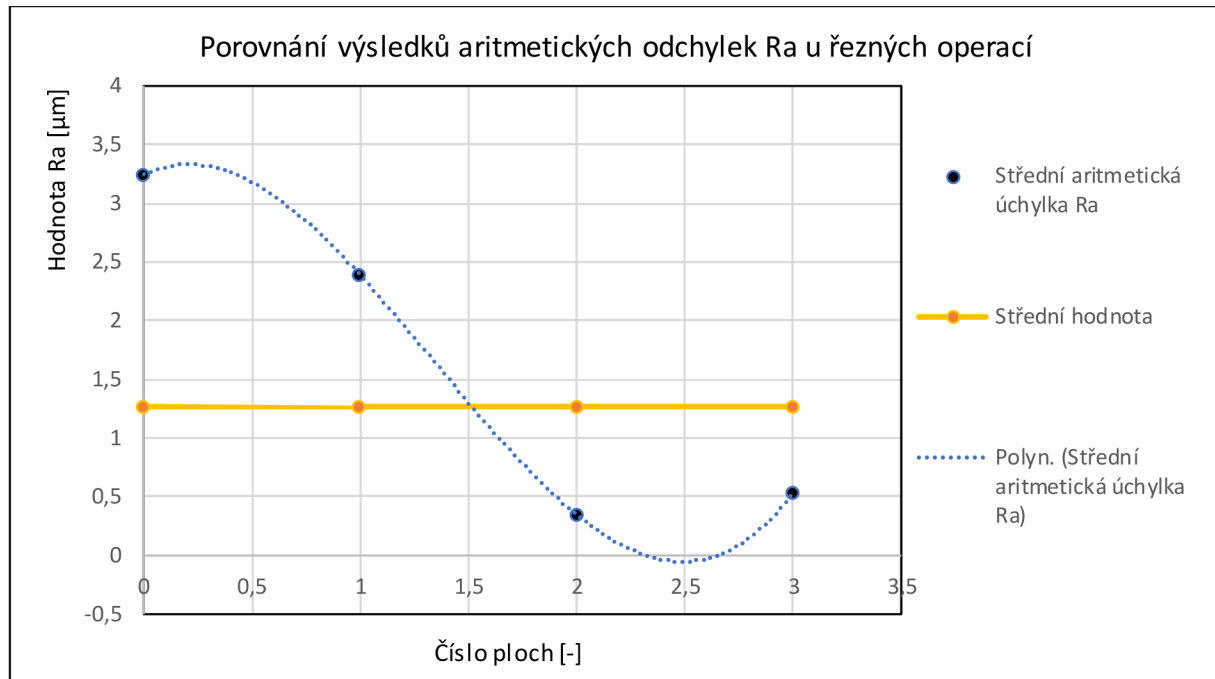
Obr. 4.16 Měření výškového profilu povrchu 2.dokončovací operace.



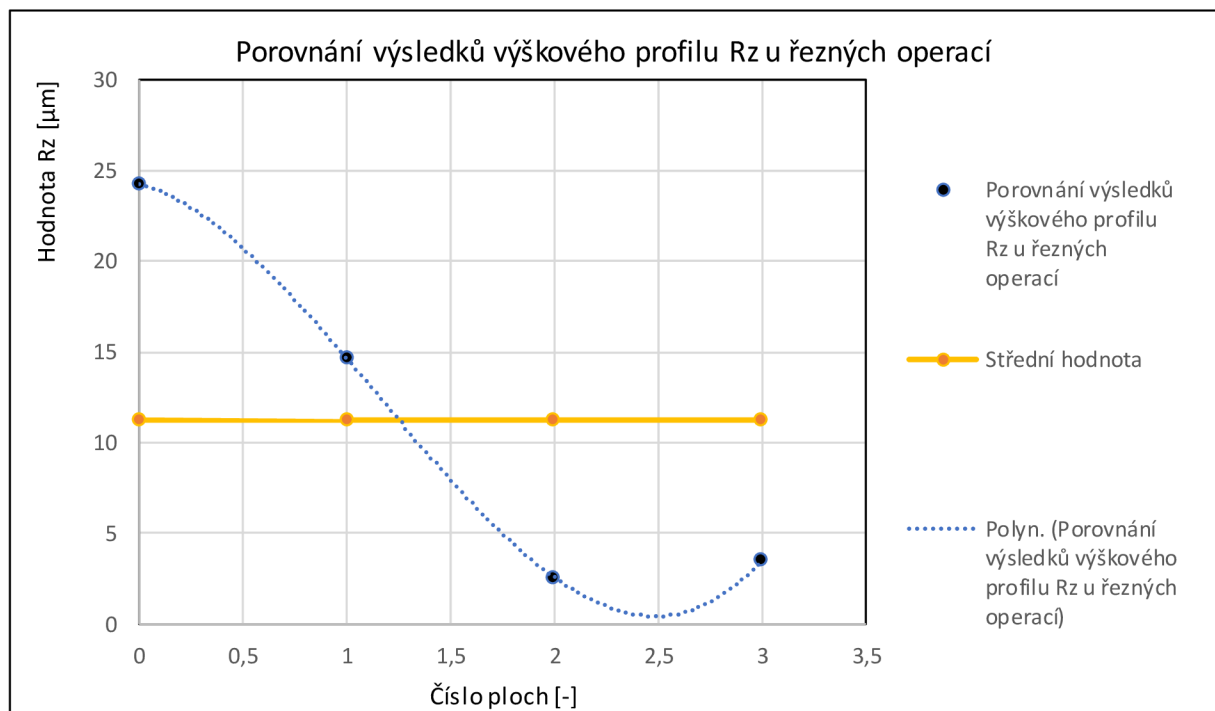
Obr. 4.17 Měření výškového profilu povrchu 3.dokončovací operace.

5.1.1 Vyhodnocení povrchů součástí

Po zvážení všech možností se sestrojily grafy (obr. 4.18 a 4.19) závislosti řezaných ploch na výšce profilu Rz a aritmetické úchylce Ra. Z nich je zcela patrné, jak velké rozdíly v jednotkách μm jsou mezi danými operacemi od hrubovací až po konečnou 3.dokončovací. Dle očekávání rozdíl hrubovací operace vychází s jakostí povrchu nejhůře, ale následně dochází ke zlepšením až k 2.operaci řezání. Zde je řezný proces na vrcholu a má zde nejlepší parametry jakosti povrchu. Otázkou však je, jak by na tom byl, kdyby se hodnotila i rozměrová přesnost.



Obr. 4.18 Závislost řezných ploch na aritmetické úchylce Ra .



Obr. 4.19 Závislost řezných ploch na výšce profilu Rz.

5.2 Postup měření na přístroji SJ-210

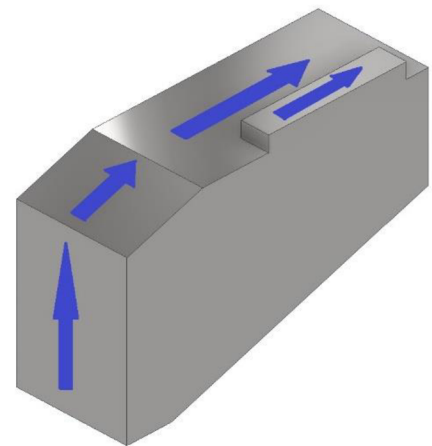
Surftest SJ-210 je uživatelsky přenosný drsnoměr pro měření drsnosti povrchu, koncipovaný jako kapesní přístroj, který může být okamžitě použit ve výrobě jako pomocný prvek. Obsahuje barevný LCD displej s možností zobrazení jak digitálních hodnot, tak i hodnot ve formě výstupních distribučních křivek a amplitud. Všechny tyto atributy pracují v souladu s normou ISO 4287:1997. [43]

Měření probíhalo s následujícím nastavením drsnoměru:

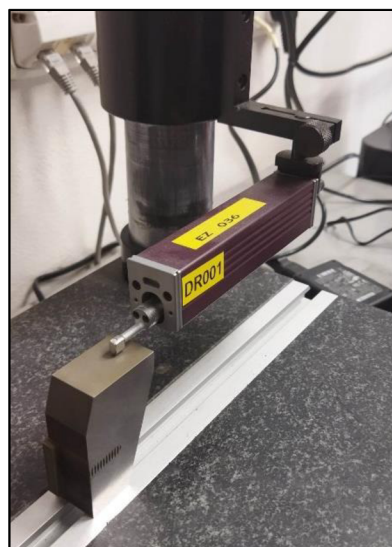
- Filtr $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$
- Filtr $\lambda_s = 8 \text{ }\mu\text{m}$
- měřicí vzdálenost $l_r = 5,6 \text{ mm}$
- rychlost měření $v = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
- měřicí síla snímače $F = 0,75 \text{ mN}$



Obr. 4.20 Přístroj Surftest SJ-210 Mitutoyo [43].



Obr. 4.21 Směr měření na součásti.



Obr. 4.22 Ukázka měření.

Bylo provedeno celkem 7 měření na každé ploše součásti, jak je zobrazeno na obr. 4.13. Na každé ploše se pouze měnil startovací bod měření. Z důvodu poruchy měřicího stroje byly naměřeny pouze hodnoty průměrné aritmetické úchylky Ra. Z výsledných hodnot se vypočítala střední hodnota \overline{Ra} a odhad směrodatné odchylky, kde se použil vztah (4.3) a (4.4). Všechny změřené a vypočítané atributy jsou zobrazeny v tab. 4.8.

Odhad střední hodnoty:

$$\overline{Ra} = \frac{1}{n} \sum_i Ra_i \quad (4.3)$$

Odhad směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (Ra_i - \overline{Ra})^2} \quad (4.4)$$

Tab. 4.8 Výsledné hodnoty jakosti povrchu.

	Plocha 1	Plocha 2	Plocha 2	Plocha 3	Hrubováno	Broušeno
	Ra [μm]					
1	2,359	0,645	0,645	0,811	3,018	0,846
2	2,553	0,698	0,698	0,766	2,849	0,886
3	2,49	0,691	0,691	0,799	2,902	0,891
4	2,667	0,611	0,611	0,809	2,885	0,875
5	1,987	0,747	0,747	0,818	2,997	0,859
6	2,826	0,655	0,655	0,791	3,153	0,863
7	2,391	0,684	0,684	0,816	3,197	0,882
\overline{Ra}	2,468	0,676	0,676	0,801	3,000	0,872
s	0,266	0,044	0,044	0,018	0,134	0,016

Z výsledných hodnot vyplývá, že plocha 2 má nejmenší hodnotu průměrné aritmetické úchylky. Z literárního hlediska podle počtu dokončovacích operací by tomu však být nemělo. Opak je ale pravdou. Porovnájí-li se konečné hodnoty dokončovacích operací (plocha 2, plocha 3) s broušenou plochou. Je zajímavostí, že i zde vychází rezné hodnoty s lepším výsledkem. Tento výsledek se však dá vysvětlit tím, že na broušení nebyl brán velký důraz. Byl použit libovolný brusný kotouč s libovolnými brousíci podmínkami. Na magnetické brusce je samozřejmě možnost dosažení výrazně lepších hodnot, které se mohou pohybovat v rozmezí 0,1 až 0,4 μm .

Další velkou zajímavostí jsou velké rozdíly mezi oběma způsoby měření. Plocha 2 je podle metrologického přístroje Alicona Ra 0,348 μm a podle přenosného přístroje Ra 0,676 μm . Zde mohla nastat chyba na obou stranách. Na přístroj Alicona mohlo dojít k odrazu od povrchu, který je od drátu nerovnoměrně obroben. Vyskytují se tu místa, která jsou lesklá, a tak mohlo dojít k nepřesnému snímání. Chyba měření na přenosném přístroji mohla být už v samotné kalibraci, kde mohly být zadány špatné snímací parametry. I když je možná chyba na obou stranách, tak oba způsoby měření potvrzují, že plocha 2 vychází nejlépe, což není náhodná veličina. Zbývá vysvětlit, proč tomu tak je. Musí se tedy zaměřit na vstupní rezné podmínky uvedené na stroji Sodick AQ400L.

5.3 Vstupy řezných podmínek

V této kapitole dochází ke konečnému vyřešení otázky povrchové jakosti, kterou vyřešil samotný G-kód se vstupními parametry. U 3. dokončovací operace obráběné součásti jsou nastavené parametry ON 015 a IP 0515. Hodnota ON je bez rozměrná a stanovuje pouze hodnotu vybíjecí energie. Čím větší je, tím je vybíjecí energie větší a zrychluje se obrábění. První číslice u ON znamená, jestli se jedná o standardní režim obrábění nebo režim, který je povýšen a další vstupní charakteristiku. První číslice u IP rozděluje pracovní režim na hrubovací (1) a obrábění načisto (0). Poslední dvě číslice u IP určují vybíjecí proud.

Pro následné vyřešení případu se porovnají dva vstupy. První vstup je pro vytvořenou součást (tab. 4.9) a druhý je nastavení dle manuální příručky stroje (tab. 4.10), který je sice pro pět řezných operací, ale na vyřešení konečné dokončovací otázky to nemá žádný vliv.

Tab. 4.9 Vstupní parametry u obráběné součásti.

Název operace	ON	OFF	IP
hrubování	014	013	2215
1.dokončování	002	011	2215
2.dokončování	001	014	2210
3.dokočování	015	014	0515

Tab. 4.10 Vstupní parametry dle manuální příručky.

Ø drátu 0.25 mm														Materiál: OCEL		Tloušťka: 20 mm		Diel.: Voda-3		Řezy: 5	
Stroj: Série A, AQ LNW														POSUV	EP	ES	V				
No	C***	ON	OFF	IP	HRP	MAO	SV	V	SF	C	PIK	CTRL	WK	WT	WS	WP	mm/min	(V)	(A)	/O	
AP	000	008	014	2215	000	270	050	8	0070	0	000	0000	025	180	130	040	-	-	-	V	
1	001	013	014	2215	000	240	045	8	0070	0	000	0000	025	180	130	045	02.0 ~ 03.5	051	07.5	V	
2	002	002	008	2215	000	230	053	5	8040	0	000	0000	025	200	130	012	10.0 ~ 15.0	062	00.5	V	
3	003	316	001	0015	000	000	059	3	9050	0	000	0000	025	200	130	012	09.0 ~ 15.0	031	02.9	V	
4	004	316	001	0015	000	000	027	0	9050	0	000	0000	025	200	130	012	05.0 ~ 08.0	018	01.4	V	
5	905	000	001	1015	000	000	018	3	3080	0	009	0000	025	200	130	012	07.5 ~ 08.0	-	02.5	V	

Při porovnání bylo zjištěno, že vybíjecí režim ON u součásti je 015 a dle příručky 316, kde zmíněná trojka pouze stanovuje zapnutí antikoroziho procesu. Obě hodnoty vybíjecího režimu jsou totožné. Hodnoty IP u součásti a manuálu vychází 0515 a 0015, což znamená dokončení načisto při vybíjecím proudu 15 A. K pochybení tedy ze strany G-kódu nedošlo. Celý pracovní proces je tedy nastaven správně. Při konečných operacích se tedy nastavuje větší hodnota vybíjecí energie, aby se s největší pravděpodobností vyřešila otázka konečného rozměru s danou tolerancí. Povrch se tím sice zhorší, ale jak je možné vidět na grafech výše, tak se jedná o nepatrný rozdíl, který na budoucí pracovní proces nebude mít vliv. Pokud by byla jakost povrchu důležitá, tak by se stejně u drátové řezačky poslední operace vynechala. Obráběná součást by se musela obrousit z důvodů případných otřepů a vzniku soudečkovitosti.

5.4 Měření tvrdosti povrchu

Další fáze měření bylo hodnocení tvrdosti povrchu na obrobených plochách součásti a následné posouzení, jestli má elektroerozivní proces vliv na hodnotu tvrdosti po předešlém řezání. Měřilo se na přístroji Rockwell 150 Analog, kde byl zvolen za indentor diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° , a zvolená zatěžovací síla byla nastavena na 1 500 N. Jedná se o přístroj, který není moderní a slouží již delší dobu, ale je plně funkční a pro měření ploch plně postačí. Naměřily se celkem 3 hodnoty pro každou obrobenou plochu (tab. 4.11).

Tab. 4.11 Naměřené hodnoty tvrdosti.

HRC				
Plocha 1	Plocha 2	Plocha 3	Broušeno	Hrubováno
48,1	48,1	48,1	48,2	48,1
48,2	48,0	48,3	48,2	48,2
48,1	48,2	48,2	48,2	48,3

Jak je vidět, tak naměřené hodnoty se příliš nemění. Tvrdost zůstává konstantní na všech plochách a hodnoty se liší jen o v rámci desetin. Cílem zde bylo zjistit, jestli nasycená vrstva na povrchu mění charakter tvrdosti předem kalené součásti. Vrchní vrstva řezné plochy je podle pramenů literatury ovlivněna několika faktory. Vlivem působení impulzů o dané energii je zde možnost vzniku homogenní struktury, která je ovlivněna jak přichozí teplotou, tak i příchodem dielektrika. Dielektrickou kapalinou zde byla deionizovaná voda, která se převážně používá u řezných operací. V praxi se však používají i kapaliny typu transformátorový olej nebo petrolej, u kterých by byla možná větší pravděpodobnost, že by vrchní vrstvu více ovlivnily a zvětšily její tloušťku. Muselo by však dojít k podrobnější analýze, která by tento problém pomohla vyřešit. Silně doporučena by byla analýza pomocí Berkhausenova šumu, která pracuje na magneticko-elastické bázi a je schopna vyhodnotit změny zbytkového napětí a danou povrchovou strukturu na mnohem přesnější a jemnější úrovni. Konkrétně u tohoto typu měření nenastaly žádné povrchové změny tvrdosti. Je však možné, že i zde ty změny jsou, ale nelze je bohužel naměřit na tomto použitém přístroji, jelikož je pro tento proces příliš hrubý. Nasycená vrstva v tomto případě může být příliš tenká, že je diamantovým hrotem přístroje proražena, a naměřila se tak hodnota kalené součásti.



Obr. 4.23 Měření tvrdosti na přístroji Rockwell 150 Analog.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Důležitým poznatkem u každé součásti, která tvoří určitou hodnotu, je zapotřebí znát náklady spojené s výrobou. Technologie WEDM se v odvětví strojního průmyslu řadí mezi dražší způsoby výroby, jelikož se zde pracuje s elektrickou energií, která je v této době v postavení silného zdražování. Dalším důvodem vysokých nákladů jsou samotné výrobní časy, jelikož výroba drátkem je v porovnání s technologií laseru, vodního paprsku a plasmu velmi pomalá. Nic tomu nepřidá ani spotřeba drátové elektrody, která se nedá opakovaně použít z důvodů nestabilních oblouků během dalších řezů. Přesto všechno jsou ale i nadále drátové řezačky velmi oblíbené v malých středních firmách, kde se s nimi pracuje zejména v sekci kusové výroby. Je zde velká záruka přesnosti rozměrů a poměrně kvalitní plochy, které jsou velmi potřebné pro budoucí činnost obrobene součásti.

6.1 Celkové náklady na řezání součásti

Celkové náklady jsou ovlivněny několika faktory. Ve strojírenském podniku se většinou rozděluje na dva typy nákladů. První náklady jsou pouze na zhotovení samotné součásti a druhý náklady zahrnují globální nastavení a výdaje celého podniku. Spadají tak do režijních nákladů, které se později přičítají k samotné výrobě. Nákladové položky související s výrobou součásti se vyjadřují v jednotkách nákladů za hodinu odvedené práce a to pomocí vztahu [44]:

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d + L_i}{Z \cdot E_{ef}} \quad [K\check{c} \cdot h^{-1}] \quad (4.5)$$

kde: S_f [Kč.h⁻¹] – mzda obsluhy, spotřeba náradí, energie,

C_s [Kč] – cena stroje,

N_i [Kč] – náklady na instalaci stroje,

N_d [Kč] – náklady na demontáž,

L_i [Kč] – likvidační hodnota,

Z [r] – doba životnosti,

E_{ef} [h] – efektivní časový fond stroje za rok.

V této kapitole se budou vyjadřovat náklady na drátovou řezačku Sodick AQ400 L a vrtačku pro startovací otvory SY-2030. Brousící proces z brusky BRH 20 A se zde započítávat nebude, jelikož nepatřil mezi hlavní účely obráběcích procesů. Vyjádřené veličiny ve vztahu (4.5) si daná firma střeží, ale podle firemní tabulky vychází

- drátová řezačka $N_{hs} = 900 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$,
- vrtačka pro startovací otvory $N_{hs} = 600 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$.

S těmito hodnotami se bude nadále pracovat ve výpočtu jednotkového času t_{mA} a t_{mB} pro každý stroj odděleně. Vyjádří se tak celková hodnota nákladů na výrobu součásti. Tato hodnota však nebude přesná, jelikož nebude počítat s režijními náklady, jelikož některé jsou v utajení a některé se odvíjí podle toho, k jakému distributorovi se firma obrací během údržby a oprav. Výroba byla teda pojata čistě jako experiment s charakterem kusové výroby, kde se zaměří zejména na jednotkové náklady a z nich vyjde konečné hodnocení.

Jednotkový čas

Celkový jednotkový čas t_{mA} se vztahuje pouze k jednotce výroby, zpravidla k jednomu kusu, který se obrobil v dané operaci. Tento čas se člení na [44]:

$$t_{mA} = t_{mA4} + t_{mA5} + t_{mA6} \quad [min] \quad (4.6)$$

kde: t_{mA4} [min] – jednotkový čas chodu stroje (řezný proces),
 t_{mA5} [min] – jednotkový čas klidu stroje (upínání a odepínání obrobku, příprava),
 t_{mA6} [min] – jednotkový čas interference stroje, (vícestrojová obsluha).

Interferenční čas zde není na místě jelikož se pracovalo na každém stroji zvlášť. To znamená, že čas $t_{mA6} = 0$. Platí tedy vztah:

$$t_{mA} = t_{mA4} + t_{mA5} \quad [min]$$

Tab. 4.12 Jednotkový čas .

	t_{mA4} [min]	t_{mA5} [min]
Drátová řezačka AQ 400L	101	25
Vrtačka SY - 2030	14,5	2

Dosadí-li se do vztahu (4.6), tak výsledný čas pro stroje vychází:

- jednotkový čas pro drátovou řezačku = $t_{mAD} = 25 + 101 = 126$ min
- jednotkový čas pro vrtačku = $t_{mAV} = 2 + 14,5 = 16,5$ min.

Dávkový čas

Celkový dávkový čas se vztahuje pouze k výrobní dávce d_v , která může obsahovat i několik kusů obrobků. Celkový dávkový čas se člení na [44]:

$$t_{mB} = t_{mB4} + t_{mB5} \quad [min] \quad (4.7)$$

kde: t_{mB4} [min] – dávkový čas chodu stroje (seřízení stroje, nastavení programu),
 t_{mB5} [min] – dávkový čas klidu stroje (prostudování výrobní dokumentace).

Tab. 4.13 Dávkový čas.

	t_{mB4} [min]	t_{mB5} [min]
Drátová řezačka AQ 400L	101	25
Vrtačka SY - 2030	14,5	2

Dávkový a jednotkový čas jsou si v tomto případě rovni, jelikož se jedná o výrobu pouze jedné součásti. V případě výroby více kusů by se tato čísla značně lišila. Platí tedy stejná hodnota vztahu a vychází:

- dávkový čas pro drátovou řezačku = $t_{mBD} = 25 + 101 = 126$ min
- dávkový čas pro vrtačku = $t_{mBV} = 2 + 14,5 = 16,5$ min.

Jednotkové nákladové položky

Vztahují se pouze k jednotkovému času a vyjadřuje se na základě závislosti [44]:

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} \quad [Kč.kS^{-1}] \quad (4.8)$$

kde: N_{hs} [Kč. ks⁻¹] – náklady na hodinu stroje,
 t_{mA} [min] – celkový jednotkový čas stroje.

Po dosazení do vztahu (4.8) platí pro oba stroje hodnota:

- Drátová řezačka

$$N_{ApsD} = \frac{900}{60} \cdot 126 = 1890 \text{ Kč.kS}^{-1}$$

- Vrtačka pro startovací otvory

$$N_{ApsV} = \frac{600}{60} \cdot 16,5 = 165 \text{ Kč.kS}^{-1}$$

Dávkové nákladové položky

Vztahují se pouze k dávkovým časům a vyjadřují se na základě vztahu [44]:

$$N_{Bps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot \frac{t_{mB}}{d_v} \quad [Kč. ks^{-1}] \quad (4.9)$$

kde: N_{hs} [Kč. ks⁻¹] – náklady na hodinu stroje,
 t_{mB} [min] – celkový dávkový čas stroje,
 d_v [ks] – celkový počet kusů.

Po dosazení do vztahu (4.9) platí pro oba stroje hodnota:

- Drátová řezačka

$$N_{BpsD} = \frac{900}{60} \cdot \frac{126}{1} = 1890 \text{ Kč. ks}^{-1}$$

- Vrtačka pro startovací otvory

$$N_{BpsV} = \frac{600}{60} \cdot \frac{16,5}{1} = 165 \text{ Kč. ks}^{-1}$$

Z předešlých výpočtů lze predikovat vztahy:

- $N_{BpsD} = N_{ApsD}$ – Drátová řezačka
- $N_{BpsV} = N_{ApsV}$ – Vrtačka pro startovací otvory

Operační náklady

Jedná se o součet dvou předchozích vztahů, které se dle literatury vyjadřují [44]:

$$N_{Op} = N_{Aps} + N_{Bps} + N_{Rps} \quad [Kč. ks^{-1}] \quad (4.10)$$

kde: N_{Aps} [Kč. ks⁻¹] – jednotkové náklady provozu stroje,
 N_{Bps} [Kč. ks⁻¹] – dávkové náklady provozu stroje,
 N_{Rps} [Kč. ks⁻¹] – režijní náklady provozu stroje.

Hodnotu N_{Rps} v tomto případě považujeme za nulovou, jelikož nebyly zjištěny potřebné vstupní veličiny z důvodu utajení. Zahrnují se zde veličiny typu režijní materiál, osvětlení, náklady na halu, náklady na dopravu atd. V oblasti výrobního podniku se však jedná o vysoká čísla. Obecně platí, že čím větší firma, tím se toto číslo zmenšuje, jelikož je zde zaručena větší sériovost výroby. V oblasti experimentů se většinou toto číslo zanedbává.

Po dosažení do vztahu (4.10) platí

- Drátová řezačka

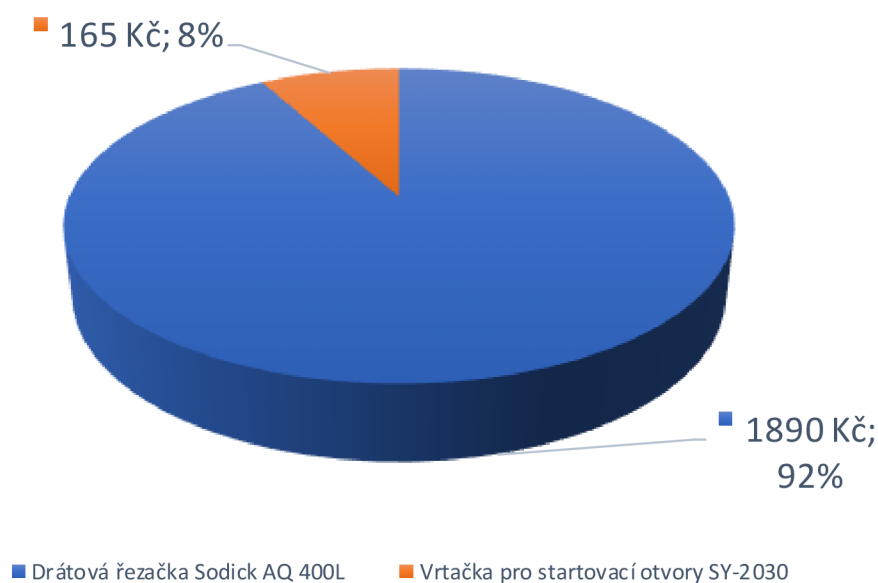
$$N_{OpD} = 1890 + 1890 = 3780 \text{ Kč} \cdot ks^{-1}$$

- Vrtačka pro startovací otvory

$$N_{OpV} = 165 + 165 = 330 \text{ Kč} \cdot ks^{-1}$$

Dávkový čas je sice možné dle rovnice (4.7) vyčíslit. Výroba vzorku proběhla však jako kusová výroba, proto není možné s dávkovým časem dále kalkulovat. Jedná se čistě o teoretickou záležitost, která nebude započítaná do celkových nákladů, v tomto případě kusové výroby. Proto bude vyhodnocen pouze jednotkový čas, ze kterého byly následně vyhodnoceny jednotkové nákladové položky. Tato čísla se v této práci dají považovat za konečná. Dále by se měly spočítat veličiny typu náklady na spotřebovaný materiál, náklady na dielektrickou kapalinu a její příslušenství, náklady na údržbu stroje apod. Součet těchto dalších veličin by mohl v konečné otázce navýšit operační náklady o několik stovek korun. Tyto předpoklady však nejsou zahrnuty, ale při konečné otázce, jak moc jsou vysoké náklady na elektroerozivní stroj, tento výsledek bohatě postačí. Konečné výsledky 1890 Kč a 165 Kč jsou za jednu součást poněkud vysoké, ale vezme-li se v potaz, že se jednalo o předem kalenou součást, tak výsledek není tak hrozný. Pokud by se výroba měla provádět na konvenčních strojích, tak by se musela provést před tepelným zpracováním a navíc kontury součásti jsou tak složité, že by bylo zapotřebí velké množství přípravků a nástrojů, aby byla zaručena rozměrová přesnost součásti. Co se týká samotné hodnoty jakosti povrchu, tak i zde by byl u konvenčních strojů velký problém dosáhnout požadované jakosti, jelikož z drátové řezačky je možné po dvou dokončovacích operacích dosáhnout hodnot v rozmezí $Ra\ 0,6 - 0,8\ \mu\text{m}$. Aby se tyto hodnoty dosáhly konvenčním způsobem, tak by bylo zapotřebí několik brusných operací, které by značně prodloužily délku výroby, a tím by se celkově zvětšily i samotné náklady.

Jednotkové nákladové položky



Obr. 4.24 Výšečový graf nákladových položek.

DISKUZE

Elektroerozivní procesy obrábění jsou perfektní způsoby, jak docílit mimořádných tvarů ještě v mimořádnější povrchové jakosti. Podmínka je zde jediná a to zaručení elektrické vodivosti. Dobrou elektrickou vodivostí musí disponovat obě strany, jak strana obráběcí, tak strana obráběná. To je jedna z velkých nevýhod s porovnáním obrábění pomocí plazmy nebo vodního paprsku. Další velkou nevýhodou jsou zde obráběcí časy, které v dnešní době, kdy je zapotřebí vyrobit, co možná nejvíce obrobků, v co nejkratší možné době, jsou zcela znevýhodněné. Takže se není čemu divit, že stroje typu drátových řezaček, hloubiček a děrovaček zmizely kompletně ze sériové výroby. Nic tomu nedodalo ani zefektivnění obrábění na CNC strojích, které dnes dosahují mimořádné rozměrové i povrchové kvality, díky 5-tiosému systému, který umožňuje nástroj natáčet v různých polohách. Zkracují se tím tak výrobní časy, kterým elektroerozivní stroje nemohou konkurovat. Ale i tak našly uplatnění zejména v kusové výrobě, kde neustále pokračují ve své činnosti. Jednou z nevýhod je, že zde musí být obsluha kvalifikovaná. Pouhé vyučení v kovoobráběcím nebo zámečnickém oboru zde nestačí a musí se absolvovat několik kurzů bezpečnosti práce, jelikož se zde pracuje s elektrickou energií, která v tomto případě může způsobit určité problémy, pokud se nezachová určitá opatření. Ale i tak se malým středním firmám vyplatí tyto stroje pořízovat, jelikož nejsou tak finančně nákladné jako lasery nebo plazmové řezačky. V kusové výrobě se pro elektroerozivní stroje našlo uplatnění při obrábění kalených součástí. Velká výhoda zde je, že se posílají polotovary na kalení ve formě polotovaru. Z nich je následně možnost vytvořit konečnou konturu součásti díky elektroerozivnímu procesu. Porovná-li se to s konvenční výrobou, tak zde se posílají součástky na tepelné zpracování až po hrubém opracování na soustruhu či frézce. Následně se pak daná součást dobrousí na magnetických nebo hrotových bruskách. Velký pozor se zde musí dát na přídavky, aby nebyly příliš malé, jelikož by po tepelném zpracování mohly být obrobky zkrouceny a celý obráběcí proces by byl k ničemu, jelikož by se nedodržely potřebné rozměry. U elektroerozivních drátových strojů je výhoda, že se obsluha přídavky moc zabývat nemusí. Každý elektroerozivní stroj je dnes většinou doplněn o ovládací panel a přes něj je propojen se softwarem počítače, na kterém obsluha nastavuje parametry typu obráběného materiálu, elektrické napětí, elektrický proud, počet řezných operací, řeznou rychlost apod. Většina těchto parametrů je nastavena už od výrobce a nedají se libovolně měnit. Toto nastavení v určitých fázích výroby může obsluhu stroje limitovat, takže se musí každá řezná operace řádně dopředu promyslet.

V této diplomové práci se vyráběl střížník, u kterého jsou jednotlivé plochy dokončeny s jiným počtem řezných dokončovacích operací. U ploch se vyhodnotila povrchová jakost a následně bylo zjištěno, že plocha se dvěma dokončovacími operacemi vychází nejlépe ze všech. Výsledek tedy vychází v rozporu s literaturou, ale po následném přezkoumání řezných podmínek a kontur vyšlo najevo, že se nejedná o žádnou chybu. V praxi se většinou nastavují tři dokončovací operace z důvodu rozměrové přesnosti. U poslední řezné operace je nastavena velká vybíjecí energie s velmi malou korekcí, což vyvolalo znehodnocení povrchu asi o desetinu mikrometru, což není velký rozdíl. Je však možné, že uvedená součást vyšla náhodně. Určitě by bylo lepší obrobit více těchto součástí a vytvořit statickou interpretaci, která by mohla uvedený výsledek diplomové práce potvrdit nebo vyvrátit. Velkou zajímavostí by bylo, kdyby se statisticky potvrdilo, že dvě dokončovací operace vychází z hlediska jakosti povrchu nejlépe. Velkou otázkou však zůstává, jak by na tom byla rozměrová přesnost. Pokud by se do rozměrové tolerance vešla, tak by stálo za to uvážit, jestli neřezat jen na dvě dokončovací operace. Samozřejmě také záleží na velikosti a tloušťce dané obráběcí součásti. I to by mohlo hrát velkou roli při jakosti povrchu. Jak je známo tak elektroerozivní obráběcí procesy trvají poměrně dlouhý čas, takže každá ušetřená minuta by určitě pomohla v konkurenci s ostatními typy obrábění zejména z energetického hlediska. Jak už bylo řečeno, tak by bylo zapotřebí udělat větší znalecký posudek, který by počet řezných operací vyřešil jednou provždy.

ZÁVĚR

Diplomová práce je řešena celkem ze 3 částí. První část řeší postavení elektroerozivního obrábění v průmyslovém odvětví a je zde popásán přehledný princip, jak daná problematika pracuje v činnosti. Druhý pohled je zaměřen na konkrétní druh obrábění pomocí drátové elektrody, která se řadí mezi velmi známe zástupce elektroerozivního procesu obrábění. Poslední část tvoří autorský návrh typického představitele pro drátové řezání a následná výroba. U vyrobené součásti je v této části kapitoly vyhodnocena povrchová jakost, tvrdost a jako poslední následuje technicko-ekonomické vyhodnocení:

- První část je zcela zaměřena na fyzikální vývoj elektroerozivního procesu. Je zde pospána přehledná minulost vývoje eroze a jeho zařazení do nekonvenční technologie obrábění. Dále tato část obsahuje jednotlivé pracovní podmínky a zdroje generátorů, který se používají. Závěr této části obsahují druhy dielektrických kapalin a druhy nástrojových elektrod, které se v praxi běžně používají.
- Druhá část práce je zaměřena konkrétně na elektroerozivní obrábění pomocí drátové elektrody WEDM. Krom samotného principu obrábění jsou zde popsány jednotlivé výhody a nevýhody, které tento typ obrábění obnáší. Závěr této části obsahuje strategie obrábění, které se dělí na dva způsoby razník-matrice a způsob stanovení tolerancí v praxi.
- Třetí část tvoří návrh typického představitele pro technologii drátového řezání. Jedná se o výrobu střížníku, na kterém byly jednotlivé plochy obráběny s jiným počtem dokončovacích operací. Návrh součásti byl vytvořen v programu Inventor Professional 2022 a zároveň převeden do SOLIDWORKS odkud po jednotlivých úpravách byl model exportován do programu ESPRIT, kde se určily startovací otvory a řezné hrubovací a dokončovací obrysy součásti. Vytvořil se G-kód, který se pomocí firemní sítě spároval s ovládacím panelem stroje Sodick AQ400L. Vybral se polotovar, který byl následně upnut a pomocí dotykové metody drátu byly zaznamenány jeho rozměry. Následovaly hrubovací a dokončovací řezy, ze kterých vyšel konečný obrys součásti. Dalším úkolem bylo vytvořit rozbor a analýzu jednotlivých ploch, které byly obráběny. Plochy byly měřeny pomocí metrologického přístroje Alicona a drsnoměru SJ-210. Všechny způsoby měření se prováděly v souladu s normou ISO 4287. Obsah měření určil povrch s nejlepší hodnotou jakosti, kterou činila plocha se dvěma dokončovacími operacemi. Závěrem byly vytvořeny grafy závislosti počtu dokončovacích operací na jakosti povrchu a jako poslední byla součást posouzena z technicko-ekonomického hlediska.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VIGNER, Miloslav a Zdeněk PŘIKRYL a kol. *Obrábění: Technický průvodce 61*. Praha: Nakladatelství technické literatury n.p., Spálená 51, 113 02 Praha 1, 1984.
 2. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012.
 3. *Nekonvenční metody obrábění: Elektrojiskrové řezání* [online]. Zlín, 2009, 1-8 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: https://coptel.cz/pluginfile.php/16439/mod_resource/content/1/10%20Nekonven%C4%8Dn%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD%281%29.pdf
 4. PRIESTELY, Joseph | English clergyman and scientist. *Encyclopedia Britannica*. Dostupné online: [Joseph Priestley | Biography, Discoveries, & Facts | Britannica](#) [cit. 2023-03-10]. (anglicky)
 5. Лазаренко, Борис Романович // Советская Молдавия: краткая энциклопедия / Вартичан И. К. — Кишинёв: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии, 1982. — С. 327. — 709 с.

Lazarenko, Boris Romanovič // Sovetskaya Moldaviya: kratkaya entsiklopediya / Vartichan I. K. — Kishinev: Glavnaya redakcie Moldavskoi sovetskogo entsiklopediya, 1982. S. 327. — 709 s.
 6. WRIGHT, Ian. *EDM 101: Electrical Discharge Machining Basics* [online]. 15.12.2017 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/edm-101-electrical-discharge-machining-basics>
 7. MIČIETOVÁ, Anna. *Progresívne technológie*. Žilina: Vydala Žilinská univerzita v Žiline, [2016]. ISBN 978-80-554-1288-7.
 8. JAMESON, Elman. *Electrical discharge machining*. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, Machining Technology Association, 2001, xii, 329 s. : il. ; 24 cm. ISBN 0-87263-521-X.
 9. HABOVŠTIAKOVÁ, Mária. *Elektroerozivní drátové řezání technické keramiky*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Karel Osička.
 10. *Co je ionizace: definice, funkce, metody a rysy* [online]. 24.3.2020 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://cs.puntomarinero.com/what-is-ionization-definition-functions/>
 11. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 2. vyd. Viena, 2000, 275 s. ISBN 8070994304.
 12. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění* : Skriptum FSI ČVUT. Vyd. 1. Praha : České vysoké učení technické, 1989. 122 s.
 13. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
-

-
14. *Měření drsnosti povrchu – Drsnoměry Profiloměry* [online]. Ostrava-Kunčičky, 17.10.2022 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/a/mereni-drsnosti-povrchu-drsnomery-profilomery>
 15. BEZDĚK, Stanislav. *Hloubení dutin zápusťek a forem* [online]. 17.12.2014, 1-7 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1401>
 16. *Elektroerozivní obrábění EDM (drátování, hloubení)* [online]. 2017 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.invocz.cz/elektroerozivni-obrabeni-edm-dratovani-hloubeni>
 17. BENEDICT, G. F. (1987). *Electrical discharge machining (EDM)*. Nontraditional Manufacturing Processes, Marcel Dekker, Inc, New York & Basel, 211-213.
 18. PURI, A.B. a B. BHATTACHARYYA. *An analysis and optimisation of the geometrical inaccuracy due to wire lag phenomenon in WEDM* [online]. Mechanical Engineering Department, NERIST, NIRJULI-791 109 Arunachal, Pradesh, India, 19 September 2001, 15 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550200158X?casa_token=w1jLtEsbnLsAAAAA:z2-oIzumtsQTO9gtqeQh13qZoavCN10E09zOAoAw5ArxgEvVmWIBjJwxD8Fc6OB1fM88blCsHHc
 19. TSAI, H.C, B.H YAN a F.Y HUANG. *EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes* [online]. Department of Mechanical Engineering, National Central University, 32054 Chung-Li, Taiwan, ROC, 4 July 2002, 10 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695502002389?casa_token=zAI-Z8Nv1UgAAAAA:SKB2i7mdmSjNiWwedY1WnZWwHzVs3yI002nSuYcok-DIhAN4Uou7Y5-k7iUbwtlvUxxPsA4f8BU
 20. G. Boothroyd, A.K. Winston, “*Non-conventional Machining Processes*”, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1989, p.491. Dostupné z: [Non-conventional machining processes | CiNii Research](https://www.researchgate.net/publication/260211111-Non-conventional_machining_processes)
 21. SOMMER, Carl. *Understanding Electrical Discharge Machining: Wire EDM. Complete EDM Handbook* [online]. 2012, 23-31 [cit. 2023-04-05]. Dostupné: https://reliableedm.com/Complete%20EDM%20Handbook/Complete%20EDM%20Handbook_1.pdf
 22. Bai, J.; Huang, H.; Lu, Z.; Feng, Y.; Guo, Y. Trajectory planning for the four axis WEDM machine and its implementation. In Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining, Shanghai, China, 19–23 April 2010
 23. Slătineanu L, Dodun O, Coteață M, Nagîț G, Băncescu IB, Hrițuc A. Wire Electrical Discharge Machining—A Review. *Machines*. 2020; 8(4):69. <https://doi.org/10.3390/machines8040069>
 24. *New edm wire is tough to break*: Moder machine shop. In: [online]. [cit. 2014-12-26]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/new-edm-wire-is-tough-to-break>
-

-
25. Chen, Zhi, Hongbing Zhou, Cheng Wu, Guojun Zhang, and Hongzhi Yan. 2022. "A New Wire Electrode for Improving the Machining Characteristics of High-Volume Fraction SiCp/Al Composite in WEDM" *Materials* 15, no. 12: 4098. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma15124098>
 26. TICHÝ, Štěpán. *Technologie drátové elektroeroze*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
 27. *WEDM elektroeroze: Trubičkové elektrody* [online]. Nové Město nad Metují, 2023 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.wedm.cz/spotrebni-material/trubickove-elektrody>
 28. HRABOVSKÝ, Viktor. *CZ TOP TRADE Váš partner při výrobě forem a nástrojů: Trubičkové elektrody* [online]. Vsetín, 2018 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <http://www.cztoptrade.cz/produkty/elektrody/trubickove.html>
 29. +GF+ AGIECHARMILLES. Cut 20 Cut 30 [online]. 2008 [vid. 2023-04-15]. Dostupné z: http://www.forefrontmachining.com/docs/GFAC_Cut%2020%2030%20Brochure.pdf
 30. SANCHEZ, J.A., J.L. RODIL, A. HERRERO, L.N. LOPEZ DE LACALLE a A.Limikiz. *On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting*. Faculty of Engineering of Bilbao, 2005, 1-7. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606008417?casa_token=qwwYbZ40ZEYAAAAA:dJbsGMrByp_MYq4sXdM3tcxa4icA_YF5rFsaWmpx2RIYYAHf4GRBvshhRK-fe7dMPrlkLecuyQ
 31. STRAKA, Luboslav a Ivan ČORNÝ. *Identification of geometric errors of circular profiles at WEDM caused by the wire tool electrode vibrations and their reduction with support of acoustic emission method* [online]. Faculty of Manufacturing Technologies of the Technical University of Košice, 14.4.2021, 1-8 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630722000140>
 32. *VKV HORÁK s.r.o.: Profil firmy* [online]. Brno, 2009 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <http://www.hortech.cz/cz/index.php>
 33. *TOOLSTEEL: 1.2080 / 19 436 / X210CR12 / D3* [online]. Kladno, 2019 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2080-x210cr12-19-436/>
 34. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
 35. ČSN 11343 – ocel obvyklých jakostí vhodná ke svařování. *CZ FERRO STEEL* [online]. 22.3.2011 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky3-11343.pdf>
 36. *Wire EDM* [online]. Camarillo, CA United States of America, 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.espricam.com/contact>
-

-
37. *Alicona G4 InfiniteFocus* [online]. University of Southampton, 2023 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/facilities/360/nCATS_facility/alicona.page
 38. *Dimensional accuracy & surface finish measurement: NEW: InfiniteFocusG6* [online]. Dr. Auner Straße 19 8074 Raaba/Graz, Austria, 2023 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/products/infinitefocus/>
 39. *Sodick AQ400L* [online]. Marseille (South of France), 2011 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.fr/pdf/sodick/aq400l/17580-272707-4.html>
 40. *MP nástrojárna: EDM vrtačka SY-2030* [online]. Úpice, 2008 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.mpnastrojarna.cz/cnc-stroje/edm-vrtacka-sy-2030/>
 41. *YWEST Obráběcí stroje: Bruska rovinná BRH 20 A* [online]. Přerov VI - Újezdec, 1999 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.ywest.cz/obrabeci-stroje/brusky/239-bruska-rovinna-brh-20-a>
 42. ČSN 41 9436. *Ocel 19 436 chromová: Česká technická norma (ČSN)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, Třídící znak 419436.
 43. *M & B Calibr, spol. s r.o.: Drsnoměr Surftest SJ-210 Mitutoyo 178-560-11D* [online]. Ivančice, 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://eshop.mbcaltibr.cz/meridla-drsnosti-povrchu/surfest-sj-210-mitutoyo-178-560-11d/>
 44. OSIČKA, Karel. *1. přednáška: Technologické a ekonomické aspekty provozu CNC obráběcích strojů*. Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, 2023, 1-8.
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
a	Pracovní jiskrová mezera	[mm]
C	Kapacita kondenzátoru	[F]
C _s	Cena stroje	[Kč]
D	Průměr požadovaného otvoru	[mm]
d	Průměr elektrody	[mm]
d _v	Počet dávek (kusů)	[ks]
E _{ef}	Efektivní časový fond stroje	[h]
F	Střížná síla	[N]
f	Frekvence	[Hz]
h	Výška dutiny	[mm]
I	Elektrický proud	[A]
I _{ef}	Efektivní hodnota elektrického proudu	[A]
I _{st}	Střední hodnota elektrického proudu	[A]
i	Proud elektrického výboje	[A]
K _n	Nabíjecí časová konstanta	[-]
k _a	Koeficient anody	[-]
k _c	Koeficient katody	[-]
L _i	Likvidační hodnota	[Kč]
l	Obvod stříhu	[mm]
l _r	Základní délka měření	[mm]
M	Hodnoty zmenšení rozměru elektrody	[mm]
N	Počet impulzů	[-]
N _{Aps}	Jednotkové nákladové položky	[Kč.ks ⁻¹]
N _{Bps}	Dávkové nákladové položky	[Kč.ks ⁻¹]
N _{ApsD}	Jednotkové nákladové položky pro drátovou řezačku	[Kč.ks ⁻¹]
N _{ApsV}	Jednotkové nákladové položky pro vrtačku startovacích otvorů	[Kč.ks ⁻¹]
N _{BpsD}	Dávkové nákladové položky pro drátovou řezačku	[Kč.ks ⁻¹]
N _{BpsV}	Dávkové nákladové položky pro vrtačku startovacích otvorů	[Kč.ks ⁻¹]
N _d	Náklady na demontáž stroje	[Kč]
N _{hs}	Náklady na hodinu stroje	[Kč.h ⁻¹]
N _i	Náklady na instalaci stroje	[Kč]
N _{Op}	Operační náklady	[Kč.ks ⁻¹]
N _{OpD}	Operační náklady pro drátovou řezačku	[Kč.ks ⁻¹]
N _{OpV}	Operační náklady pro vrtačku startovacích otvorů	[Kč.ks ⁻¹]
N _{Rps}	Režijní náklady na provoz stroje	[Kč.ks ⁻¹]
n	Četnost impulzů za danou časovou jednotku	[s ⁻¹]
n	Součinitel otupení	[-]
R	Rezistor (elektrický odpor)	[Ω]
R _a	Průměrná aritmetický úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R _Z	Největší výška posuzovaného profilu	[μm]
R _{max}	Maximální výška posuzovaného profilu součásti	[μm]
R _{Sm}	Průměrná šířka prvků profilu	[mm]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Mez kluzu	[MPa]
r	Poloměr dutiny	[mm]
S	Plocha stříhu	[mm ²]
S _a	Průměrná aritmetická úchylka povrchu součásti	[μm]

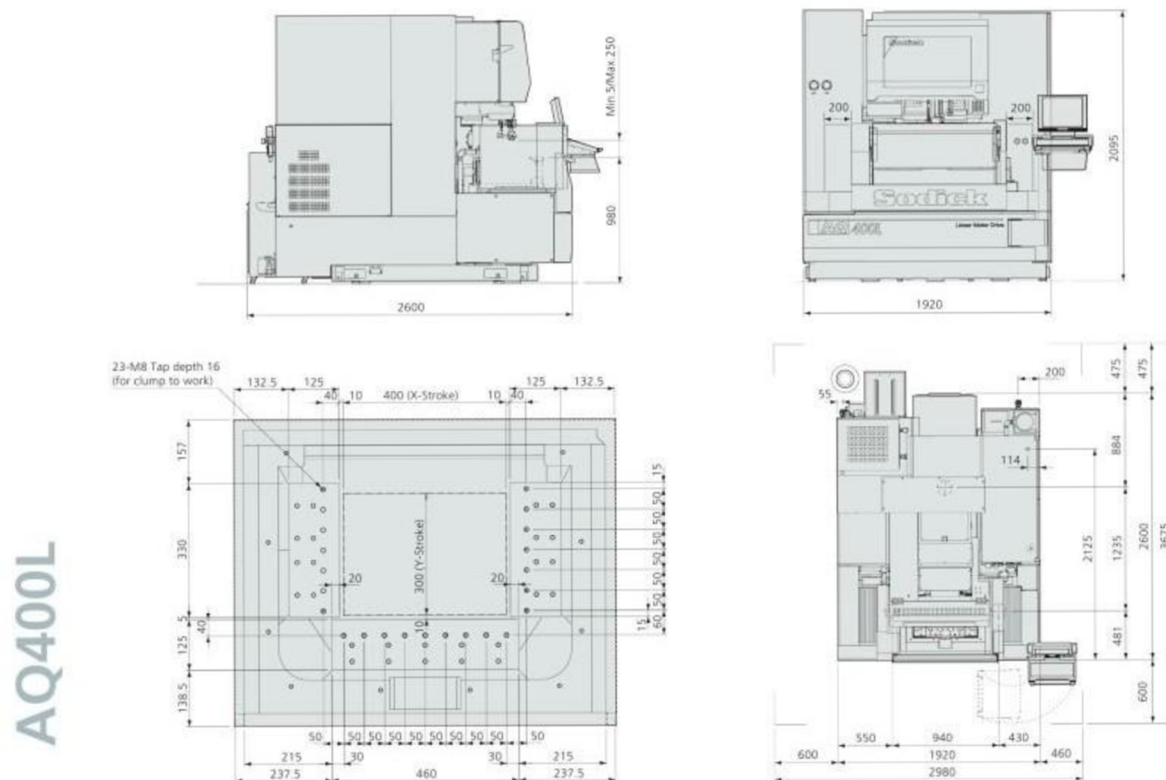
Označení	Legenda	Jednotka
Sq	Průměrná kvadratická úchylka povrchu součásti	[μm]
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	[μm]
Sf	Mzda obsluhy, spotřeba náradí, energie	[Kč.h ⁻¹]
T	Teplota	[°C]
T	Čas jedné celé periody	[s]
T	Toleranční oblast	[mm]
T _{KM}	Kontrolní body pro měření toleranční oblasti	[-]
t	Tloušťka výstřižku	[mm]
t	Čas elektroerozivního procesu	[s]
t _{mA}	Celý jednotkový čas	[min]
t _{mA4}	Jednotkový čas chodu stroje	[min]
t _{mA5}	Jednotkový čas klidu stroje	[min]
t _{mA6}	Jednotkový čas interference stroje	[min]
t _{mAD}	Celý jednotkový čas drátové řezačky	[min]
t _{mAV}	Celý jednotkový čas vrtačky startovacích otvorů	[min]
t _{mB}	Celý dávkový čas	[min]
t _{mB4}	Dávkový čas chodu stroje	[min]
t _{mB5}	Dávkový čas klidu stroje	[min]
t _{mBD}	Celkový jednotkový čas drátové řezačky	[min]
t _{mBV}	Celkový jednotkový čas vrtačky pro startovací otvory	[min]
U	Elektrické napětí	[V]
U _c	Elektrické napětí na kondenzátoru	[V]
U _{ef}	Efektivní elektrické napětí	[V]
U _{st}	Střední hodnota elektrického napětí	[V]
u	Napětí výboje	[V]
Ú	Úběr materiálu v závislosti na druhu dielektrika	[g.min ⁻¹]
V _{ia}	Objem odebraného materiálu na anodě	[mm ³]
V _{ic}	Objem odebraného materiálu na katodě	[mm ³]
V _n	Množství odebraného materiálu z elektrody	[mm ³ .min ⁻¹]
V _o	Množství odebraného materiálu z obrobku	[mm ³ .min ⁻¹]
W _c	Nahromaděná energie na kondenzátoru	[J]
W _i	Velikost vybíjecí energie	[J]
W _{st}	Střední energie v době celé jedné periody	[J]
W _{im,st}	Střední hodnota energie jednotlivého impulzu	[J]
Z	Doba životnosti	[rok]
z	Tloušťka narušeného povrchu	[mm]
η _d	Účinnost elektrického výboje	[-]
γ	Množství a velikost odebraného materiálu	[%]
τ	Doba jedné periody	[s]
τ _s	Střížný odpor	[MPa]
σ	Mez kluzu	[MPa]
λ _c	Filtr pro odstranění dlouhovlnných složek	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
2D	Dvourozměrný prostor
3D	Třírozměrný prostor
AC	Alternating Current (Střídavý proud)
B	Báze u tranzistoru
C	Kondenzátor
CAD	Computer Aided Design (Počítačem podporované projektování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Počítačová podpora obrábění)
CCD	Charge-Coupled Device (Zařízení s vázanými náboji)
CNC	Computer Numeric Control (Počítačem číslicové řízení výroby)
D	Dioda
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
E	Emitor u tranzistoru
EBW	Electron Beam Welding (Svařování svazkem elektronů)
EDG	Electrical Discharge Grinding (Elektroerozivní broušení)
EDM	Electrical Discharge Machining (Elektroerozivní obrábění)
G	Generátor
GAP	Pracovní jiskrová mezera
HB	Tvrdost dle Brinella
HRC	Tvrdost dle Rockwella
ISO	International Organization of Standardization
K	Kolektor u tranzistoru
LCD	Liquid-crystal display (Displej z tekutých krystalů)
M	Třífázový elektromotor
NC	Numeric Control (Číslicové řízení výroby)
PAW	Plasma arc welding (Svařování plasmou)
QMS	Quality management systém (Systém řízení jakosti)
RC	Oscilační elektrický obvod s odporem a kondenzátorem
RLC	Oscilační elektrický obvod s odporem, kondenzátorem a cívkou
RGB	Red, Green and Blue colors (Barevný model červená, zelená a modrá)
SK	Slinutý karbid
U	Pracovní pohon osy horního vedení drátu ve směru U
USA	United States of America (Spojené státy americké)
V	Pracovní pohon osy horního vedení drátu ve směru V
WC	Karbid wolframu
X	Pracovní pohon osy pracovního stolu ve směru X
Y	Pracovní pohon osy pracovního stolu ve směru Y
Z	Pracovní pohon osy pracovního stolu ve směru Z

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Technický list drátová řezačka AQ400L
 - Příloha 2 Q-kód vyrobené součásti (střížník)
 - Příloha 3 Nastavení korekce
 - Příloha 4 Jakost povrchu Plocha 1
 - Příloha 5 Jakost povrchu Plocha 2
 - Příloha 6 Jakost povrchu Plocha 3
 - Příloha 7 Jakost povrchu Hrubovaná plocha
-



Caractéristique AQ400L/AQ600L

Caractéristique de la Machine	AQ400L	AQ600L
Course des axes X x Y x Z (mm)	400 x 300 x 250	600 x 400 x 300
Course des axes U x V (mm)	80 x 80	80 x 80
Angle de dépouille (hauteur de 80mm)	±20°	±20°
Dimensions Max. pièce (mm)	590 x 450 x 250	790 x 550 x 300
Poids Max. pièce (kg)	550	930
Dimensions du bac (mm)	935 x 770	1,135 x 890
Diamètre fil (mm)	0.10-0.30*	0.10-0.30*
Dimensions machine (mm)	1,920 x 2,600 x 2,095	2,400 x 2,930 x 2,185
Espace au sol (mm)	2,980 x 3,675	3,350 x 4,005
Poids machine (kg)	4,300	4,830

* 1 Le circuit HTP est nécessaire pour utiliser le fil de 0.10 mm

Caractéristiques	AQ400L	AQ600L
Moteurs linéaires	●	●
Règles de mesure Absolue	●	●
Contrôleurs d'axes Sodick K-SMC	●	●
Éléments céramiques	●	●
Enfilage automatique super Jet AWT	●	●
Tension du fil motorisé	●	●
Générateur anti-électrolyse	●	●
Groupe froid pour diélectrique	●	●
Ecran tactile	●	●
Bâti rigide en fonte Méhanite	●	●
Connexion LAN	●	●
UPS	●	●
S-PIKA-W	▲	▲
LN20W 8 axes	▲	▲
Taper Flex	□	□
Support grosses Bobines	□	□
Hache fil L-Cut	□	□
Axe B / indexeur	□	□
Circuit HTP	□	□

● Standard ▲ Option Usine □ Option

(Search Data : AQ400L_ws,Water,d0.25,Brass,Steel,20mm,Punch,Open-U,3.1 - 6.0umRy);

(ON OFF IP HRP MAO SV V SF C PIK CTRL WK WT WS WP PC SK);

C001 = 014 013 2215 000 242 +030.0 8.0 0080 0 000 0000 025 160 130 050 0000 00;

C002 = 002 011 2215 000 000 +053.0 5.0 1065 0 000 0000 025 180 130 140 0000 00;

C003 = 001 014 2210 000 000 +042.0 2.0 1066 0 000 0000 025 180 130 240 0000 00;

C004 = 015 014 0515 000 000 +016.0 0.0 1097 0 000 0000 025 180 130 240 0000 00;

C006 = 014 013 2215 000 242 +030.0 8.0 0080 0 000 0000 025 160 130 055 0000 00;

C007 = 002 023 2215 000 750 +053.0 8.0 6080 0 000 0000 025 160 130 012 0000 00;

C908 = 000 001 1015 000 000 +030.0 7.0 7050 0 008 0000 025 160 130 012 0000 00;

H000 = +000000.010000;

H001 = +000000.000000;

H002 = +000000.000000;

H003 = +000000.000000;

H004 = +000000.000000;

H006 = +000000.000000;

H007 = +000000.000000;

H008 = +000000.000000;

H999 = +000000.000000 (Taper Offset);

TP0.0;

TN20.0;

G90;

;

G00 X-9.0 Y-63.0 U0.0 V0.0;

T91;

;

QAIC(2,1,0.1250,000.5,0.1650,0.0200,008.0,0017,0052,15,035);

SFCC10070020;

G348;

(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);

T94;

T84;

(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);

C001;

G01 X-3.13 Y-59.23;

X-3.63;

X-35.63;

X-36.13;

G40 G01 X-35.6353 Y-59.0729;
T85;
G149 G249;
G349;
;
SFCC10070020;
G149 G249 G348 G448 G548 G648 G748;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
(Dokončení PRIMÁRNÍ REZ [1]);
C002;
G01 X-36.13 Y-59.16;
X-35.63;
X-3.63;
X-3.13;
G40 G01 X-3.5432 Y-59.2816;
;
SFCC10070020;
G149 G249 G349 G449 G549 G649 G749;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
(Dokončení PRIMÁRNÍ REZ [2]);
C003;
G01 X-3.13 Y-59.14;
X-3.63;
X-35.63;
X-36.13;
G40 G01 X-35.6353 Y-59.0729;
;
SFCC10070020;
G149 G249 G349 G449 G549 G649 G749;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
(Dokončení PRIMÁRNÍ REZ [3]);
C004;
G01 X-36.13 Y-59.129;
X-35.63;
X-3.63;
X-3.13;
G40 G01 X-3.9564 Y-59.5631;

G349 G449 G549 G649 G749;
;
T90;
M03;
G00 X-35.0 Y-66.0 U0.0 V0.0;
T91;
;
H999 = +000000.002000 (Taper Offset);
QAIC(2,1,0.1250,000.5,0.1650,0.0200,008.0,0017,0052,15,035);
SFCC00070020;
G348;
SFCC00070020;
BSAH999 (Taper Offset comp);
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
T84;
(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);
C006;
G01 X-35.661 Y-59.5434;
X-35.832 Y-59.0735;
X-40.832 Y-45.3361;
X-41.003 Y-44.8663;
G40 G01 X-40.6691 Y-45.275;
T85;
G149 G249;
G349;
;
SFCC00070020;
G149 G249 G348 G448 G548 G648 G748;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
(Dokončení PRIMÁRNÍ REZ [1]);
C007;
G01 X-40.942 Y-44.8441;
X-40.771 Y-45.3139;
X-35.771 Y-59.0513;
X-35.5999 Y-59.5211;
G40 G01 X-35.4239 Y-59.9686;
;
SFCC00070020;
G149 G249 G349 G449 G549 G649 G749;

(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
(Dokončení PRIMÁRNÍ REZ [2]);
C908;
G01 X-35.5811 Y-59.5143;
X-35.7522 Y-59.0445;
X-40.7522 Y-45.3071;
X-40.9232 Y-44.8372;
G40 G01 X-40.5372 Y-45.7573;
G349 G449 G549 G649 G749;
;
T90;
M03;
G00 X-43.63 Y-35.0 U0.0 V0.0;
T91;
;
QAIC(2,1,0.1250,000.5,0.1650,0.0200,008.0,0017,0052,15,035);
SFCC00070020;
G348;
SFCC00070020;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
T84;
(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);
C006;
G01 X-43.845 Y-33.7929;
Y-33.2929;
Y-8.2929;
Y-7.7929;
G40 G01 X-43.63 Y-8.2929;
T85;
G149 G249;
G349;
;
SFCC00070020;
G149 G249 G348 G448 G548 G648 G748;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
(Dokončení PRIMÁRNÍ REZ [1]);
C007;
G01 X-43.78 Y-7.7929;
Y-8.2929;

```
Y-33.2929;
Y-33.7929;
G40 G01 X-43.63 Y-34.7929;
G349 G449 G549 G649 G749;
;
T90;
M03;
G00 X-43.63 Y-6.0 U0.0 V0.0;
T91;
;
H999 = +000000.000000 ( Taper Offset );
QAIC(2,1,0.1250,000.5,0.1650,0.0200,008.0,0017,0052,15,035);
SFCC10070020;
G348;
SFCC10070020;
BSAH999 ( Taper Offset comp );
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
T84;
(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);
C001;
G01 X-44.13 Y-8.1129;
X-43.63;
X-40.81;
Y-4.2929;
Y-3.7929;
G40 G01 X-41.4355 Y-4.3855;
T85;
;
T90;
M03;
G00 X-43.63 Y-45.0 U0.0 V0.0;
T91;
;
SFCC10070020;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
T84;
(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);
C001;
G01 X-40.81 Y-45.7626;
```

Y-45.2626;
Y-33.4729;
X-43.63;
X-44.13;
G40 G01 X-44.0873 Y-34.292;
T85;
;
T90;
M03;
G00 X-9.0 Y-63.0 U0.0 V0.0;
T91;
;
SFCC10070020;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
T84;
(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);
C001;
G01 X-3.45 Y-59.5;
Y-59.0;
Y-50.9683;
X-20.504 Y-4.1129;
X-40.13;
M00;
X-40.63;
X-41.13;
G40 G01 X-40.6499 Y-5.1701;
T85;
;
T90;
M03;
G00 X-47.76 Y-70.5 U0.0 V0.0;
T91;
;
SFCC10070020;
(SolidWire - 2 osá kontura : SODICK);
T84;
(Hrubování PRIMÁRNÍ REZ);
C001;
G01 X-47.76 Y-70.18;

X-47.26;
X0.0;
X0.5;
G40 G01 X0.5 Y-71.0;
T85;
G349;
G149 G249;
T83;
M02;

Plocha 1

E EDM Technologie: Sodick
✕

Databáze
 Uživatelská databáze Reset

Technologická řada

Řídicí systém: LN1WS / LQ1-33WS / LP

Stroj: AQ400L_ws ✎

Jednotky: Milimetry

Materiálové a pracovní data

Kapalina obrábění: Water ✎

Průměr drátu: 0.25 ✎

Materiál drátu: Brass ✎

Materiál polotovaru: Steel ✎

Tloušťka materiálu: 20.0 ✎

Typ obrábění: Punch ✎

Pozice trysky: Open-U ✎

Rozsah dokončování: 3.1 - 6.0

Strategie obrábění

Strategie: Hrubování a 1 začišť ✎

	Ofset	✎
Počátek	0.01000	
Hrubování	0.21500	
Vrstva #1	0.15000	
Vrstva #2		
Vrstva #3		
Vrstva #4		
Vrstva #5		
Vrstva #6		
Vrstva #7		
Vrstva #8		
Vrstva #9		

Průměrná rychlost

Posuv: 2.05101

3 průchody nebo více ✎

	High Precision									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Přesnost										
Průměrná rychlost	1.25					2.05				
Dokončení plochy (Ry)	5.0					3.8				
Počet průchodů	4					3				

Výstup AIC: Ano ✎

Výstup SFCC: Ano ✎

Zobrazit data obrábění

Výjezd z matrice a rázníku

Nájezd: 0.000000

OK
Storno
Nápověda

Plocha 2

EDM Technologie: Sodick

Databáze
 Uživatelská databáze

Technologická řada
 Řídicí systém LN1WS / LQ1-33WS / LP
 Stroj AQ400L_ws
 Jednotky Milimetry

Materiálové a pracovní data
 Kapalína obrábění Water
 Průměr drátu 0.25
 Materiál drátu Brass
 Materiál polotovaru Steel
 Tloušťka materiálu 20.0
 Typ obrábění Punch
 Pozice trysky Open-U
 Rozsah dokončování 3.1 - 6.0

Strategie obrábění
 Strategie Hrubování a 2 začišť

	Ofset
Počátek	0.01000
Hrubování	0.21500
Vrstva #1	0.15000
Vrstva #2	0.13000
Vrstva #3	
Vrstva #4	
Vrstva #5	
Vrstva #6	
Vrstva #7	
Vrstva #8	
Vrstva #9	

Průměrná rychlost
 Posuv 2.05101

3 průchody nebo více

	High Precision									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Přesnost										
Průměrná rychlost	1.25					2.05				
Dokončení plochy (Ry)	5.0					3.8				
Počet průchodů	4					3				

Výstup AIC Ano
 Výstup SFCC Ano

Výjezd z matrice a rázníku
 Nájezd 0.000000

Zobrazit data obrábění

Plocha 3

EDM Technologie: Sodick

Databáze
 Uživatelská databáze

Technologická řada
 Řídicí systém LN1WS / LQ1-33WS / LP
 Stroj AQ400L_ws
 Jednotky Milimetry

Materiálové a pracovní data
 Kapalina obrábění Water
 Průměr drátu 0.25
 Materiál drátu Brass
 Materiál polotovaru Steel
 Tloušťka materiálu 20.0
 Typ obrábění Punch
 Pozice trysky Open-U
 Rozsah dokončování 3.1 - 6.0

Strategie obrábění
 Strategie Hrubování a 3 začíst

	Ofset
Počátek	0.01000
Hrubování	0.23000
Vrstva #1	0.16000
Vrstva #2	0.14000
Vrstva #3	0.12900
Vrstva #4	
Vrstva #5	
Vrstva #6	
Vrstva #7	
Vrstva #8	
Vrstva #9	

Průměrná rychlost
 Posuv 1.251

3 průchody nebo více

	High Precision									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Přesnost										
Průměrná rychlost	1.25					2.05				
Dokončení plochy (Ry)	5.0					3.8				
Počet průchodů	4					3				

Výstup AIC Ano
 Výstup SFCC Ano

Výjezd z matrice a rázníku
 Nájezd 0.000000

Zobrazit data obrábění

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

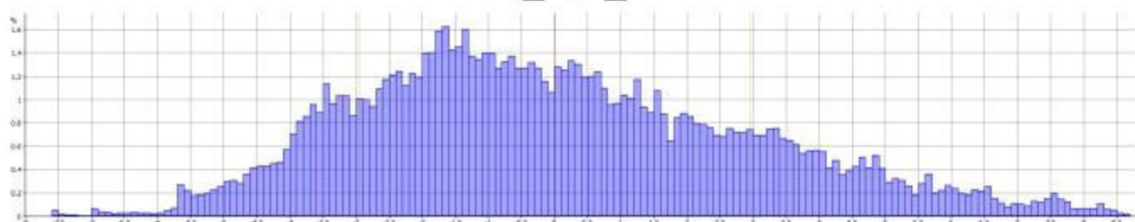


Measurement Report

Profile Roughness Measurement

Parameters of Roughness Profile

3_20x_1



Histogram Settings

Number of Classes: 163
 Minimum Value: -7.599 μm
 Maximum Value: 8.701 μm
 Class Width: 0.100 μm

Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	26216		Number of data values
Classes	163		Number of histogram classes
Mean Value	0.011	μm	Mean value of data values
Standard Deviation	2.950	μm	Mean Value of standard deviation

Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	2.391	μm	Average roughness of profile
Rq	2.950	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	16.246	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	14.634	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	16.088	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	8.648	μm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	7.599	μm	Maximum valley height of roughness profile
Re	8.234	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile

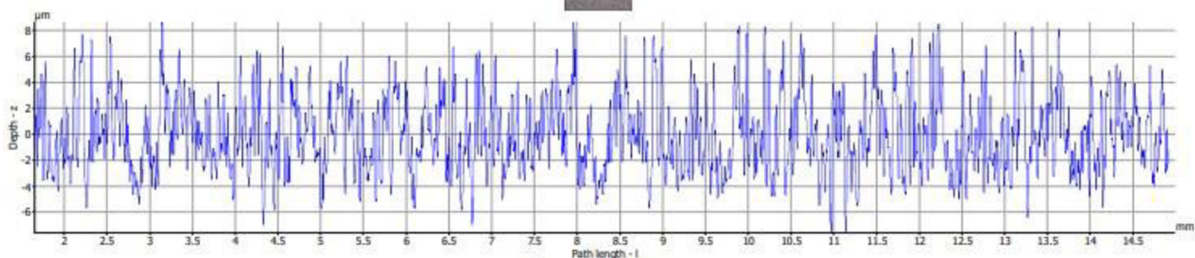
Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

aliconona

Measurement Report

Profile Measurement

3_20x_1



Ra: 2.391µm
 Rq: 2.950µm
 Rz: 14.634µm

Filter: high pass - roughness profile
 Lc:= 2.500mm

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

aliconona

Name	Value	Unit	Description
Rsm	106.547	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	0.438		Skewness of roughness profile
Rku	2.755		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.312		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.110		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (>=1), higher values represent larger scratches/peaks
l	16.568	mm	Profile Length
Lc	2.500	mm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

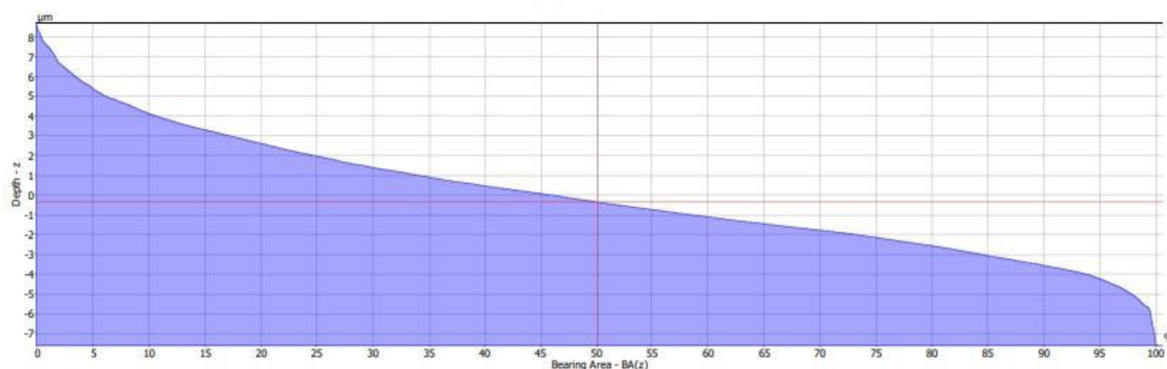
Profile Measurement

Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve

of Roughness Profile

$L_c = 2.500\text{mm}$

3_20x_1



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = -0.344\mu\text{m}$

Name	Value	Unit	Description
Rk	7.536	µm	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	3.371	µm	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	1.778	µm	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	13.780	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	94.230	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
l	16.568	mm	Profile Length
Lc	2.500	mm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz



Measurement Report

Profile Roughness Measurement

Parameters of Roughness Profile

2a_20x



Histogram Settings

Number of Classes: 187
 Minimum Value: -1.344 μm
 Maximum Value: 2.396 μm
 Class Width: 0.020 μm

Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	6554		Number of data values
Classes	187		Number of histogram classes
Mean Value	-0.000	μm	Mean value of data values
Standard Deviation	0.446	μm	Mean Value of standard deviation

Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	0.348	μm	Average roughness of profile
Rq	0.446	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	3.738	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	2.568	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	3.738	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	2.395	μm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	1.344	μm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	1.422	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile

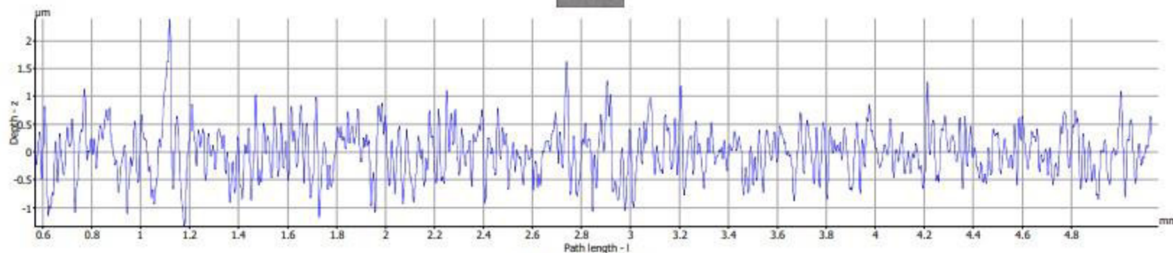
Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

Profile Measurement

2a_20x



Ra: 0.348µm
 Rq: 0.446µm
 Rz: 2.568µm

Filter: high pass - roughness profile
 Lc:= 800.000µm

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Name	Value	Unit	Description
Rsm	67.922	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	0.303		Skewness of roughness profile
Rku	4.151		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.079		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.456		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (>=1), higher values represent larger scratches/peaks
l	5.698	mm	Profile Length
Lc	800.000	µm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

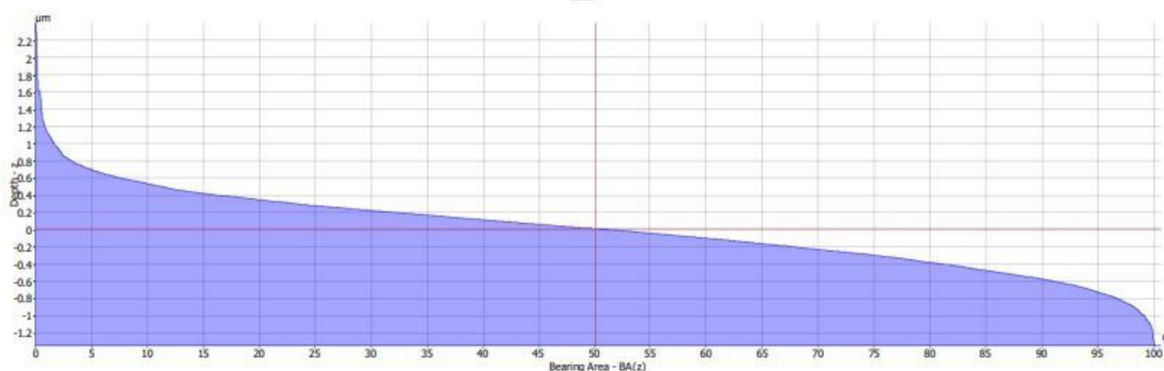
Profile Measurement

Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve

of Roughness Profile

$L_c = 800.000\mu\text{m}$

2a_20x



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = 0.012\mu\text{m}$

Name	Value	Unit	Description
Rk	1.090	μm	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	0.527	μm	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	0.386	μm	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	9.510	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	88.360	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
l	5.698	mm	Profile Length
Lc	800.000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

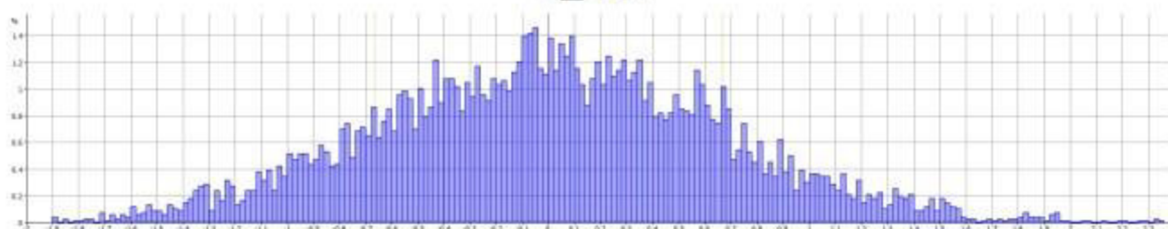


Measurement Report

ProfileRoughnessMeasurement

Parameters of Roughness Profile

2_20x



Histogram Settings

Number of Classes: 213
 Minimum Value: -1.901 μm
 Maximum Value: 2.359 μm
 Class Width: 0.020 μm

Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	6554		Number of data values
Classes	213		Number of histogram classes
Mean Value	0.002	μm	Mean value of data values
Standard Deviation	0.666	μm	Mean Value of standard deviation

Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	0.531	μm	Average roughness of profile
Rq	0.666	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	4.254	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	3.523	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	4.071	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	2.353	μm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	1.901	μm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	2.048	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile

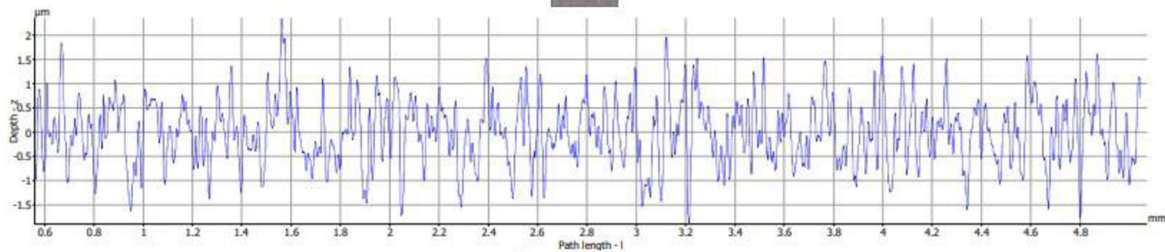
Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

Profile Measurement

2_20x



Ra: 0.531µm
 Rq: 0.666µm
 Rz: 3.523µm

Filter: high pass - roughness profile
 Lc:= 800.000µm

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Name	Value	Unit	Description
Rsm	72.325	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	0.100		Skewness of roughness profile
Rku	2.930		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.100		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.207		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (>=1), higher values represent larger scratches/peaks
l	5.605	mm	Profile Length
Lc	800.000	µm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

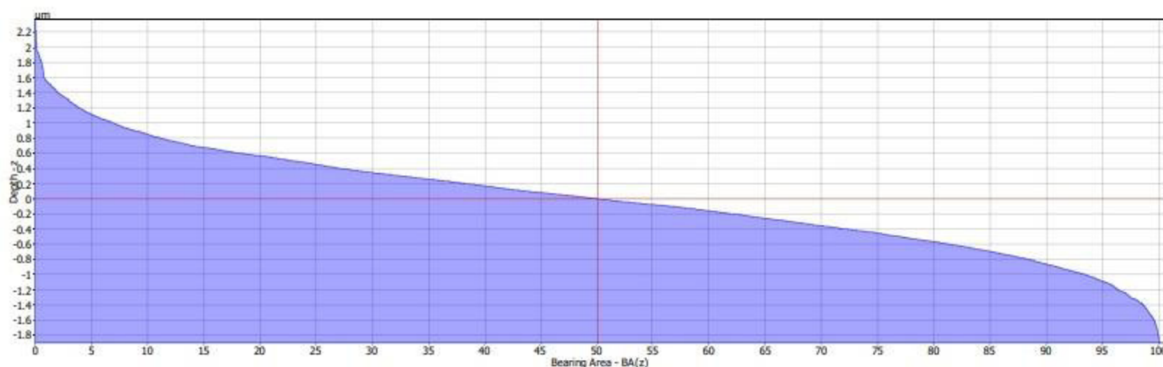
Profile Measurement

Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve

of Roughness Profile

$L_c = 800.000\mu\text{m}$

2_20x



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = 0.002\mu\text{m}$

Name	Value	Unit	Description
Rk	1.739	μm	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	0.679	μm	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	0.564	μm	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	9.640	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	90.150	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
l	5.605	mm	Profile Length
Lc	800.000	μm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz



Measurement Report

Profile Roughness Measurement

Parameters of Roughness Profile

4a_20x



Histogram Settings

Number of Classes: 140
 Minimum Value: -14.471 μm
 Maximum Value: 13.529 μm
 Class Width: 0.200 μm

Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	26216		Number of data values
Classes	140		Number of histogram classes
Mean Value	-0.033	μm	Mean value of data values
Standard Deviation	4.191	μm	Mean Value of standard deviation

Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	3.244	μm	Average roughness of profile
Rq	4.191	μm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	27.814	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	24.253	μm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	26.804	μm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	13.343	μm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	14.471	μm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	12.619	μm	Mean height of profile irregularities of roughness profile

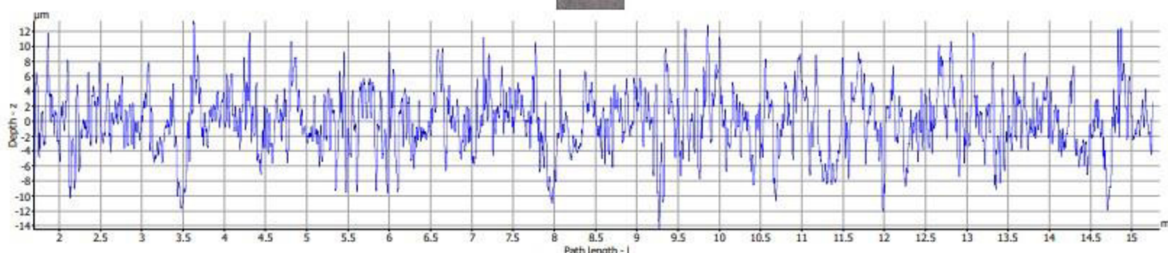
Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz



Measurement Report

Profile Measurement

4a_20x



Ra: 3.244µm
 Rq: 4.191µm
 Rz: 24.253µm

Filter: high pass - roughness profile
 Lc:= 2.500mm

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz



Name	Value	Unit	Description
Rsm	169.222	µm	Mean spacing of profile irregularities of roughness profile
Rsk	-0.032		Skewness of roughness profile
Rku	3.318		Kurtosis of roughness profile
Rdq	0.397		Root-Mean-Square slope of roughness profile
Rt/Rz	1.147		Extreme Scratch/Peak value of roughness profile, (>=1), higher values represent larger scratches/peaks
l	16.952	mm	Profile Length
Lc	2.500	mm	LambdaC: cut off wavelength

Alicona Imaging GmbH
 Dr.-Auner Strasse 21a
 A-8074 Raaba/Graz

alicona

Measurement Report

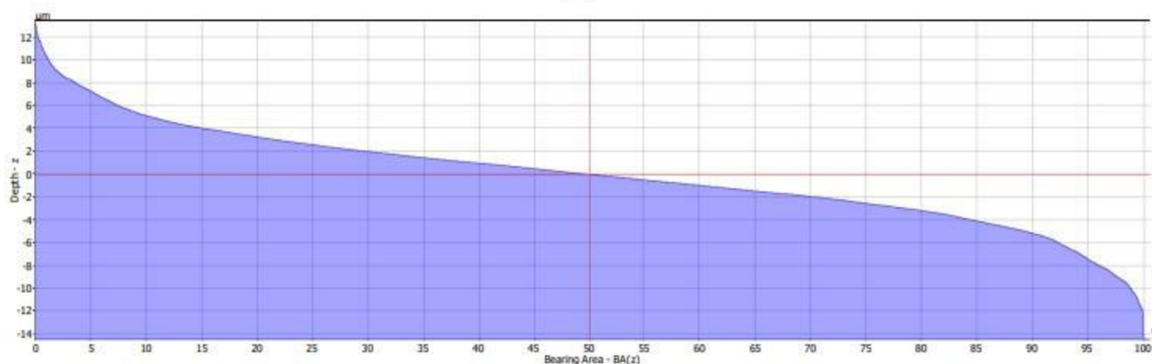
Profile Measurement

Bearing Ratio/Firestone-Abbott Curve

of Roughness Profile

$L_c = 2.500\text{mm}$

4a_20x



Measurement line

$BA(z) = 50.000\%$

$z = -0.048\mu\text{m}$

Name	Value	Unit	Description
Rk	9.781	µm	Core roughness depth, Height of the core material
Rpk	4.938	µm	Reduced peak height, mean height of the peaks above the core material
Rvk	4.996	µm	Reduced valley height, mean depth of the valleys below the core material
Rmr1	10.850	%	Peak material component, the fraction of the surface which consists of peaks above the core material
Rmr2	88.770	%	Peak material component, the fraction of the surface which will carry the load
l	16.952	mm	Profile Length
Lc	2.500	mm	LambdaC: cut off wavelength