



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## APLIKACE DRÁTOVÉ ELEKTROEROZE PŘI VÝROBĚ OHYBNÍKŮ

APPLICATION OF WIRE ELECTRO DISCHARGE MACHINING IN THE  
MANUFACTURE OF PUNCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Bohumír Zlatuška

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Bohumír Zlatuška

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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:

**Aplikace drátové elektroeroze při výrobě ohybníků**

v anglickém jazyce:

**Application of wire electro discharge machining in the manufacture of punch**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikace nekonvenční technologie drátové elektroeroze při výrobě ohybníků se zaměřením na efektivní využití elektroerozivních strojů při výrobě součástí podobného charakteru.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Fyzikální princip elektroeroze.

Rozbor součástkové základny.

Technologičnost konstrukce jednotlivých součástek.

Řešení technologického postupu a NC programu pro vybraného představitele.

Vyhodnocení možnosti řídicího software Peps.

Technicko-ekonomické zhodnocení.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.

KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

JUROVÁ, Marie. Řízení výroby I, Část 1. 2. přepracované a doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, 81 s. ISBN 80-214-3066-4.

JUROVÁ, Marie. Řízení výroby I, Část 2. 2. přepracované a doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, 138 s. ISBN 80-214-3134-2.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá aplikací nekonvenční technologie drátové elektroeroze při výrobě ohybníků se zaměřením na efektivní využití elektroerozivních strojů při výrobě součástí podobného charakteru.

**Klíčová slova**

Nekonvenční technologie, WEDM, PEPS, ohybník, AGIE....

**ABSTRACT**

Diploma thesis deals with the application of unconventional technologies of wire electro discharge machining in the production in the manufacture of punch with a focus on effective use of EDM machines for the manufacture of components with the similar character.

**Key words**

Unconventional technologies, WEDM, PEPS, punch, AGIE ...

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZLATUŠKA, B. *Aplikace drátové elektroeroze při výrobě ohybníků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 104 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace drátové elektroeroze při výrobě ohybníků** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Bc. Bohumír Zlatuška

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za odborné vedení a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům firmy Eberhard s.r.o. v Jihlavě za umožnění zpracování této diplomové práce na firemním poli. Nemalé díky patří samozřejmě i mým blízkým za podporu v mých studiích.

## OBSAH

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| ABSTRAKT .....                                                      | 4  |
| PROHLÁŠENÍ.....                                                     | 5  |
| PODĚKOVÁNÍ .....                                                    | 6  |
| OBSAH .....                                                         | 7  |
| ÚVOD .....                                                          | 9  |
| 1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ELEKTROEROZE.....                               | 10 |
| 1.1 Historie.....                                                   | 10 |
| 1.2 Základní princip EDM .....                                      | 12 |
| 1.3 Výboj a jeho charakteristika .....                              | 14 |
| 1.3.1 Časový průběh jednotlivých fází výboje .....                  | 15 |
| 1.3.2 Úběr materiálu a kvalita povrchu po opracování .....          | 20 |
| 1.4 Princip elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou WEDM ..... | 23 |
| 1.4.1 Výhody WEDM .....                                             | 24 |
| 1.4.2 Faktory ovlivňující WEDM proces.....                          | 25 |
| 1.4.3 Materiály nástrojových elektrod .....                         | 26 |
| 1.4.4 Dielektrikum .....                                            | 28 |
| 1.4.4.1 Vlastnosti vody pro použití dielektrika.....                | 28 |
| 2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY .....                     | 29 |
| 2.1 Rozbor a funkce součástkové základny .....                      | 31 |
| 2.2 Konstrukční řešení jednotlivých součástí .....                  | 34 |
| 3 SOUČASNÝ STAV A VÝROBNÍ MOŽNOSTI VE FIRMĚ .....                   | 38 |
| 3.1 Představení firmy .....                                         | 38 |
| 3.1.1 Strojní vybavení firmy .....                                  | 39 |
| 3.1.2 Rozmístění pracovišť firmy a WEDM strojů.....                 | 40 |
| 3.1.3 Rozhodovací koncepce pro pořízení WEDM strojů .....           | 41 |
| 3.2 Základní popis zařízení a vybavení AGIE WEDM strojů .....       | 42 |
| 3.2.1 Vedení drátu a řízení WEDM strojů .....                       | 43 |
| 3.2.2. Okruh dielektrika .....                                      | 46 |
| 3.2.3. Výbava strojů a upínání .....                                | 48 |
| 3.3 Srovnání parametrů AGIE WEDM strojů .....                       | 49 |
| 4 HODNOCENÍ MOŽNOSTÍ SOFTWARE Peps.....                             | 52 |
| 4.1. Drátové řezání PEPS Verze 7.0 .....                            | 52 |
| 4.1.2. Uživatelské rozhraní: .....                                  | 53 |
| 4.1.3. Ovládání grafického zobrazení .....                          | 54 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.4. Přednastavení NC výstupu.....                                            | 54 |
| 4.1.5. Pomocné funkce a moduly.....                                             | 54 |
| 4.2. Tvorba programu v softwaru PEPS V 7.0 modulu drátového řezání .....        | 55 |
| 4.2.1. Tvorba programu z dxf výkresů a modelů:.....                             | 55 |
| 4.2.2. Ruční tvorba kontury: .....                                              | 55 |
| 4.3 Zhodnocení možností software PEPS WIRE.....                                 | 57 |
| 5 ŘEŠENÍ TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU A NC PROGRAMU PRO VYBRANÉHO PŘEDSTAVITELE..... | 58 |
| 5.1. Použitý materiál pro výrobu .....                                          | 58 |
| 5.2. Příprava polotovaru.....                                                   | 59 |
| 5.2.1. Volba rozměrů polotovaru a výrobní postup .....                          | 59 |
| 5.2.1. Opracování polotovaru .....                                              | 61 |
| 5.3. Volba technologických parametrů a počtu řezů .....                         | 63 |
| 5.4. Výroba ohybníku elektrojiskrovým řezáním .....                             | 64 |
| 5.4.1 Příprava a první řez hlavního tvaru ohybníku: .....                       | 64 |
| 5.4.2 Příprava a druhý řez ohybníku.....                                        | 67 |
| 5.4.3 Příprava třetího a čtvrtého řezu ohybníku.....                            | 68 |
| 6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....                                         | 72 |
| 6.1. Ekonomika provozu stroje .....                                             | 72 |
| 6.1.1. Využití stroje a organizace práce.....                                   | 72 |
| 6.1.3. Výpočet hodinové sazby pro jednosměnný provoz WEDM stroje.....           | 73 |
| 6.1.3.1. Pořizovací náklady.....                                                | 73 |
| 6.1.3.2. Osobní náklady .....                                                   | 73 |
| 6.1.3.3. Provozní náklady .....                                                 | 74 |
| 6.1.3.4. Ostatní nepřímé náklady .....                                          | 76 |
| 6.1.3.5. Celkové náklady a zisk .....                                           | 77 |
| 6.2. Stanovení nákladů na výrobu typového představitele .....                   | 78 |
| 6.2.1 Spotřeba materiálu a náklady.....                                         | 78 |
| 6.2.2 Čas řezání dílce a přípravy: .....                                        | 78 |
| 6.2.3 Kalkulace nákladů výroby představitele.....                               | 81 |
| 7 DISKUZE .....                                                                 | 82 |
| ZÁVĚR .....                                                                     | 84 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....                                                   | 85 |
| Seznam použitých symbolů a zkratk.....                                          | 87 |
| SEZNAM PŘÍLOH.....                                                              | 90 |



## ÚVOD

Nekonvenčními technologiemi jsou technologie, jež jsou svou fyzikální podstatou jedinečné a odlišné od klasických technologií. Elektroerozivní obrábění (zkr. EDM) je jednou z těchto nekonvenčních metod obrábění. Využívá se zpravidla pro výrobu složitých tvarů a pro výrobu dílců z těžkoobrobitelných materiálů, které jsou na konvenčních strojích obtížně opracovatelné. U nekonvenční technologie elektroerozivního obrábění se nepoužívá mechanické působení nástroje pro úběr materiálu, nýbrž elektrická práce založená na generování elektrických výbojů mezi nástrojem a obrobkem. Na proces obrábění tedy nepůsobí žádné vlivy mechanických vlastností daného materiálu a jedinou zásadní podmínkou pro něj je vodivost obráběného materiálu.

Metoda elektroerozivního obrábění je již v dnešní době poměrně rozšířená a rozvinutá a využívá ji dnes již téměř každá větší strojírenská firma, nemluvě o nástrojářských podnicích, kde je tato metoda nezbytná pro výrobu střížníků, matric, forem a zápustek apod. a kde se hojně využívá pro svou velmi dobrou rozměrovou přesnost a povrchovou kvalitu. Jednou z průmyslově využívaných aplikací EDM je drátové elektroerozivní obrábění (zkratka WEDM). Nástrojem a současně elektrodou u této metody je tenký, mosazný drát, který díky neustálému odvinu není zatížen opotřebením a tudíž změnou geometrie nástroje, což je velmi výhodné pro řezání rozměrově přesných a složitých tvarů s možností minimálních rádiusů v závislosti na tloušťce použitého drátu. Metoda má však i nevýhody a tím je pomalý odběr materiálu a energetická náročnost procesu. Obecně se tak řadí mezi relativně nákladné technologie obrábění.

Úkolem této diplomové práce je ukázat aplikaci WEDM při výrobě ohýbacích prvků pinů, které se používají v automatizačních linkách pro výrobu konektorů, představit jednotlivé funkce těchto prvků a jejich konstrukční řešení a na konkrétním představiteli řešit technologický postup s vytvořením NC programu v softwaru PEPS. Dále zhodnotit ekonomickou stránku výroby na dvou typově stejných zařízeních, avšak jiných výkonnostních možností a kategorií. Konkrétně na elektroerozivních strojích AGIE Classic 2 a AGIE Progress V2 zakoupených firmou Eberhard Automatizace s.r.o. v Jihlavě v roce 2011 a 2012.

## 1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP ELEKTROEROZE

Elektroerozivní obrábění patří do elektrotepelných procesů, které pro úběr materiálu využívají primárně tepelnou energii z vysokoenergetických paprsků (usměrněného toku) extrémně malých částic (elektronů, fotonů, iontů a plazmy). Do této skupiny kromě EDM dále patří laserový, plazmový, elektronový a iontový paprsek.

Základem úběru materiálu je převážně u těchto procesů řízené odtavování a odpařování materiálu pod vlivem působení vysoké koncentrace energie řádově  $10^2 \text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$ .

### 1.1 Historie

Fyzikální jev elektroeroze má počátky sahající již do 18. století, kdy roku 1768 Sir Josepf Priestley zpozoroval vznik malých kráterů na plochách kovů vůči vodivým elektrodám vlivem vzniku el. výboje v plynu, a tento jev popsal.

Později se vlastní výzkum elektroeroze zaměřil na sledování výbojů mezi elektrodami v malé vzdálenosti (5-100 $\mu\text{m}$ ), hlavně v podmínkách plynného a kapalného prostředí.

K průmyslovému využití této metody se dostalo až v první polovině 20. století díky manželům Lazarenkovým, kteří se zasadili o první patent a vypracování teoretických základů procesu, jakožto výsledku zkoumání opotřebení kontaktních spínacích zařízení. Mezi roky 1938 a 1944 prováděli intenzivní výzkum elektrických výbojů pro obrábění kovů a definovali hlavní zákonitosti elektroeroze (tj. všechny vodivé materiály podléhají elektroerozi jak v plynném, tak i v kapalném prostředí; vhodným zapojením a volbou parametrů lze docílit přeměnu stacionárního výboje na opakovaný nestacionární s přesnějším řízeným úběrem materiálu). Jejich navrhnuté Lazarenkovo zapojení generátoru výbojů bylo pak ještě dlouho používáno v oblasti EDM obrábění.

Do průmyslu byl první elektrojiskrový obráběcí stroj zaveden švýcarskou firmou AGIE počátkem padesátých let. Od 70.let se začalo používat dělení metod dle druhu výboje, parametrů obrábění a zdrojů impulzních toků na elektro-jiskrové, - impulzní, - kontaktní, - anodické.

Dnes je rozdělení stanovováno dle technologických možností na:

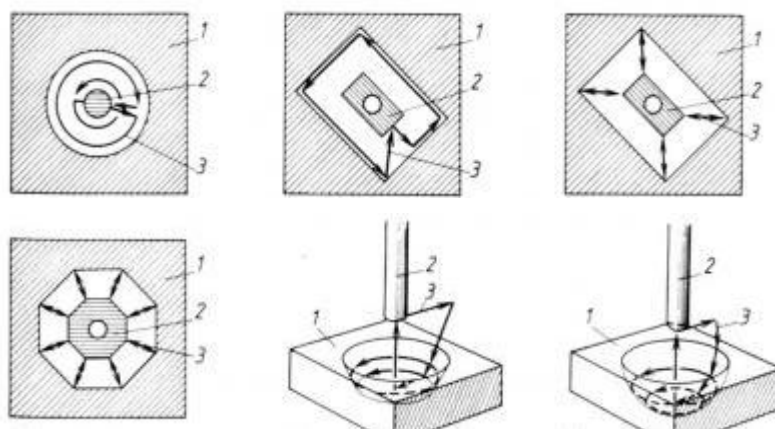
- hloubení (tvarové elektroerozivní obrábění, EDM),
- řezání (WEDM),
- broušení (EDG).

Každá tato metoda se liší svým průmyslovým využitím, zařízením a technologickými charakteristikami. [1,2]

### EDM hloubení

Elektroerozivní hloubení kovového obrobku napodobuje třírozměrně tvar nástroje (elektrody) s negativním tvarem požadovaného výsledného tvaru nebo pomocí pohybů jednodušší elektrody v pracovních osách stroje a jejich skládáním lze vytvářet různě složité tvary viz. obr. 1.1 . Např. se využívá pro výrobu zápustek, střížných a lisovacích nástrojů, tvářecích

a licích forem. Elektrody jsou obvykle vyrobeny z mědi nebo grafitu a kombinacemi wolframu se stříbrem či mědí. [1] Princip činnosti zobrazuje obr. 1.3.



Obr. 1.1 Výroba dutiny kombinací tvaru a pohybu nástrojové elektrody. [9]

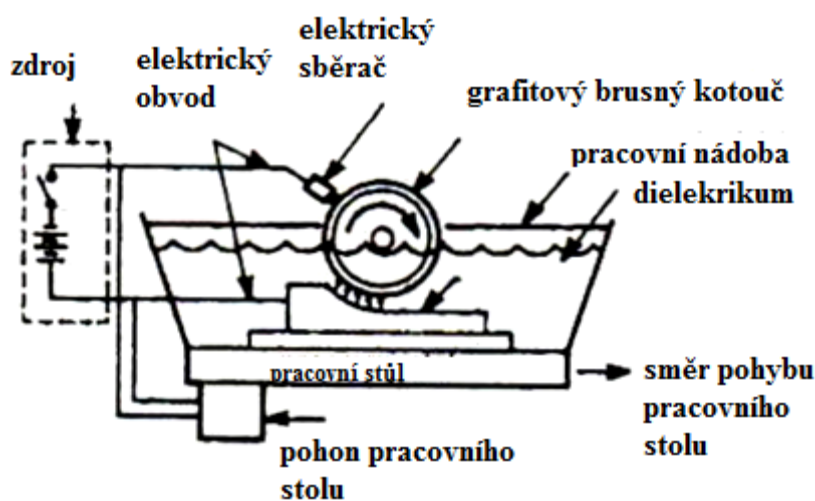
1 – obrobek, 2 – nástroj, 3 – směr pohybu

### WEDM řezání

Tato technologie vyniká po opracování svou rozměrovou přesností a dosahovanými hodnotami integrity povrchu na úrovni broušení. Používá se pro řezání hlubokých otvorů a složitých tvarů, převážně pro výrobu střížných a lisovacích nástrojů. Nástrojem je tenký drát s průměrem 0,03 do 0,35mm. Ten řeže dle křivek předem naprogramovaných v počítači a generovaných jako strojní program. Lze řezat i pod úhlem až 30° díky vyosením horního a dolního vedení drátu. Materiálem drátu je nejčastěji molybden nebo slitiny mědi, nejvíce mosazi. Mohou být i povlakované zinkem, stříbrem nebo chromem. [3]

### EDG broušení

Nástrojová elektroda je rotující kotouč vyrobený z mosazi či grafitu. Obrobek zapojen na kladný pól je ponořen do dielektrika a je posouváný k záporné elektrodě (rotujícímu kotouči) pomocí servopohonu. [1]



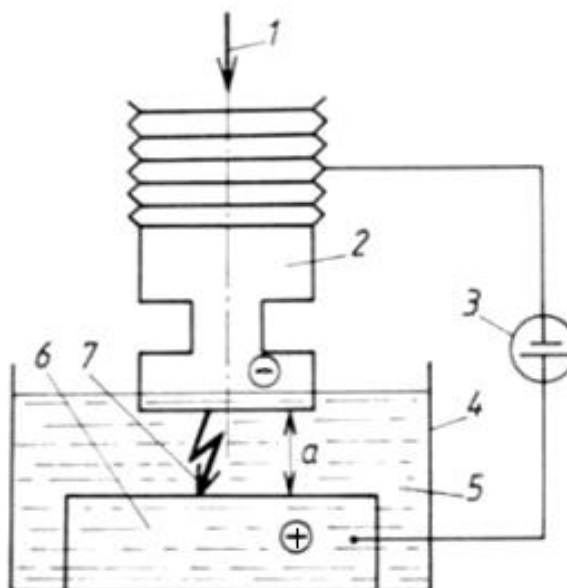
Obr. 1.2 Princip elektrojiskrového broušení. [1]

## 1.2 Základní princip EDM

Elektroerozivní obrábění (Elektro discharge machining) je technologický proces založený na odstraňování materiálu z obrobku pomocí elektrické energie prostřednictvím série rychle se opakujících unipolárních elektrických výbojů, které jsou vytvořené elektrickými impulsy generátoru v krátkých časových intervalech a mají podobu jiskry nebo el. oblouku. Přitom se elektrická energie přemění na tepelnou energii, která způsobí odtavení a odpaření mikroskopické vrstvy materiálu obrobku.

Výboje probíhají mezi elektrodami (nástrojem a obrobkem v těsné blízkosti) ponořenými v dielektrické kapalině s vysokým elektrickým odporem. Dielektrická kapalina, nejčastěji deionizovaná voda, pomáhá ke vzniku jiskry a má vyplachovací schopnost, díky níž se neustále kapalina v mezeře vyměňuje a vyplavuje odebraný materiál z místa pryč.

Na obrázku 1.3 je znázorněno jednoduché schéma představující základy EDM procesu.

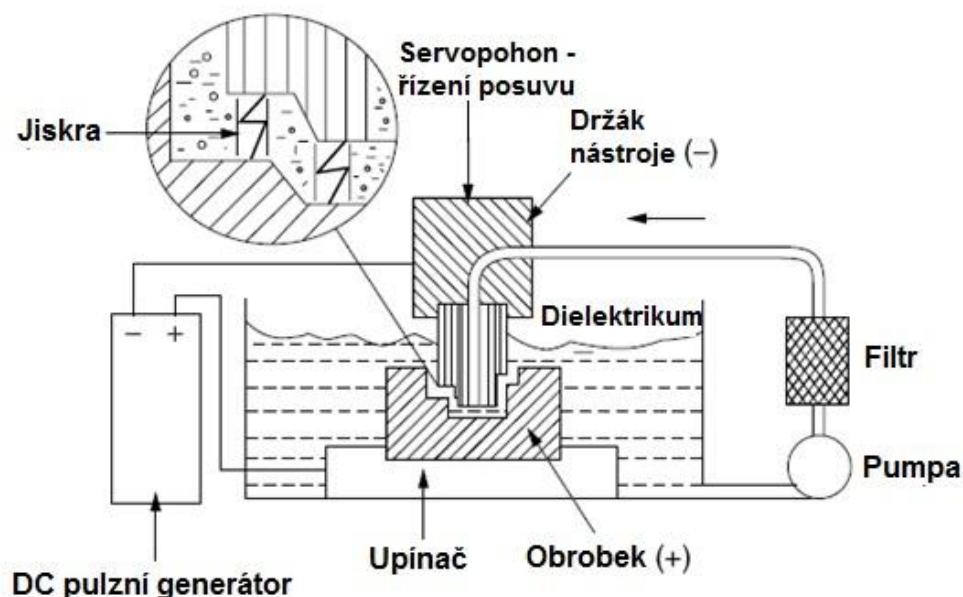


Obr. 1.3 EDM proces - základní schéma. [4]

1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor, 4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj, a – pracovní mezera

Mezi hlavní složky systému EDM jak je znázorněno na obrázku 1.4 patří :

- nástroj spolu se servo-řídící jednotkou, která udržuje konstantní obráběcí mezeru, a která zajišťuje výplach mezi elektrodami,
- pracovní část drží nástroj ponořený do dielektrické kapaliny,
- jednotka oběhu dielektrika spolu s filtračním systémem, která dodává dielektrické kapaliny do elektrodové mezery,
- DC pulzní napájecí zdroj, který dodává impulsy v určitém napětí, proudu, impuls zapnutí a impuls vypnutí. [5]



Obr. 1.4 Schéma EDM systému. [5]

### 1.2.1 Teorie úběru materiálu

K odstraňování materiálu dochází v důsledku vzniku extrémně vysokých teplot vzniklých na základě výbojů s vysokou intenzitou. Mechanismus úběru je považován za výrazně ovlivněný třemi teoriemi eroze, které jsou:

#### I. Teorie vysokého tlaku

Kvůli náhlému zastavení elektro-dynamických vln, jsou generované vysoce impulzivní tlaky, které jsou odpovědné za erozi elektrod. V malé energii výboje by výtlakový tlak sám nepostačil k erozi materiálu, ale ve spojení s dalšími faktory, jako je teplo, může tlak sfouknout roztavený kov z povrchu elektrody.

#### II. Teorie statického pole

Podle Coulombova zákona, mezi dvěma nabitými elektrodami dochází k výskytu elektrostatických sil. Ty mohou být uvedeny ve skalární podobě. Pak velikost elektrostatické síly mezi dvěma bodovými elektrickými náboji je přímo úměrná součinu velikostí každého náboje a nepřímo úměrná druhé mocnině celkové vzdálenosti mezi dvěma elektrodami.

$$F = K_e \cdot q_1 \cdot q_2 / r^2 \quad [\text{N}], \quad (1.1)$$

V rovnici (1.1), kde  $r$  je vzdálenost mezi dvěma náboji a  $K_e$  je konstanta úměrnosti. Pozitivní síla znamená odpuzivou interakci, zatímco negativní síla znamená přitažlivou interakci.

V souladu s tím, síla mezi elektrodami vytváří napětí na elektrodách, které, když je jejich mezera velmi malá, může překročit mez pevnosti materiálu elektrody, jehož výsledkem je tahové prasknutí.

### III. Teorie vysoké teploty

Podle této teorie vzniká vysoká teplota (3000-12000°C) v daném místě, kde je povrch elektrod bombardován elektrony o vysoké kinetické energii. Při této vysoké teplotě se materiál na místě okamžitě roztaví, odpaří a opouští vzniklý kráter na povrchu. Vysoká teplota není generována pouze bombardováním elektrony, ale také Joulovým teplem vysokohustotního proudu.

Intenzivní proudová hustota ve sloupci plazmy vytváří zdroj tepla pro sdílení energie mezi obrobkem (hlavní část tepla) a nástrojem (menší část tepla). Zbytek tepla je odveden do okolní dielektrické kapaliny. Teplo sdílené do dielektrické kapaliny v okolním kanálu plazmy způsobí pyrolýzu a vypařování dielektrika.

Všechny výše uvedené teorie samotně nedefinují jev jiskrového obrábění, avšak společně mohou být kombinovány pro popis tohoto procesu. Přičemž je teorie vysoké teploty jedna z převládajících. [5]

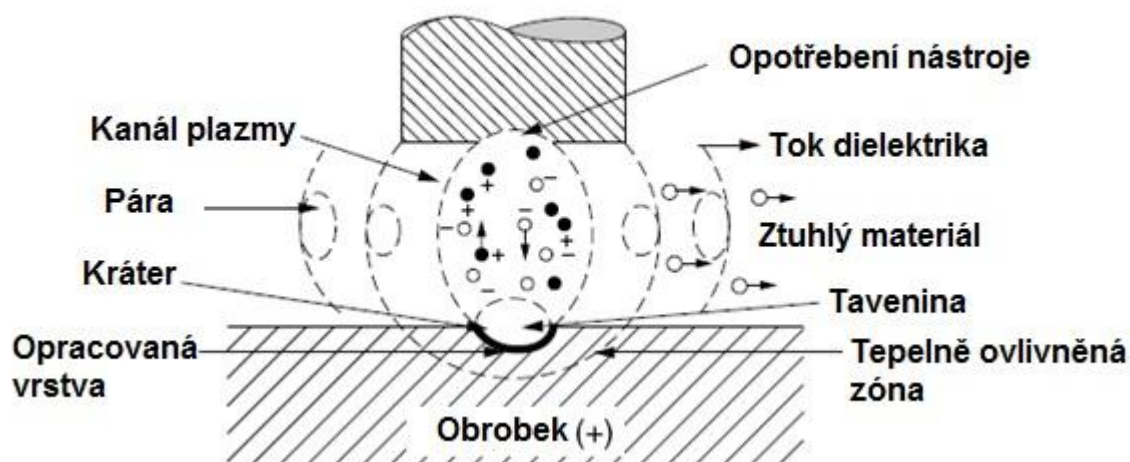
#### 1.3 Výboj a jeho charakteristika

Elektrický výboj vzniká přivedením napětí na elektrody, z nichž je jedna anoda a druhá katoda. Výše napětí potřebné pro vznik výboje mezi elektrodami, závisí na:

- vzdálenosti elektrod,
- znečištění dielektrika a na jeho vodivosti.

Výboj vzniká v místě nejsilnějšího elektrického napětového pole, díky němuž se uvedou do pohybu volné, záporné a kladné ionty a začnou se urychlovat. To způsobí vytvoření ionizovaného kanálu, který umožní průtok el. proudu mezi elektrodami a výboje. Výbojem se uskuteční další srážky částic. Vzniká plazmové pásmo o vysoké teplotě. Takováto teplota zapříčiní tavení a odpařování materiálu elektrod. Odpařováním dielektrika vzniká plynová bublina o vysokém tlaku viz. obr. 1.5. Přerušením proudu poklesne teplota a to způsobí implozi této plynové bubliny. Do uzavřeného prostoru vniká dielektrikum a velké dynamické síly vymrštují roztavený materiál z kráteru. Vymrštěný materiál tuhne ve formě malých kuliček a dielektrikum ho odvádí z prostoru pryč. [2]

Druh výboje závisí na typu zapojení a volbě pracovních parametrů elektrického obvodu. V podstatě rozlišujeme 2 typy výboje a to oblouk ( $t = 0,1$  až  $0,001$  sekundy,  $T = 4000^\circ \text{C}$ ), jakožto stacionární výboj, a jiskra ( $t \leq 0,0001$  sekundy,  $T =$  až  $10\,000^\circ \text{C}$ ), jako nestacionární. [4]



Obrázek 1.5 EDM popis jiskry a úběru materiálu. [5]

### 1.3.1 Časový průběh jednotlivých fází výboje

Časový průběh výboje je možno rozdělit do devíti fází. Časový průběh fází s proudovými a napěťovými průběhy charakteristickými pro polovodičový generátor znázorňuje obr. 1.6.

Fáze I. :

- Přívod napětí a vznik elektrického pole mezi elektrodami. Vlivem nerovností povrchu elektrod se v místě s minimální vzdáleností vytvoří maximální gradient a elektricky vodivé částice ze znečištění jsou vtaženy do tohoto místa. Růst napětí a nulový proud.

Fáze II. :

- Přivedené napětí dosáhne maxima hodnoty a elektricky vodivé částice vytvoří mezi elektrodami můstky (základ pro zapálení výboje).

Fáze III. :

- Vlivem silícího elektrického pole se ze záporně nabitých elektrod začínají uvolňovat elektrony a sráží se v prostoru s neutrálními částicemi za vzniku aniontů a kationtů tzv. **proces ionizace**.

Fáze IV. :

- Střed budoucího výbojového kanálu se obalí ionty a klesne tak odpor výbojového kanálu. Mezi elektrodovým prostorem začne protékat proud, roste proudová hustota (cca.  $10^6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ ), vytváří se vodivý kanál z plazmy. Roste proud a teplota na elektrodách a klesá napětí.

Fáze V. :

- Opařováním dielektrika vzniká plynová bublina. Vlivem nárazů částic na elektrody se uvolňuje velké množství tepelné energie (až 10 000°C). Nárazy elektronů na anodu a iontů na katodu způsobují ohřev ohraničených míst obou elektrod, jejich tavení a odpařování. Proud dosáhne max. hodnoty a napětí se ustaluje na tzv. zápalné hodnotě výboje.

Fáze VI. :

- Nastává intenzivní expanze bubliny, intenzivní tavení a odpařování materiálu elektrod.

Fáze VII. :

- Přerušení přívodu energie a pokles proudu v mezeře vyvolá snížení dodávky tepla. Pokles teploty je příčinou imploze plynové bubliny. Síly elektrického pole a pokles tlaku plynů způsobí rozrušení materiálu vytrhnutím taveniny do prostoru a vzniku kráteru.

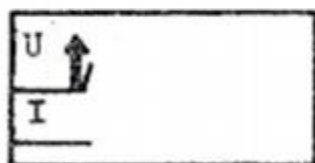
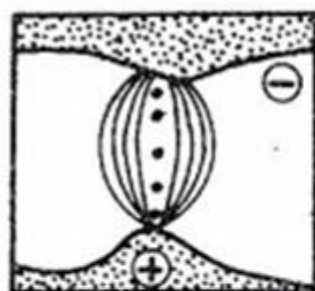
Fáze VIII. :

- Pracovní proud a napětí klesá na nulovou hodnotu. Bublina a výboj zanikají a do kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a odplavuje ztuhlý, odebraný materiál ve formě kuliček.

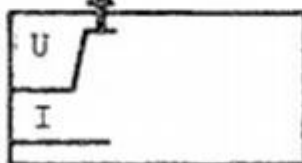
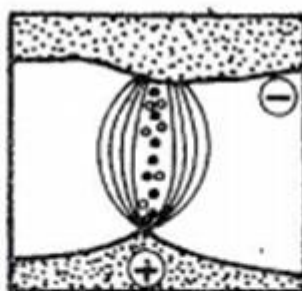
Fáze IX. :

- Dielektrikum je znečištěno produkty eroze a obsahuje zbývající volné ionty, které tvoří základ pro tvorbu nového výboje. [2]

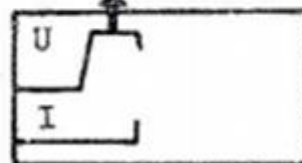
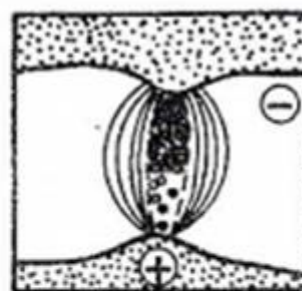




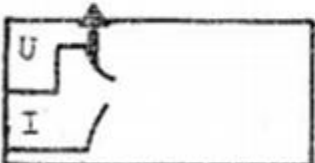
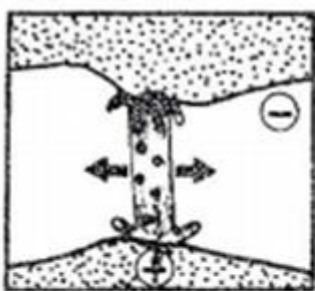
Fáze I



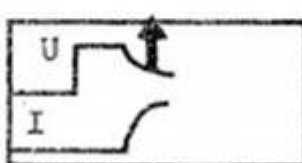
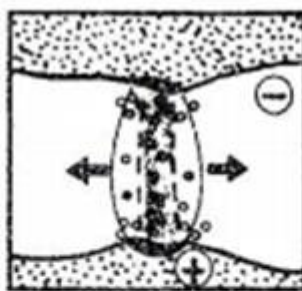
Fáze II



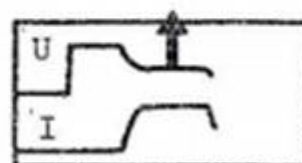
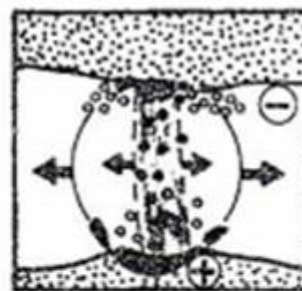
Fáze III



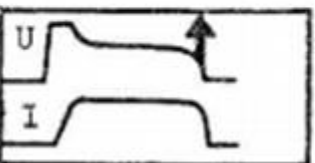
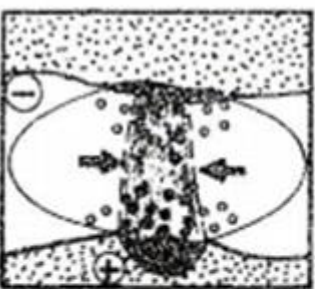
Fáze IV



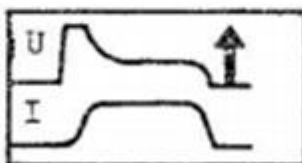
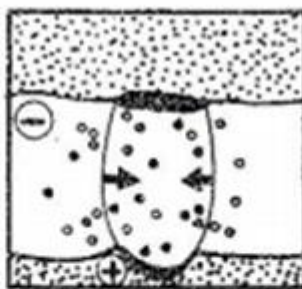
Fáze V



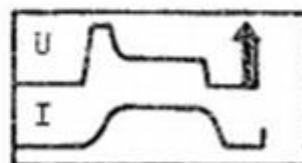
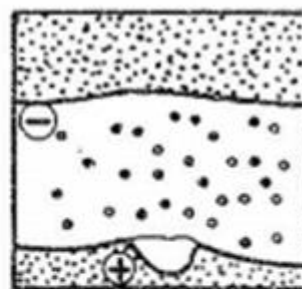
Fáze VI



Fáze VII



Fáze VIII



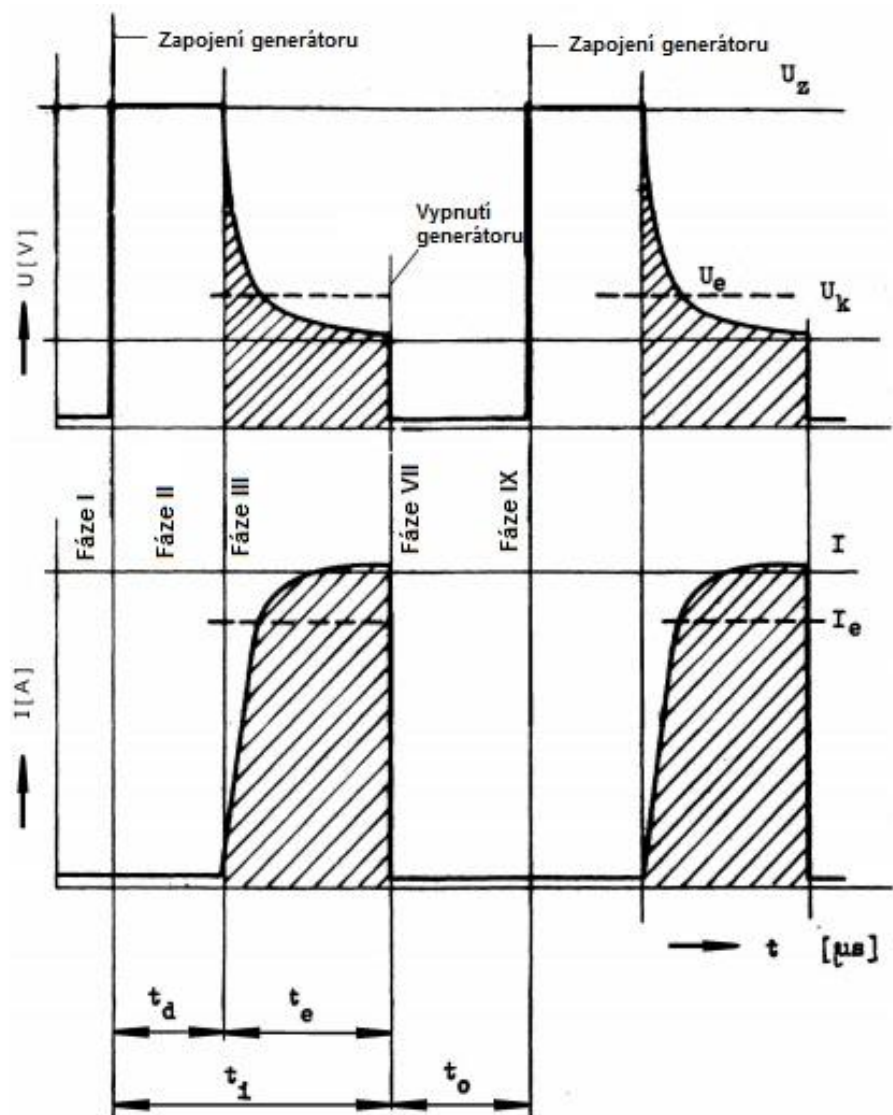
Fáze IX

Obr. 1.6 Časový průběh jednoho impulsu. [2]

### Charakteristika impulzního výboje:

Jednotlivé technologické aplikace vyžadují různé formy elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu a na obrobek přiváděny z generátoru ve formě pulzů o určité frekvenci. Každý pulz je charakterizován napětím, proudem a tvarem. [4]

Časový průběh výboje je určen řadou charakteristik zobrazených na obr. 1.7. Jsou zde vyznačené i jednotlivé fáze I – IX korespondující s obr. 1.6. [2]



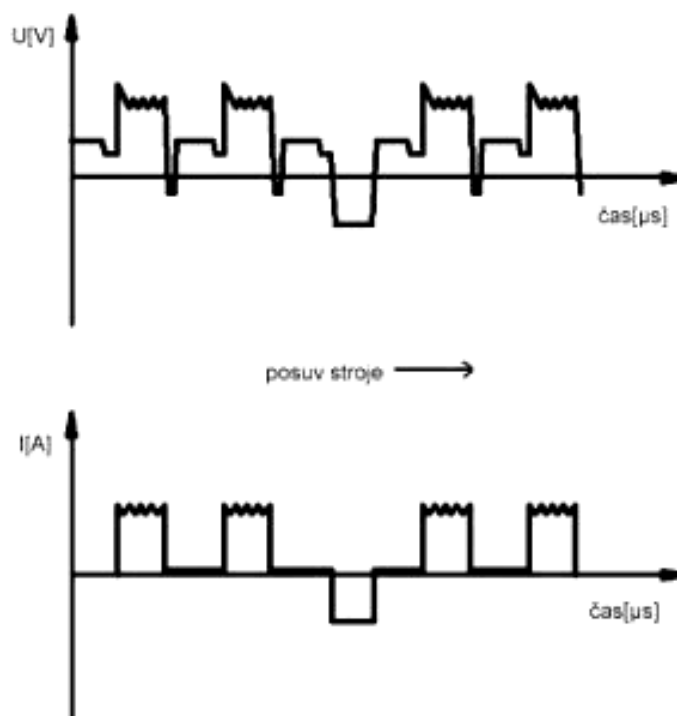
Obr. 1.7 Nejčastější tvar časového průběhu výboje z polovodičového generátoru. [2]

Tab. 1.1 Základní fyzikální charakteristiky popisující průběh výboje:

|                               |                                                                                                                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| doba impulsu $t_i$            | časový úsek mezi zapojením a vypojením generátoru                                                                                          |
| doba pauzy $t_o$              | časový úsek mezi vypojením a novým zapojením generátoru                                                                                    |
| doba zpoždění $t_d$           | čas mezi okamžikem zapojení generátoru a průrazem dielektrika                                                                              |
| doba výboje $t_e$             | časový úsek mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru                                                                                    |
| doba periody $T_p$            | časový úsek určený dobou impulsu a pauzou, určuje frekvenci výbojů                                                                         |
| napětí naprázdno $U_z$        | napětí při zapnutí generátoru (zápalné napětí výboje)                                                                                      |
| pracovní proud výboje $I$     | max. vybíjecí proud protékající mezi elektrodami během výboje                                                                              |
| střední vybíjecí proud $I_e$  | střední hodnota proudu mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru                                                                         |
| střední vybíjecí napětí $U_e$ | střední hodnota napětí mezi zapálením výboje a vypnutím generátoru                                                                         |
| napětí $U_k$                  | hodnota napětí při zhasnutí výboje, závislá na materiálu, dielektriku a jeho stavu. Využívá se při řízení a optimalizaci procesu obrábění. |

Čas pauzy, resp. přerušení, musí být delší než čas potřebný k deionizaci kapaliny. V opačném případě by mohl nastat trvalý výboj a úběr jen v jednom místě. [3]

Sledování stavu jiskry a jiskrové mezery se dříve vyhodnocovalo pouze na základě efektivního napětí v jiskrové mezeře. Dnes se vyhodnocuje nejen délka trvání každé jiskry, ale i její průběh, který se dokonce u moderních strojů tvaruje do požadované křivky. Sledování střední aritmetické úchylny profilu je důležité pro dosažení stabilní a jemné jiskry. Celková doba efektivních pulzů je snímána a informace převáděna do řídicí jednotky, která na základě těchto informací optimalizuje rychlost posuvu nástroje.



Obr. 1.8 Průběh řezacího impulsu. [6]

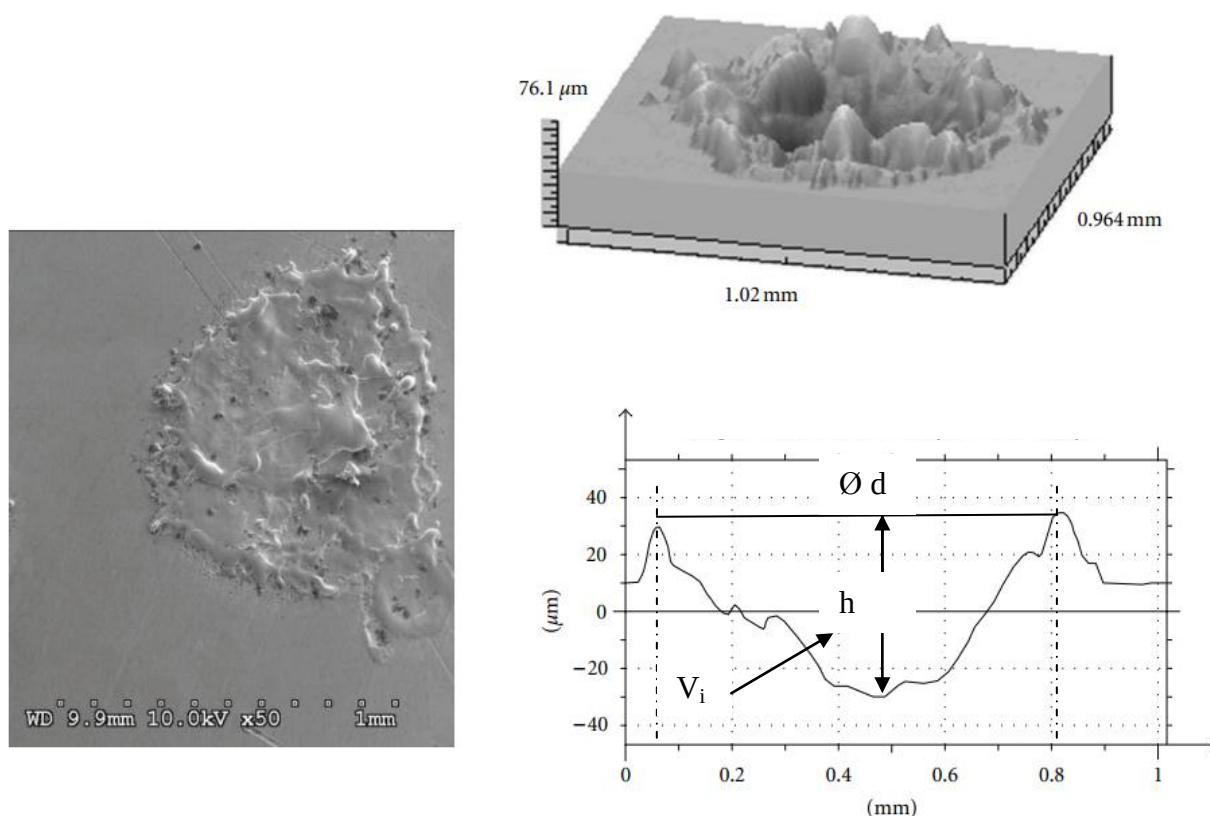
Současným trendem ve snižování nákladů a efektivity je používání výkonných spínacích prvků generátorů. Odjiskřený materiál, tudíž i energie jednoho pulzu, bývá menší, avšak

častějším spínáním a vyšší frekvencí jisker se dosahuje lepšího povrchu a rychlejšího úběru. Především v dokončovacím režimu se tak může zrychlit rychlost řezu. [6]

### 1.3.2 Úběr materiálu a kvalita povrchu po opracování

Kvalitou povrchu rozumíme jeho integritu a stav povrchové vrstvy. Nejdůležitějšími hodnotícími parametry kvality povrchu po elektrojiskrovém obrobení je drsnost povrchu a popř. struktura.

Velikost a tvar kráteru vzniklého po vyjiskřování jsou dány velikostí vybíjecí energie. Zvětšený profil kráteru je uveden na obr. 1.9. Jeho rozměry (hloubka  $h$  a průměr  $d$ ) závisí na množství přivedené energie a době výboje. Toto má významný vliv na drsnost opracované plochy ukázka obr. 1.10, přesnost a účinnost procesu. [2]



Obr. 1.9 Zvětšení kráteru (50x) individuálního elektrického výboje na obrobenej ploše, jeho 3D zobrazení a profilograf (parametry výboje  $U_e = 80 \text{ V}$ ,  $I = 48 \text{ A}$ ,  $t_i = 400 \mu\text{s}$ ). [7]

Množství odebraného materiálu  $V_i$  je úměrné vybíjecí energii a lze vypočítat ze vzorce:

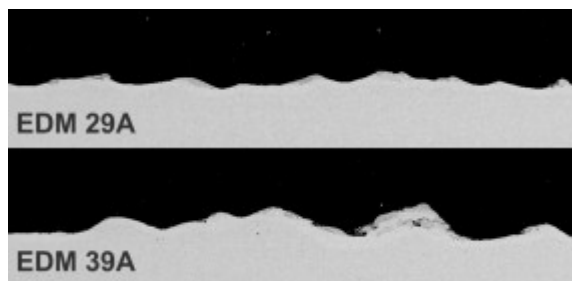
$$V_i = K_a \cdot W_i \quad [\text{mm}^3], \quad (1.2)$$

Kde  $W_i$  [J] je energie výboje a  $K_a$  součinitel mívající různé hodnoty jak pro katodu, tak i pro anodu. Přičemž energie výboje  $W_i$  je dána vztahem 1.3.

$$W_i = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt \text{ [J]}, \quad (1.3)$$

Celkové množství odebraného materiálu za jednotku času (resp. objemový výkon úběru) je označován jako  $Q_v$  a vyjadřuje objemový úbytek materiálu na obou elektrodách. [2]

$$Q_v = K_i \cdot f \cdot r \cdot \eta \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt \text{ [mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (1.4)$$

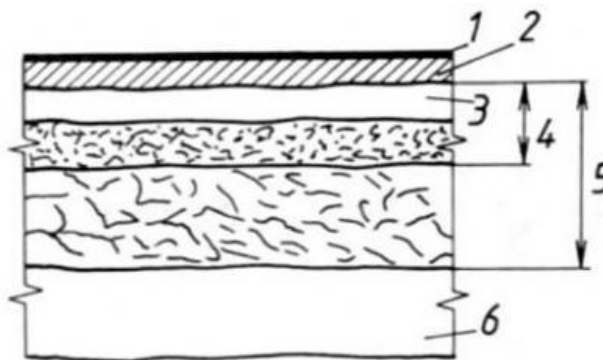


Obr. 1.10 Drsnost a profil povrchu Ti-6Al-4V po EDM při použití různých proudových hodnot 29 A a 39 A. [8]

### Stav povrchové vrstvy po EDM

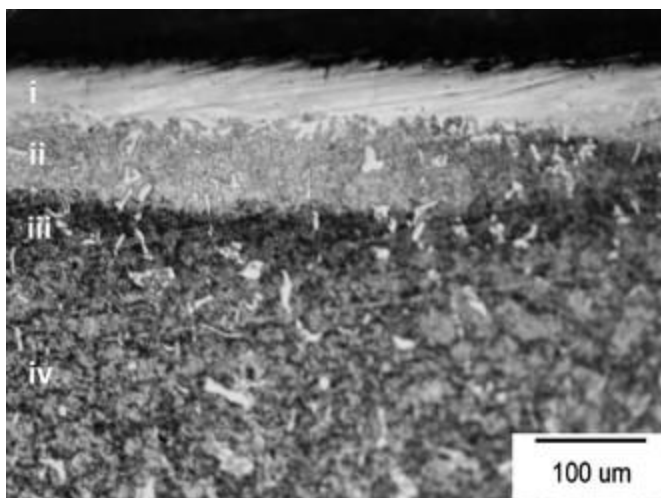
Po elektroerozivním obrábění dochází k tepelnému ovlivnění povrchu obrobku. To může mít společně s tahovým napětím povrchu v konečné fázi negativní vliv na požadované vlastnosti a životnost výrobku. V případě funkčního požadavku by se měla takto ovlivněná vrstva ještě mechanicky zpracovat dokončovacími operacemi např. broušením.

Se vznikem kráteru je spojené natavení povrchu obrobku při teplotách až 12000°C a plastická deformace v oblasti kráteru. Natavená vrstva též reaguje s materiálem elektrody. Po rychlém ochlazení průnikem dielektrika tavenina tuhne. Následkem tohoto jsou tepelně ovlivněné oblasti, metalurgické přeměny základního materiálu a poruchy vrstvy. Na obr. 1.11 a 1.12 jsou tyto oblasti znázorněné. Graf 1.1 ukazuje průběh mikrotvrdosti v těchto vrstvách.

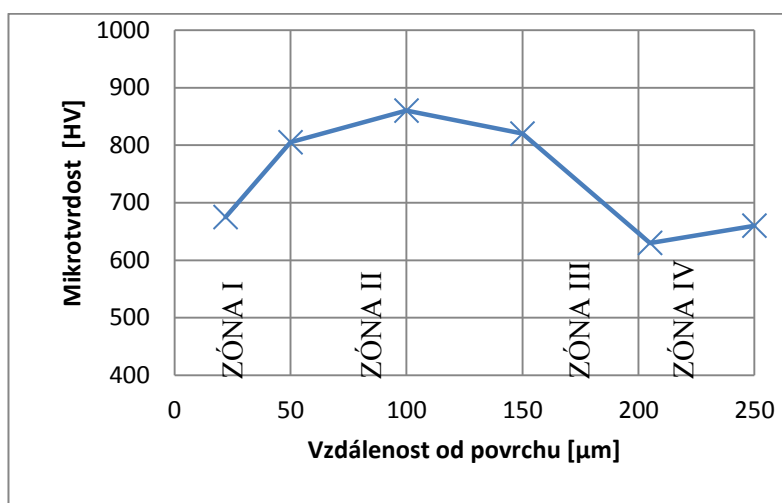


Obr. 1.11 Složení povrchu opracované plochy. [4]

- 1 – mikrovrstva tvořená chemickými sloučeninami vzniklými difúzí prvků dielektrika, 2 – vrstva obsahující prvky materiálu nástrojové elektrody, 3 – tzv. bílá vrstva (silně nauhličená znovu ztuhlá tavenina martenzitické struktury), 4 – pásmo tepelného ovlivnění (zakalený a popuštěný základní materiál obrobku), 5 – pásmo plastické deformace vyvolané rázy 6 – matrice neovlivněného materiálu



Obr. 1.12. Čtyři různé zóny povrchu procesem ovlivněného materiálu I. bílá vrstva martenzitické a zbytkové austenitické struktury, natavená a znovuztuhlá zóna, II. zakalená zóna III. popuštěná temperovaná zóna, IV. matrice obráběného materiálu. [9]



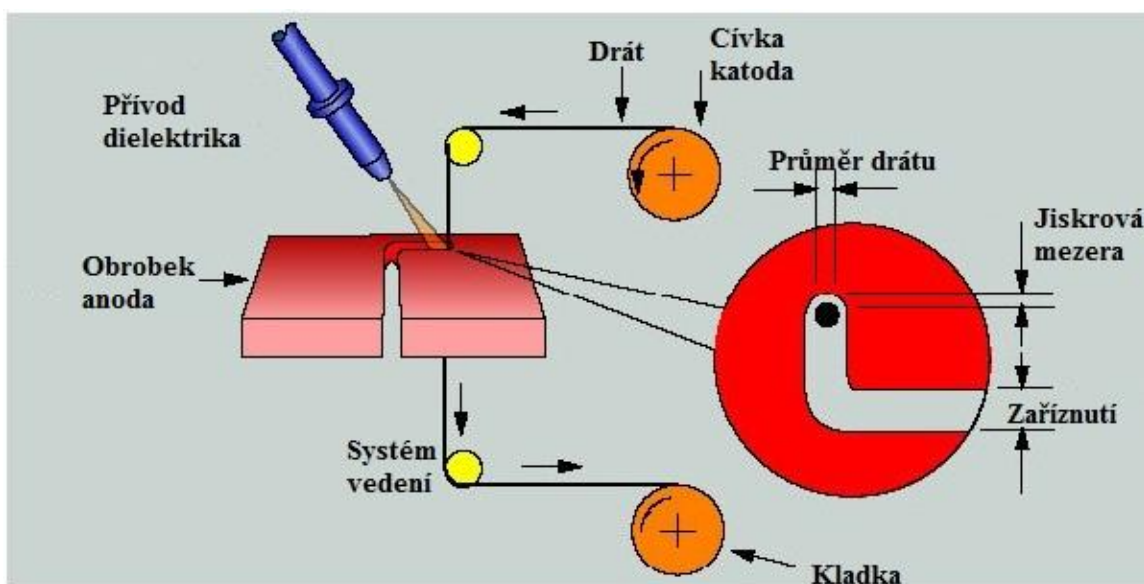
Graf. 1.1. Mikrotvrdost zón tvořených EDM ovlivněného materiálu. [9]



#### 1.4 Princip elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou WEDM

Zákonitosti a fyzikální podstata elektrojiskrového řezání drátovou elektrodou, označované jako WEDM (Wire electric discharge machining), je stejná jako v předešlé teorii. Rozdíl je v tvaru elektrody. Nástroj má totiž podobu tenkého drátu, který se průběžně pomalu odvíjí z cívky a dále je přiváděn přes systém vedení k obrobku. [1] Drát se odvíjí z cívky, proto je potřeba jeho tvarovou paměť eliminovat a správně drát vyrovnat. Toho se dosáhne ohřevem a kalibrací v diamantových průvlacích těsně před vstupem do štěrbiny obrobku. Pro zamezení větších nepřesností a soudkovitosti při jiskření se používají napínací kladky, které drát předechnou na určitou hodnotu tahového napětí.

Tvarem pro řezání jsou přímkové plochy programované dle konkrétního tvaru obrobku. Schéma procesu je znázorněno na obr. 1.13.



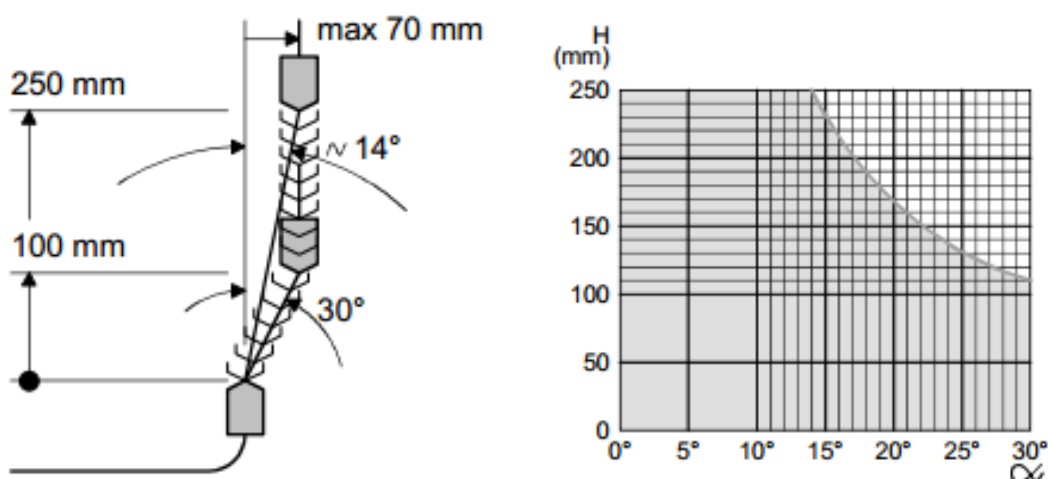
Nejčastěji při použití tranzistorového generátoru se obrobek zapojuje jako anoda a drát jako katoda.

Vzájemný pohyb obrobku vůči drátu zabezpečují servo nebo lineární pohony jak stolu, tak i vodících hlav. Objemová rychlost úběru se řádově pohybuje v rozmezí  $10^3$  až  $10^4$  mm<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup> a je zčásti ovlivněna druhem materiálu, především jeho vodivostí. Vzdálenost elektrod musí být vždy dodržena a pohybuje se kolem 0,03mm. Polohování musí být velmi přesné kvůli dodržení výsledného rozměru obrobku a také k zamezení zkratu elektrod.

### 1.4.1 Výhody WEDM

U řezání drátem nedochází ke kontaktu nástroje s obrobkem a díky neustálému odvinu ani k opotřebení nástroje, což přináší některé podstatné výhody oproti konvenčním metodám. Mezi ně patří např. velmi dobrá výrobní přesnost a povrchové jakosti, při nichž často odpadne i nutnost dodatečného broušení. Běžně dosahovaná drsnost při dokončovacím řezu je kolem  $0,8\mu\text{m}$ . Lze řezat velmi malé a složité tvary i na velmi tenkých dílcích, protože zde nepůsobí mechanické síly od nástroje. Díky naklonění horního a dolního vedení drátu lze řezat i pod úhlem až  $30^\circ$ . [3,10]

Obrázek 1.14 a graf 1.2 znázorňuje závislost šířky řezaného materiálu se stupněm dosaženého podřezu, jenž závisí na maximální pojezdové dráze os U a V vodících hlav stroje. [10]



Obrázek 1.14 a graf 1.2. Závislost stupně dosaženého podřezu na šířce řezaného materiálu.[10]

Metodou lze zpracovávat i velmi tvrdé materiály např. kalené nástrojové ocele, karbidy wolframu, titan, slinuté karbidy a jiné těžkoobrobitelné materiály. Jedinou limitou pro tuto technologii je v podstatě vodivost obráběného materiálu a relativně pomalý úběr materiálu.



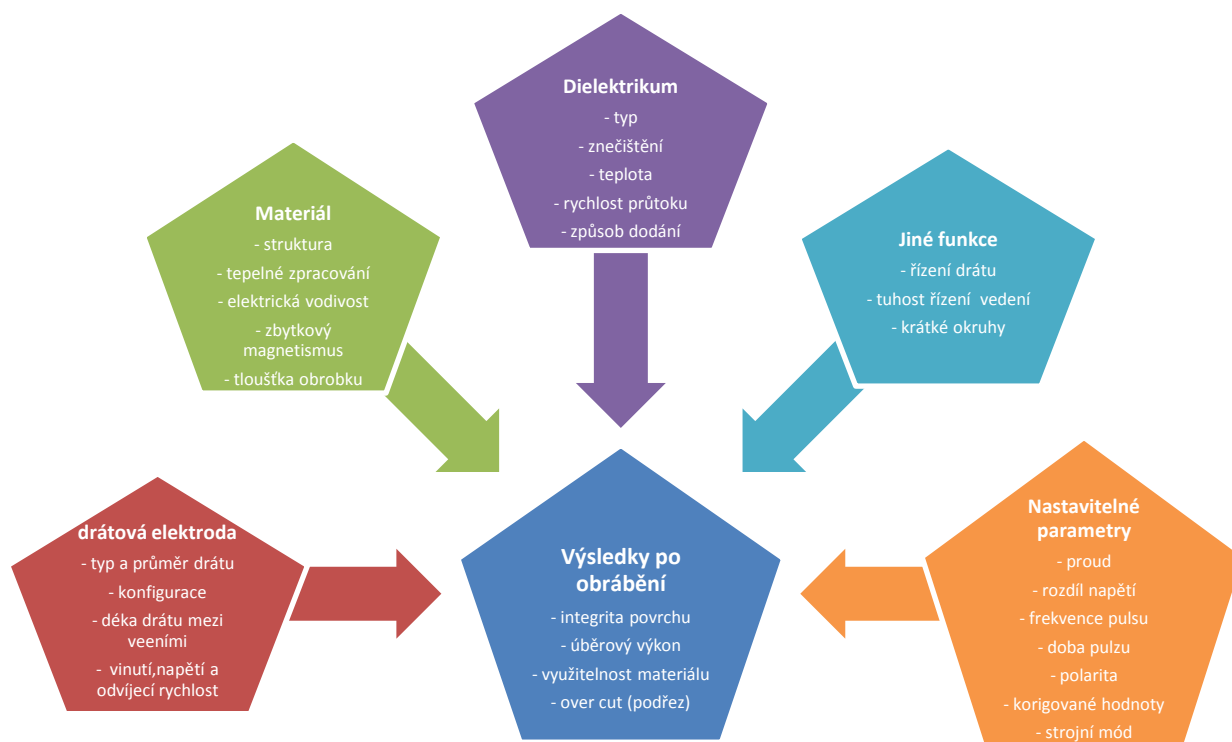
Obrázek 1.15 Bloky z těžkoobrobitelného tvrdokovu TSM30 vyřezané elektrojiskrovou technologií.



### 1.4.2 Faktory ovlivňující WEDM proces

Hlavním cílem výrobců WEDM a uživatelů je dosáhnout lepší stability procesu a vyšší produktivity. Je kladen důraz na dosažení vyšší produktivity obrábění s požadovanou přesností a povrchovou drsností.

Optimální využití kapacity procesu WEDM vyžaduje vhodný výběr parametrů obrábění. WEDM technologie je složitá a je řízena velkým počtem parametrů, jak je znázorněno na obrázku 1.16. [5]



Obrázek 1.16 Faktory ovlivňující WEDM proces. [5]

- zařízení (stroj) – tuhost, stabilita, kapacita průtoku dielektrika, řídicí systém a stupeň automatizace,
- dielektrická kapalina – chemické složení, fyzikální vlastnosti, stupeň kontaminace produkty eroze, intenzita a způsob proudění a pracovní vzdálenost mezi elektrodami,
- materiál obrobku – chemické a fyzikální vlastnosti (magnetický stav, teplotní roztažnost, smršťivost, ...), tvar a rozměr obrobku,
- nástrojová elektroda - chemické a fyzikální vlastnosti, tvar a rozměr nástroje,
- nastavitelné parametry k tvorbě výboje – tj. elektrické podmínky vzniku výboje - výsledný tvar výboje, energie impulzu, frekvence výboje a trvání výboje. [1]

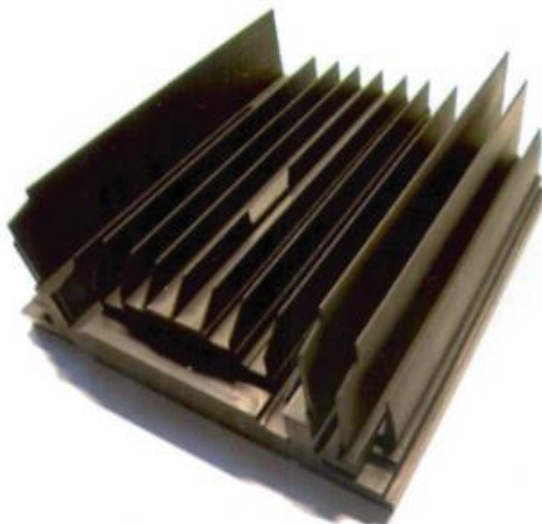
### 1.4.3 Materiály nástrojových elektrod

Základní požadavky na nástrojové materiály elektrod:

- vysoká elektrická a tepelná vodivost,
- vysoký bod tavení a dostatečná pevnost,
- jednoduchá vyrobiteľnosť i tvarových a složitých elektrod konvenčnými metodami.

Pro obrábění otvorů EDM se používají elektrody z mědi, litiny, mosazi a kompozice mědi a grafitu. Pro broušení a řezání se používají také tyto elektrodové materiály plus elektrody obsahující hliník.

Nejvíce rozšířeným materiálem elektrod je však grafit. Vyniká svojí opracovatelností a vhodnými vlastnostmi pro EDM obrábění (dobrá vodivost, vysoká teplota tavení, méně se opotřebovuje, nízká hustota, velmi dobrá opracovatelnost, stálost). Nevýhodou jsou procesem vznikající zplodiny, které znečišťují zařízení.



Obr. 1.17 Ukázka grafitové elektrody. [4]

Dále se používá měď, která se vyznačuje svojí odolností proti opotřebení a hospodárností. Doporučuje se pro obrábění karbidů a jemné dokončování povrchů s  $R_a$  pod  $0,5 \mu\text{m}$ . Mosazné elektrody trpí větším opotřebením a používají se proto hlavně k méně přesnému hloubení. Dále wolframové elektrody, které se využívají pro hloubení malých otvorů. Nevýhodou je však u nich cena.[1]

Pro WEDM elektrodové dráty je nejrozšířenějším materiálem měď a její slitiny (především mosaz) a to z důvodu dobré pevnosti v tahu ( $480\div 950\text{MPa}$ ) a elektrické vodivosti. Dalšími materiály jsou dráty z molybdenu a wolframu, které se využívají pro svojí přesnost a jsou tedy vhodné pro mikroobrábění.

Pro zvýšení výkonnosti nebo přesnosti se používají i dražší dráty s povlakem. Běžné jsou dráty s měděným nebo ocelovým jádrem a vnějším povlakem molybdenu, zinku, grafitu... Typ drátu a povlaku se volí dle konkrétního požadavku na řezání. [1]

Měděné nebo mosazné jádro vodiče, potažené zinkem nebo vrstvou 20-30 $\mu$ m tloušťky ZnO oxidu zinečného mají schopnost zvýšit řeznou rychlost. Odpařování zinkové vrstvy má chladicí efekt, které vede ke zvýšení účinnosti WEDM procesu snížením teploty drátu, protože dovoluje větší průtok tepla. To vede ke zvýšení rychlosti řezání až o 50%. Taktéž se díky odpařování povrchové vrstvy ZnO lépe stabilizuje plazmatický sloupec jiskry a vede k lepšímu dielektrickému proplachování a odstraňování odpadu procesu. [5]

Průměry běžně používaných drátů na trhu se pohybují od 0,03 až 0,3mm. Nejčastěji se však používá průměr 0,25mm nebo 0,15mm. Rychlost odvinu drátu se pohybuje zpravidla od 2,5 do 200mm.s<sup>-1</sup>.



Obr. 1.18. Ukázka cívek mosazného a zinkem povlakovaného drátu.

Tab. 1.1 Označení typů drátů doporučené pro stroje Agie Charmilles. [10]

| Typ drátu        | Barva etikety | Ø v mm | Váha cívky [kg] | Délka [m] |
|------------------|---------------|--------|-----------------|-----------|
| Cobra Cut A      | Oranž.        | 0,10   | 1,6             | 23.500    |
|                  |               | 0,15   | 6               | 39.500    |
|                  |               | 0,20   | 25              | 57.500    |
|                  |               | 0,25   | 25              | 37.000    |
|                  |               | 0,30   | 15,7            | 25.800    |
| Cobra Cut D      | Hnědá         | 0,25   | 15,7            | 37.000    |
|                  |               | 0,30   |                 | 25.800    |
| Cobra Cut S      | Modrá         | 0,30   | 15,7            | 25.800    |
|                  |               | 0,33   |                 | 21.170    |
| Cobra Cut W      | Červená       | 0,25   | 15,7            | 37.000    |
| Brass (BercoCut) | Zrzavá        | 0,25   | 15,7            | 37.000    |
| Tungsten         | Modrá         | 0,03   | 0,3             | 5.000     |
| Tungsten         | Modrá         | 0,05   | 0,4             | 5.000     |
| SP Wire          | Stříbrná      | 0,07   | 0,4             | 5.000     |
| SP Wire          | Stříbrná      | 0,07   | 1,5             | 20.000    |

#### 1.4.4 Dielektrikum

Elektrický výboj probíhá v pracovním prostředí, které je nevodivé či polovodivé. Jako dielektrikum se nejčastěji používají strojní oleje, petrolej, destilovaná voda, deionizovaná voda, vzduch nebo solné roztoky.

Požadavky na vlastnosti dielektrika:

- chemická stálost a neutrálnost, zamezující vzniku koroze obrobku,
- dostatečně vysokou teplotu hoření, aby nedošlo ke vzplanutí,
- dobrá tepelná vodivost k zabezpečení ochlazování pracovního prostoru, elektrod a odebraných mikročástic,
- nesmí vznikat jedovaté výpary a zápach,
- lehce vyrobitelná a nenákladná,
- malá viskozita a dobrá smáčivost pro izolační obnovu v jikrové štěrbině po výboji,
- musí zabezpečit potřebnou vzdálenost mezi elektrodami, aby přechod proudu vyústil do výboje.

Pro WEDM se používá především deionizovaná destilovaná voda. Splňuje prakticky výše uvedené požadavky a její výroba je nenákladná. [1]

##### 1.4.4.1 Vlastnosti vody pro použití dielektrika

Používaná voda pro dielektrikum by měla splňovat následující kritéria:

**Neutrálnost** s hodnotou pH  $7 \div 8,5$ . Kyselost či zásaditost lze zjistit lakmusovým papírkem a upravit lze zředěným NaOH (hydroxydu sodného) a naopak silně zředěnou kyselinou octovou nebo fosforečnou.

**Chudá na soli**, zvláště obsahujících chlor (např. NaCl - chlorid sodný). Za normálních okolností vodivost během vyjiskřování stoupá, takže přidávání se stává zbytečným. Při vyšší vápenitosti vody, nebo vyšší hodnotě vodivosti ( $\geq 10 \mu\text{S/cm}$ ) se musí počítat s předdeionizačním systémem.

Tab. 1.2 Doporučené chemicko-fyzikální vlastnosti vody používané k přípravě dielektrika:

|                                       |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| vodivost                              | $< 10 \mu\text{S/cm}$ |
| chloridy Cl <sup>-</sup> : mg/l       | $< 20 \text{ mg/l}$   |
| sulfáty SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | $< 20 \text{ mg/l}$   |
| tvrdost Ca <sup>2+</sup>              | $< 120 \text{ mg/l}$  |

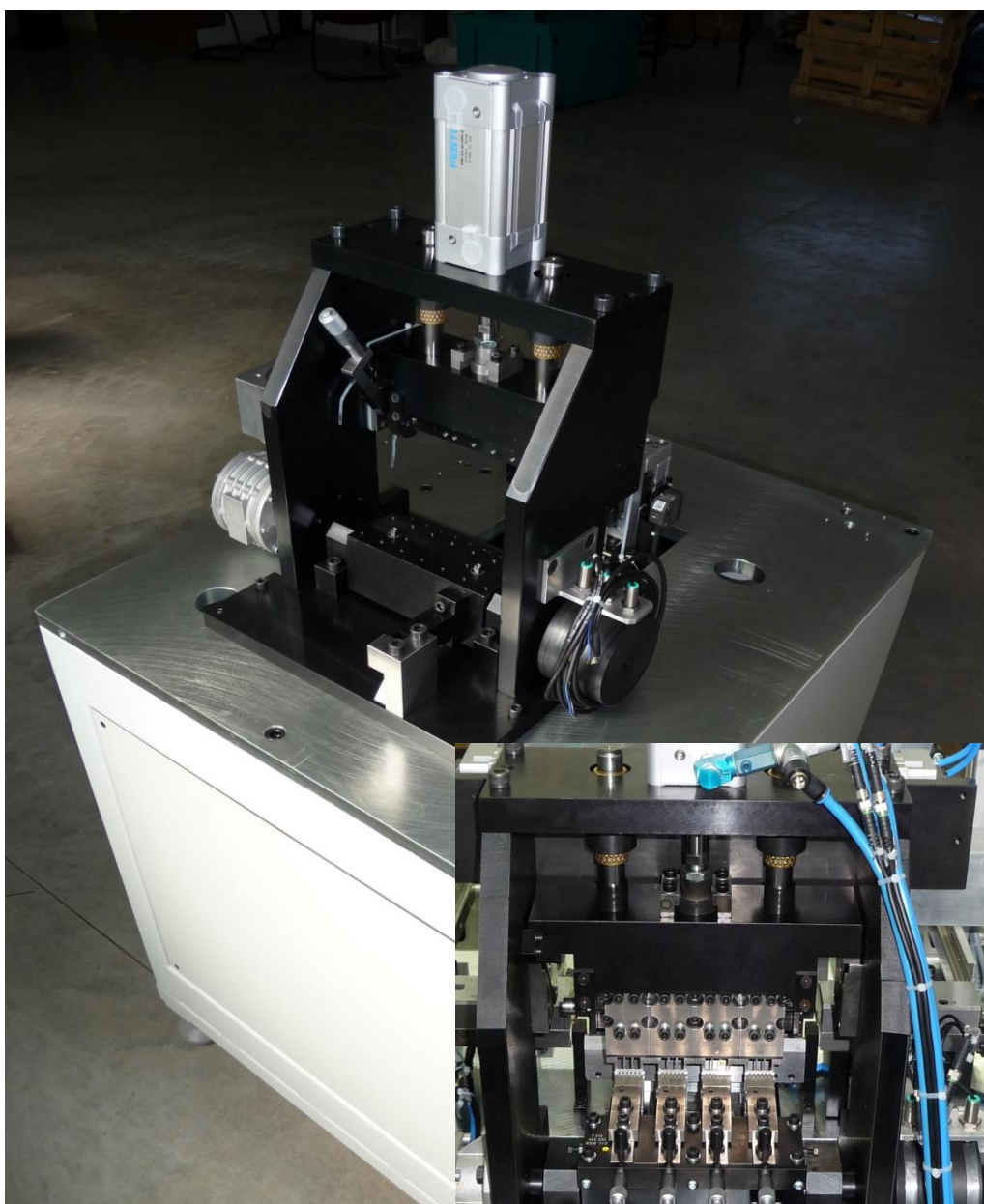
Při opracovávání oceli a tvrdokovů, při nichž dílce zůstávají delší dobu ve vodě, se zvyšuje nebezpečí koroze. Je proto doporučené použít antikorozi ochranné prostředky jakožto příměsi dielektrika, které nijak neovlivňuje jeho vodivost či hořlavost. Napomáhá též k odstraňování nečistot z obrobků a usazenin ve vaně řezačky.

Důležitá vlastnost vody je i její „Čistota“. Měla by se používat pouze pitná voda. Jestliže je zařízení napojeno na průmyslovou vodu, musí se připojit filtrování a předdeionizační systém. Zpravidla se používá pro pevné částice  $< 50 \mu\text{m}$ . [10]

## 2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY

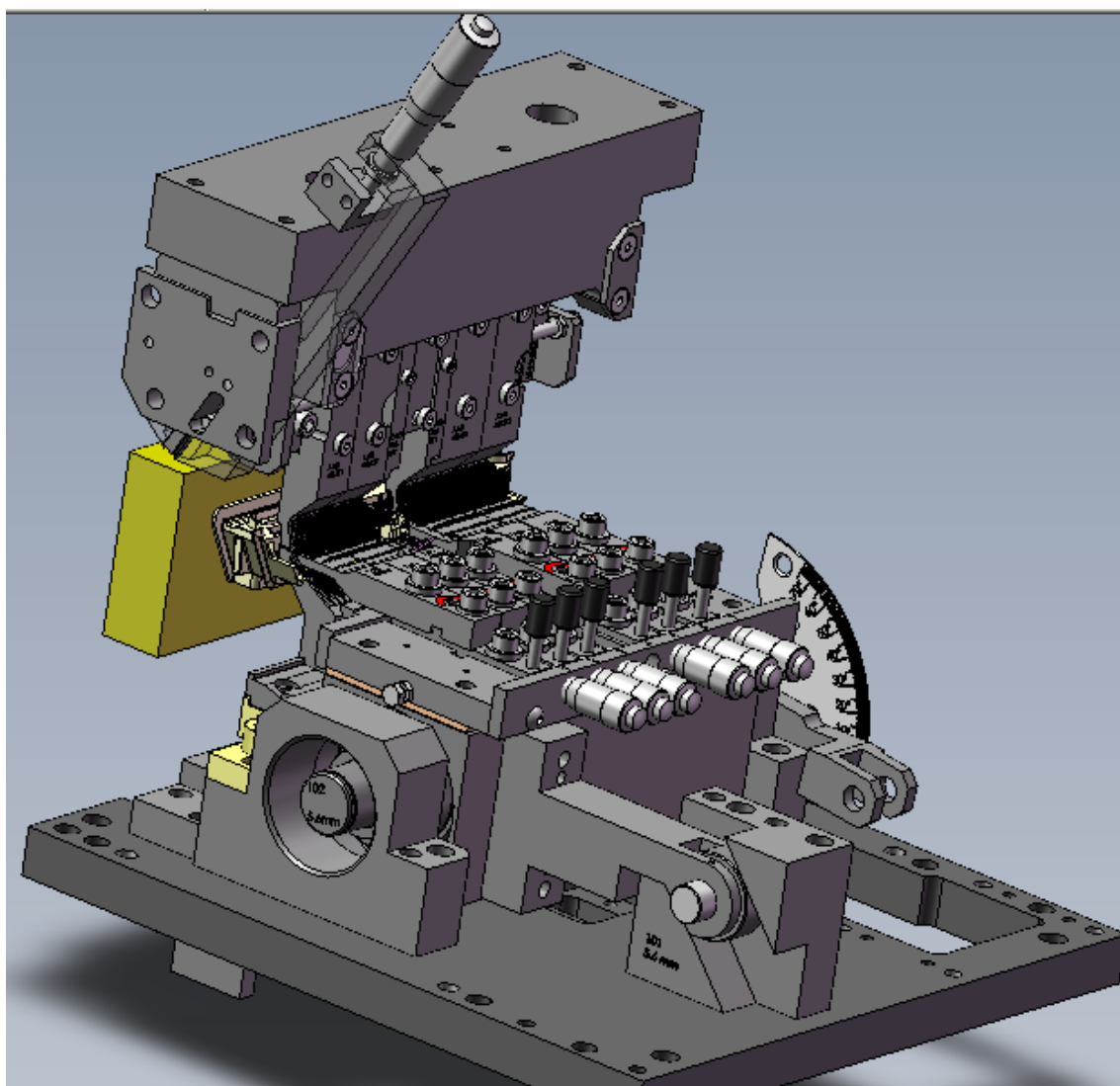
Za technologičnost konstrukce je považováno použití konstrukčních prvků s cílem co nejjednoduššího, nejefektivnějšího a nejekonomičtějšího výrobního procesu se zachováním požadovaných technických a funkčních vlastností součásti.

Každá ohýbací jednotka stroje (obr. 2.1) obsahuje kromě rámu a systému zajišťujícího vlastní pohyb i sestavu ohýbacích nástrojů, které jsou konstruovány podle typu konkrétního konektoru (obr. 2.3). Umístění, rozložení a počet konektorových pinů je daný požadavkem zákazníka. Pokud je konektor specifický, musí být specifická i řada ohýbacích jednotek (obr.2.2) umístěných v lince pro tento konektor. V této kapitole bude objasněna základní funkce dílců tří nejdůležitějších typů dílců ohýbací jednotky a jejich konstrukce.

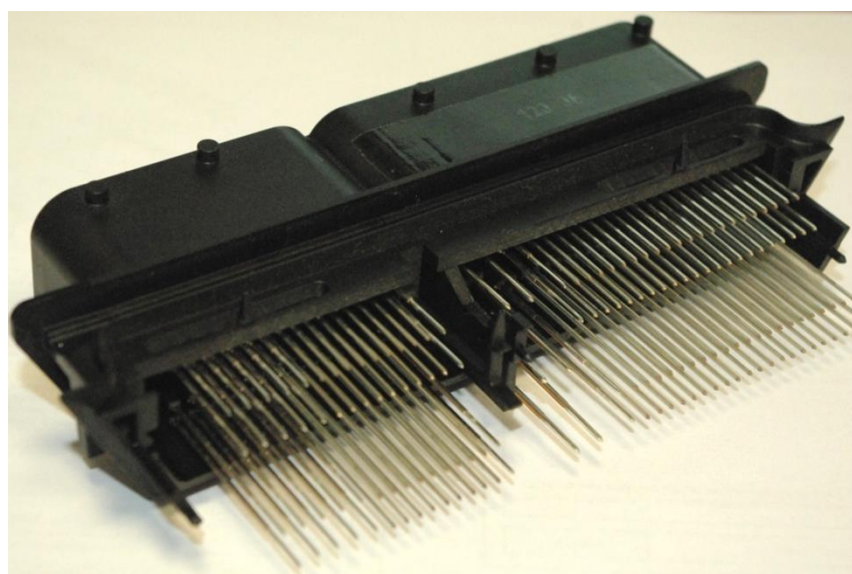


Obr. 2.1. Rám stroje - modul ohýbací jednotky jedné řady pinů.





Obr. 2.2. Ohýbací jednotka.

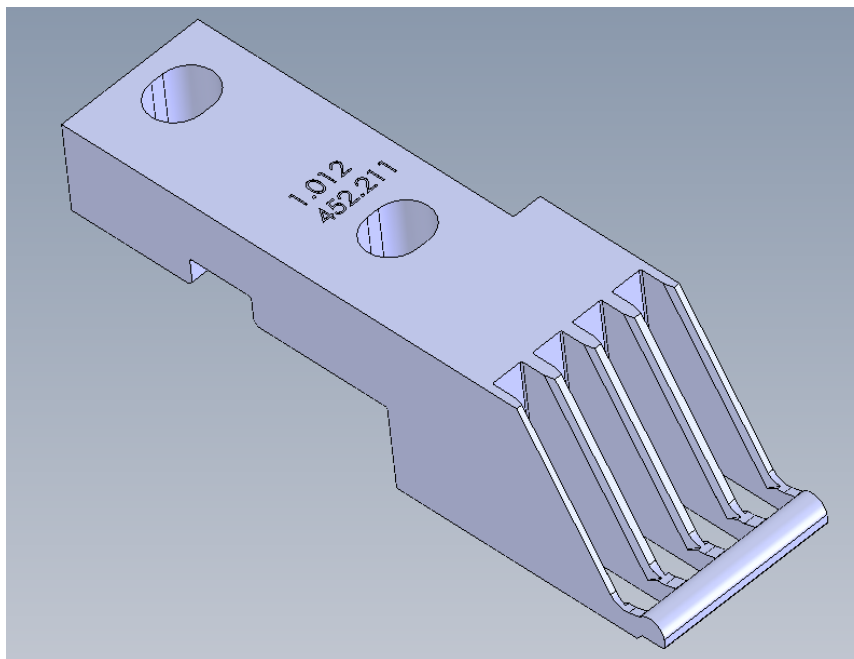


2.3 Konektor s řadami pinů před jejich ohybem.

## 2.1 Rozbor a funkce součástkové základny

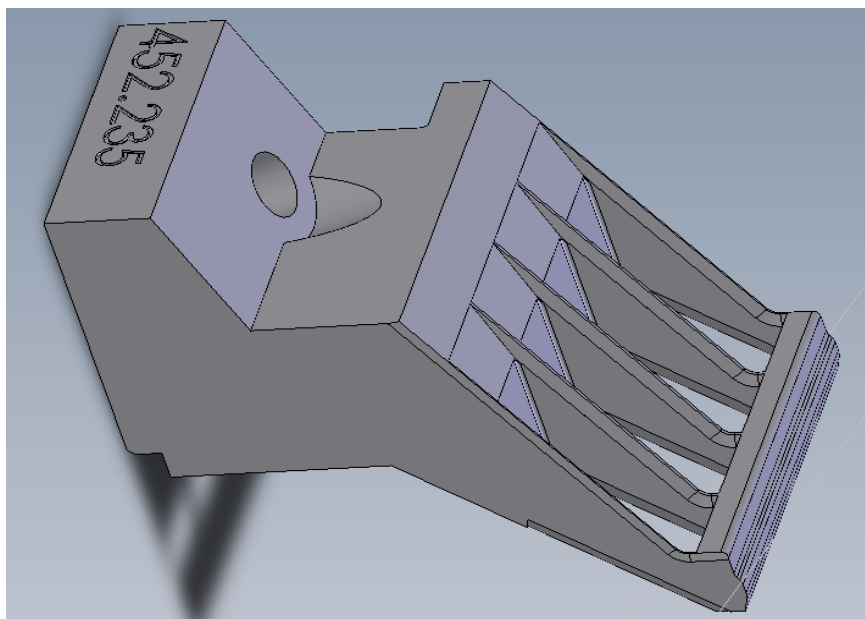
Pro ohyby pinů konektorů jsou důležité zejména tři typové představitelé dílců, jejichž funkce zde bude vysvětlena a znázorněna.

Prvním typem je dílec označovaný jako **vrchní přidržovač** (z něm. originálu Niederhalter), jehož ukázka je na obr. 2.4.



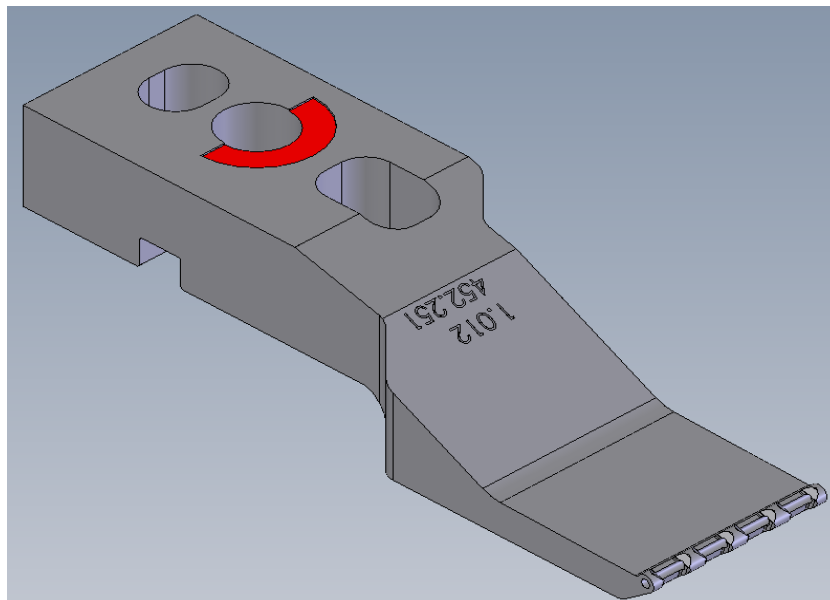
Obr. 2.4 Typický představitel vrchního přidržovače „Niederhalter“.

Tento společně s druhým typem, zvaným **protipřidržovačem** (z něm. originálu Gegenhalter) viz. obr. 2.5, jednotlivou řadu pinů před vlastním ohybem semknou, přidrží a polohují.

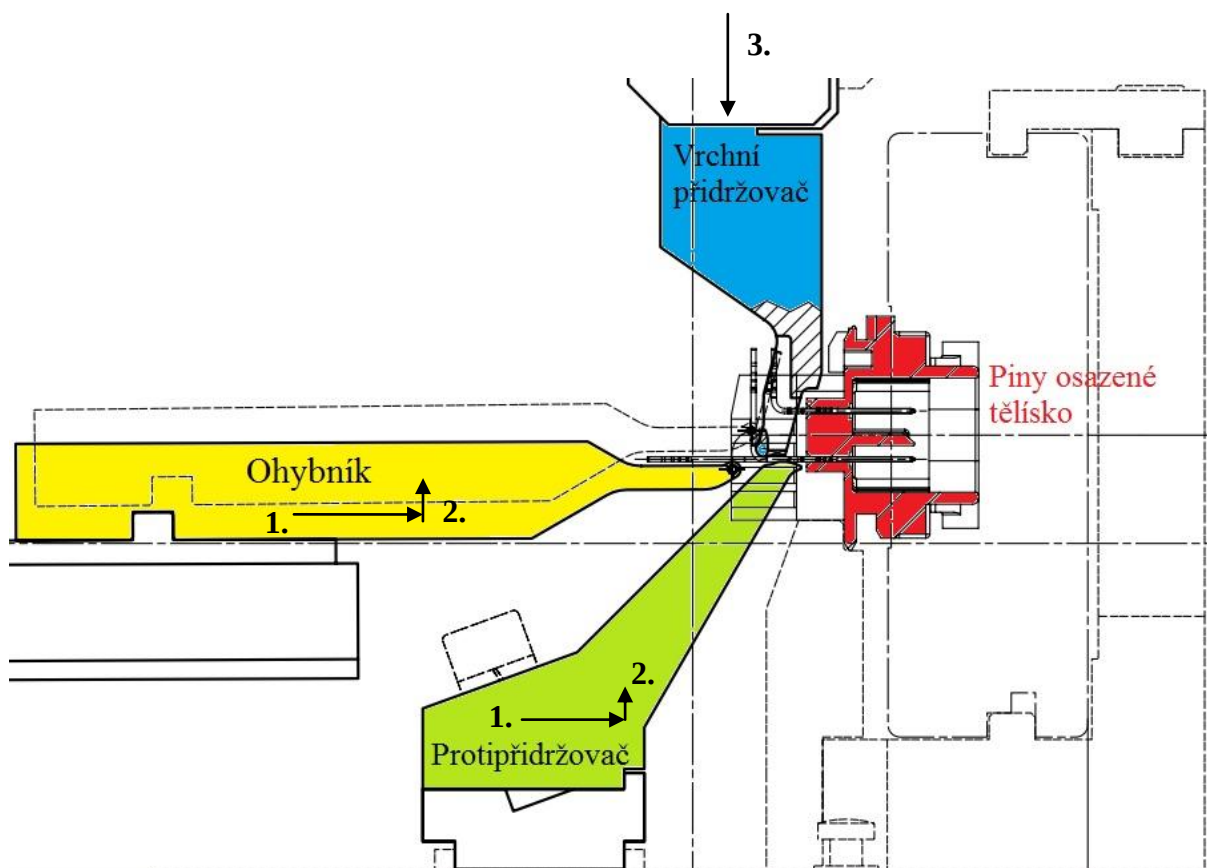


Obr. 2.5 Typický představitel protipřidržovače „Gegenhalter“.

Třetím typem dílce ohybové sestavy je **ohybník** (Biegenstempel) viz. obr. 2.6, který konkrétní řadu do požadovaného úhlu ohne. Princip přidržení a ohybu je znázorněn na obr. 2.7 a 2.8.



Obr. 2.6 Typický představitel ohybníku „Biegenstempel“.

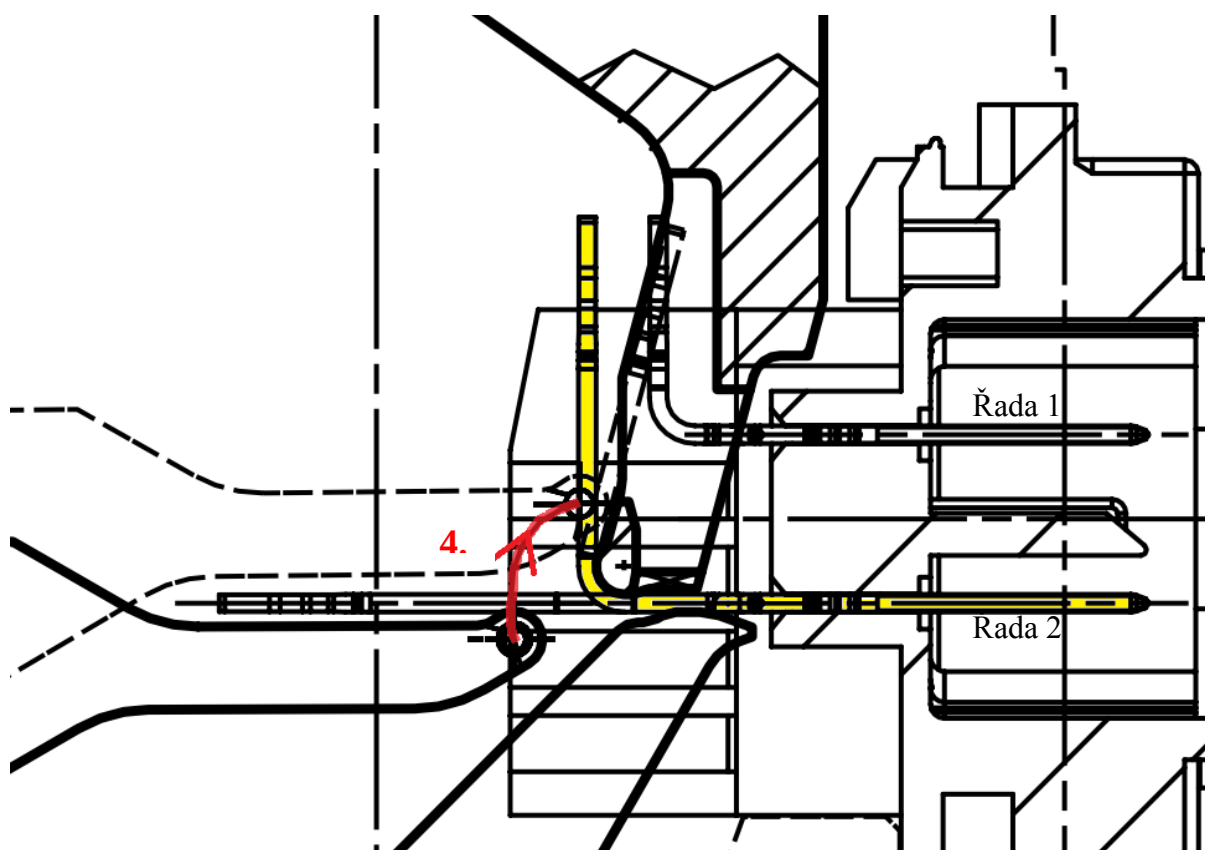


Obr. 2.7 Aretace pinu mezi přidržovači a ohyb pomocí ohybníku.



**Fáze pohybu elementů (obr.2.7.):**

1. Příjezd ohybníku a protipřidržovače ve vodorovném směru k pinu
2. Dojezd obou na dotek pinu
3. Příjezd vrchního přidržovače ve svislém směru a přítlak pinu
4. Vlastní pohyb ohybníku



Obr. 2.8 Detail ohybu jedné řady pinů konektoru.

Pro dráhu pohybu ohybníku, znázorněného na obr. 2.8 červeně je nutné vždy počítat v větším úhlem ohybu kvůli odpružení pinu.

V závislosti na složitosti konektoru, jeho počet řad pinů a ohýbaných úhlů, se odvíjí počet ohýbacích sad (jednotek ohybu). Pro jednu řadu pinů je nutná jedna ohýbací jednotka. Takto jich může být za sebou naskládáno několik s posloupností tak, jak je třeba řady po sobě ohýbat.

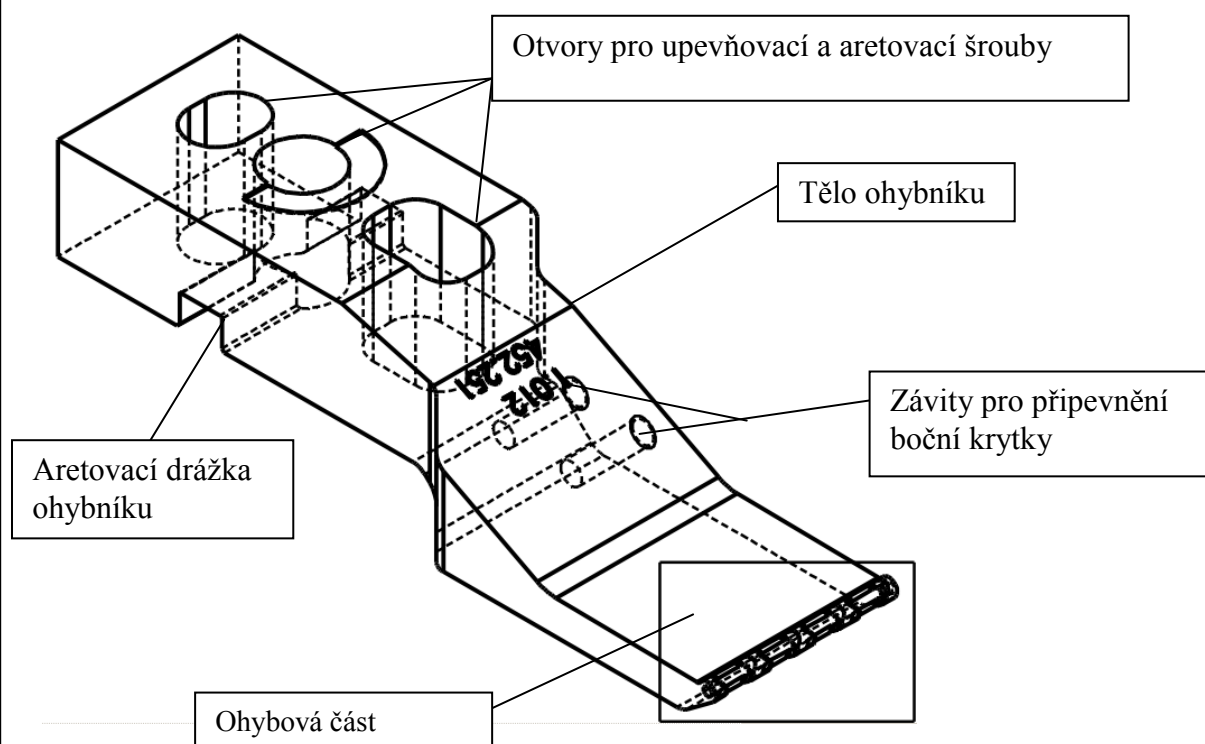
## 2.2 Konstrukční řešení jednotlivých součástí

### Biegenstempel

Otvory oválných drážek slouží k upevnění ohybníku pomocí šroubů k základové desce, která sadu ohybníku nese. V desce jsou ustavovací podložky s perem, které má pevně aretovat polohu ohybníku. Pero zapadá do přesné drážky. Mezi otvory pro šrouby k dotažení ohybníku se nalézá přesný tolerovaný otvor pro ustavovací excentrický kolík. Kolem tohoto otvoru se laserem gravíruje stupnice natočení excentrického kolíku, jehož vychýlením do požadovaného směru umožní seřízení polohy ohybníku vůči pinům konektoru. Je to jeden z několika nastavovacích prvků pro přesné zadání poloh funkčních částí ohybníků při ladění testovací série ohybů pinů konektoru.

Tvar těla daného ohybníku se odvíjí od umístění sousedících ohybníků (viz obr. 2.10), s nimiž ohýbá patřičnou řadu pinů právě vyráběného konektoru. Boční otvory se závity slouží pro připevnění bočního planžetového plechu, který brání vypadnutí kalené jehly procházející funkční ohybovou částí. Právě tato jehla přichází do kontaktu s pinem při ohybu a je při opotřebení snadno vyměnitelná. Každý ohybník, ale i oba typy přidržovačů mají své jedinečné číslo dle výkresu vždy vygravírované, aby nedošlo při montáži a demontáži k záměně.

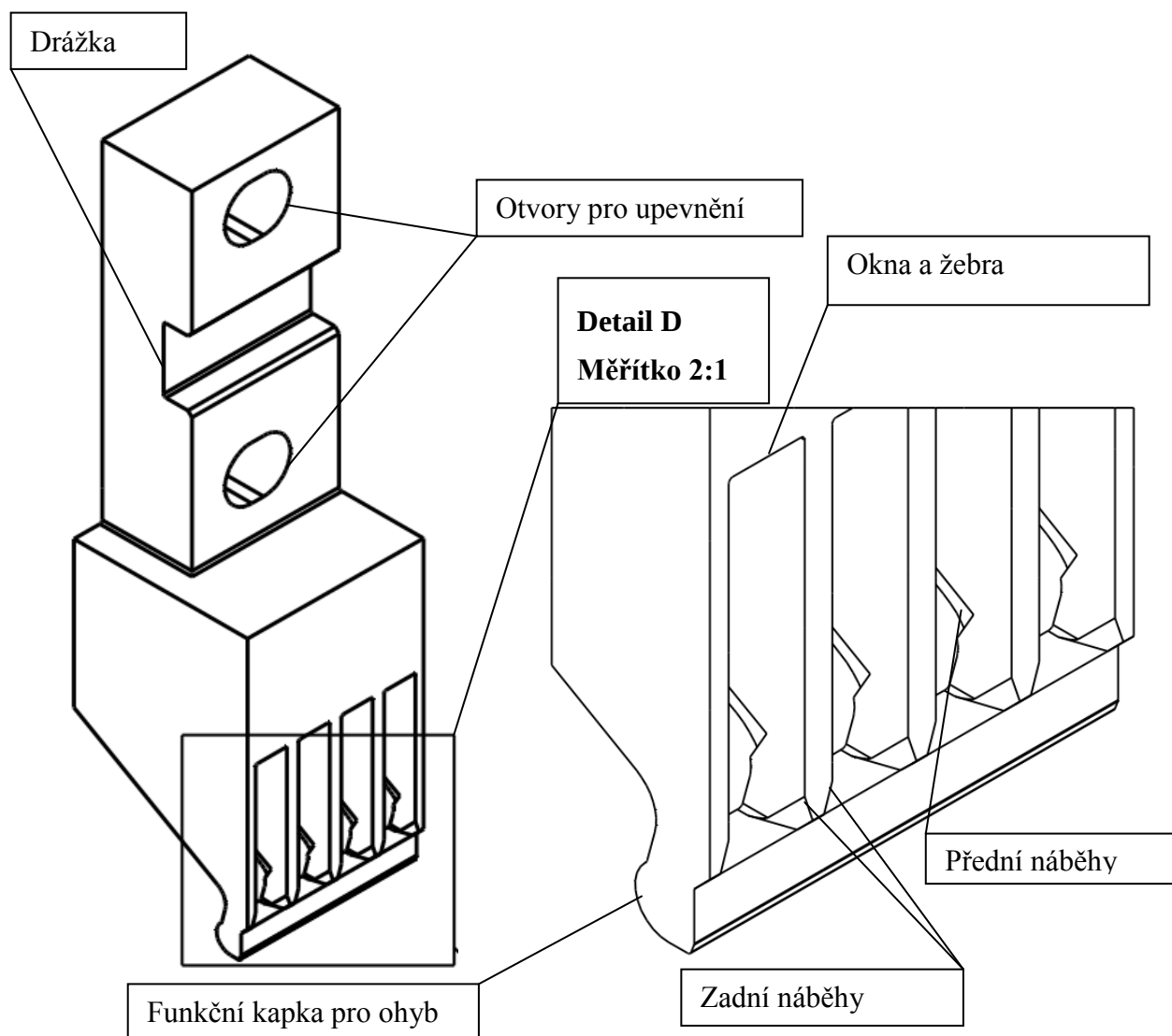
#### *Hlavní části ohybníku*





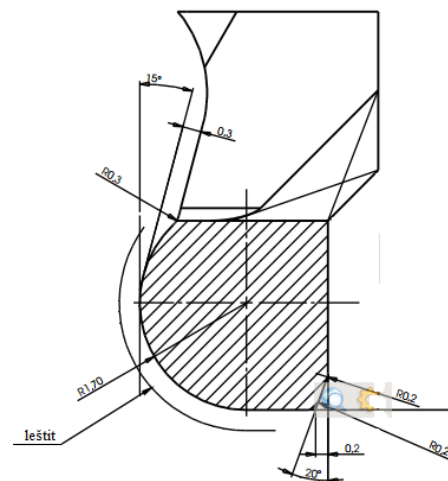
### Niederhalter

Stejně jako u ohybníku počet drážek na funkční části, tak i počet oken s náběhy u přidržovačů závisí na počtu ohýbaných pinů a jejich rozmístění na konektoru. Běžně se používá jedno okno pro ohyb dvou pinů vedle sebe. Přední náběhy slouží k navádění ohýbaného pinu do okna. Zadní náběhy napomáhají k vedení již ohnutých pinů předchozí řady.



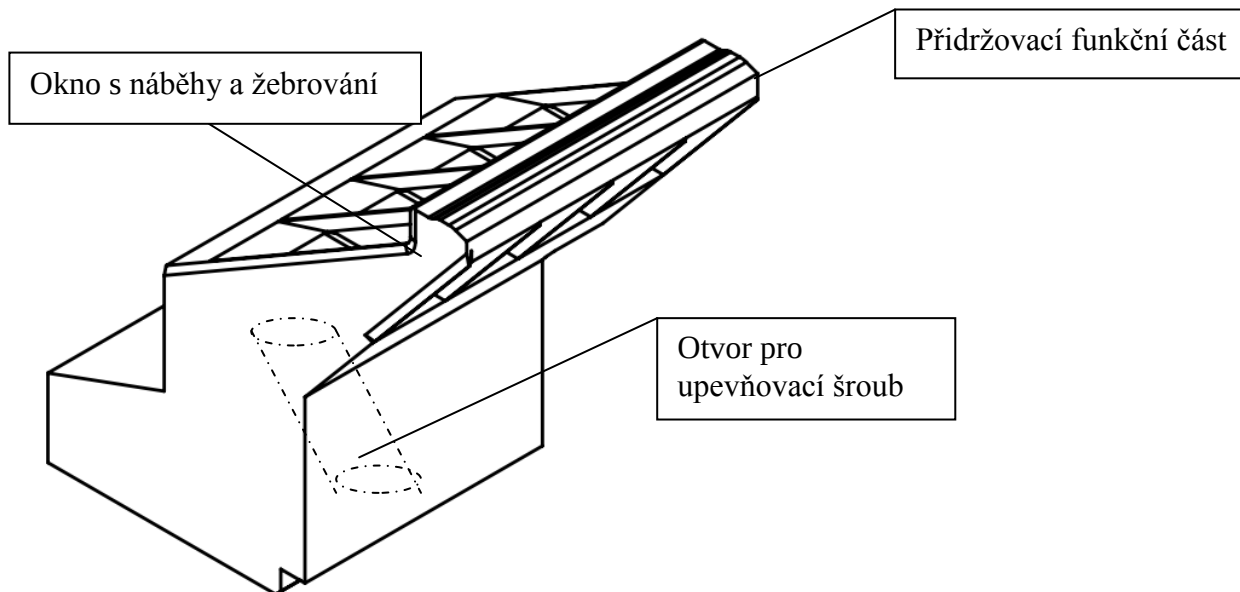
Obr. 2.11 Funkční části vrchního přidržovače.

Kapka na nose funkční části Niederhalteru, kolem níž se pin ohýbá, musí být leštěná s drsností Ra 0,4 a lepší. To napomáhá zvyšovat životnost dílce a také pomáhá k dobrému povrchu pinu po ohybu. Kružnice kapky je větší kvůli odpružení drátu. Zpravidla je počítáno s 15° přehybu pinu.

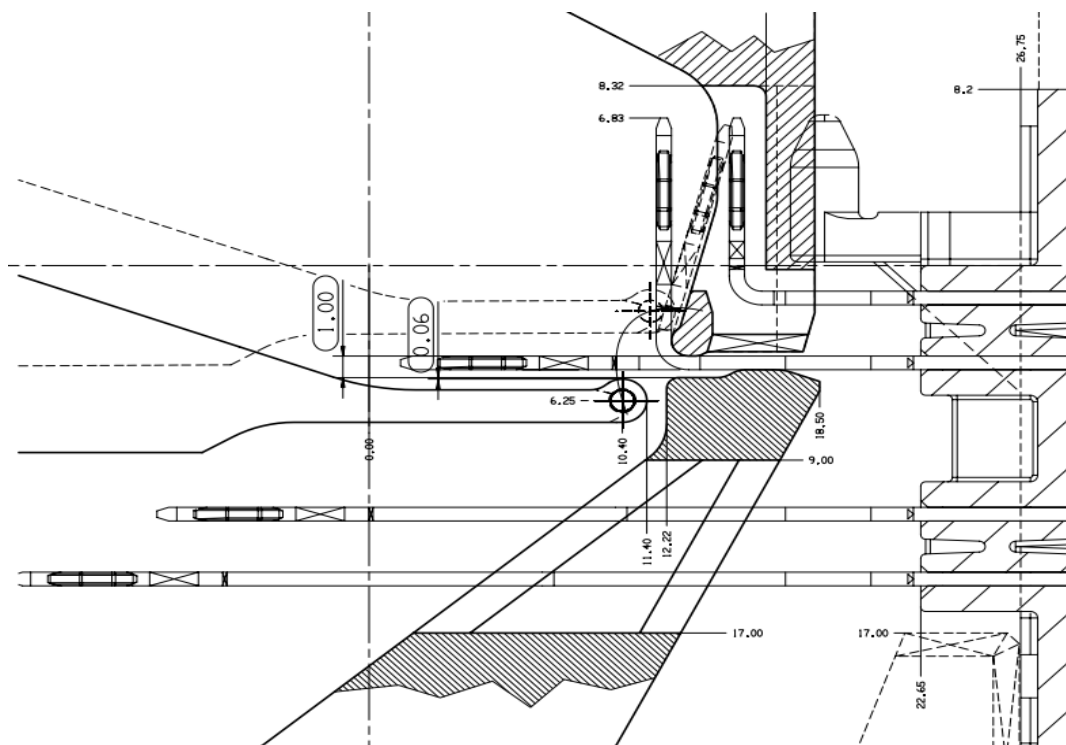


### Gegenhalter

Při postupu ohýbání jednotlivých řad konektoru je zapotřebí, aby přidržovače měly vždy přístup pod konkrétní ohýbanou řadu. To umožní konstrukční řešení přidržovačů. Z obrázku 2.13 je zřejmé, že pin z předchozí ohnuté řady je naváděn do kapsy Niederhalteru. U spodního přidržovače Gegenhalteru slouží okna k vyhnutí řad pinů, které ještě nebyly ohnuté a ohyb je čeká až v následujících krocích. Proto se tvary oken spodních přidržovačů znatelně velikostně mění. Při pohybu první řady bývá okno největší, protože musí pojmout všechny následující neohnuté piny. S dalšími řadami se zmenšuje a u poslední řady již okna nejsou potřeba.



Obr. 2.12 Funkční části protipřidržovače.



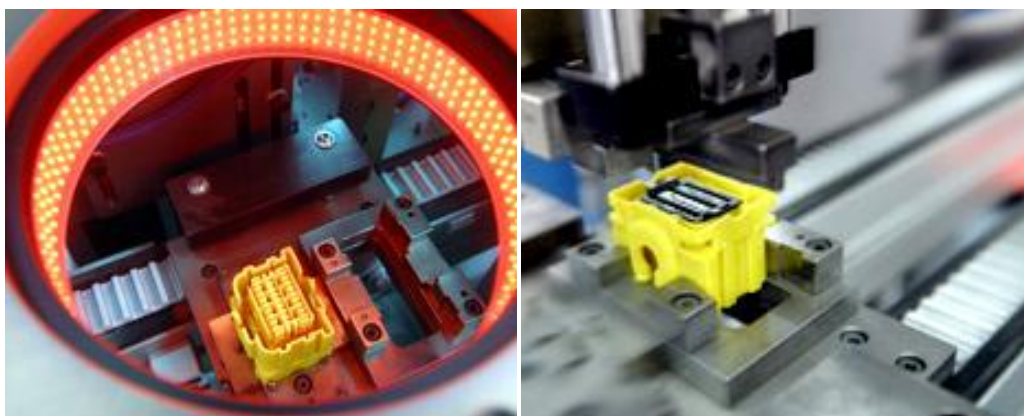
Obr. 2.13 Funkce oken u přidržovačů umožňující průchod pinů.

### 3 SOUČASNÝ STAV A VÝROBNÍ MOŽNOSTI VE FIRMĚ

#### 3.1 Představení firmy

Firma EBERHARD Automatizace s.r.o. v Jihlavě vznikla 1.2.2009 jako dceřinná společnost německé firmy Eberhard A.G., která má se sídlo ve Schlierbachu. Hlavní náplní pracovní činnosti bylo zpočátku koordinace výroby dílců v českých kooperacích, kontrola, balení a expedice dílců, dále montáž podsestav a celých zařízení. Postupně ve firmě přibýly nové stroje, což byl první krok k vlastní výrobní činnosti. V současné době má firma 12 stálých zaměstnanců a v letošním roce se plánuje další růst.

Firma se zabývá montáží i výrobou dílů pro montážní, osazovací, kontrolní automaty a poloautomaty popř. různé přípravky. Toto vše slouží pro výrobu a osazování konektorů a desek s tištěnými spoji pro automobilový, telekomunikační či jiný segment průmyslu, zabývající se připojením elektrického a informačního okruhu. Díky mateřské firmě jsou pak zařízení a systémy celosvětově distribuované a používané. Mezi největší zákazníky patří Siemens, Bosch a řada automobilových koncernů.



Obr. 3.1 Kontrolní (vlevo) a osazovací úsek (vpravo) linky na výrobu konektorů. [7]



Obr.3.2 Ukázka ohýbací části a koncového balícího automatu výrobní linky konektorů. [11]



### 3.1.1 Strojní vybavení firmy

Firma Eberhard Automatizace s.r.o. v Jihlavě je vybavena následujícími stroji:

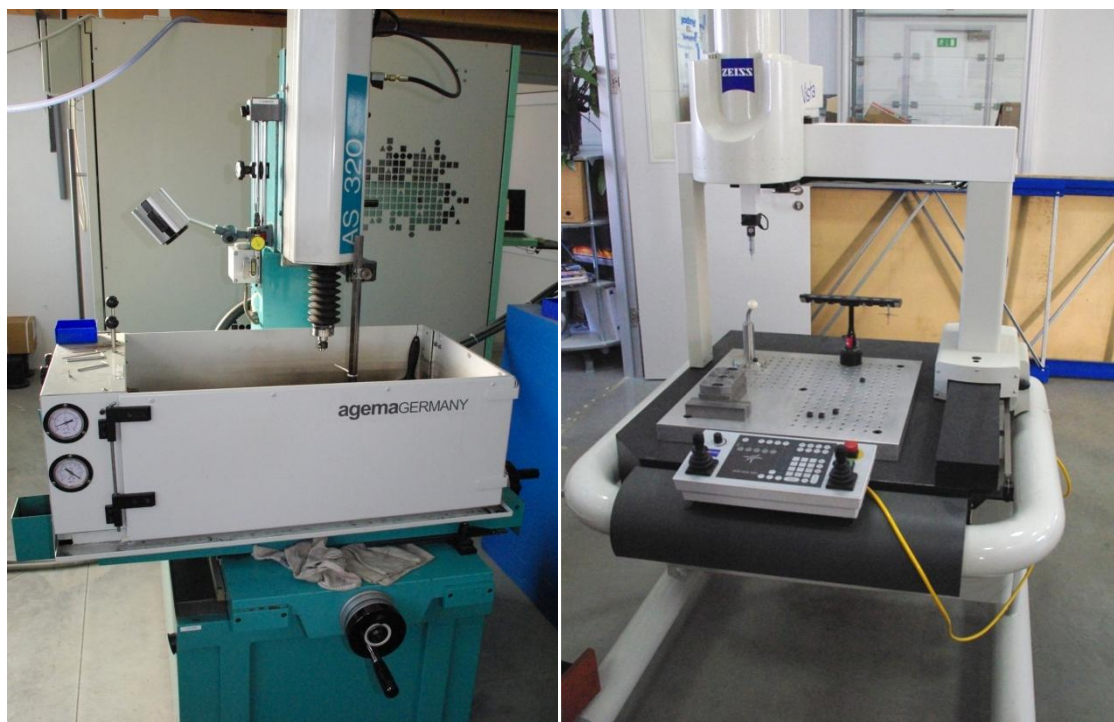
- 1 drátová řezačka AGIE Charmille CLASSIC 2 – zakoupena v r. 2011, cena 1,27 mil. Kč, úvěr 37.050 Kč po dobu 3 let, odpisová doba stroje 5 let
- 1 drátová řezačka AGIE Charmille PROGRESS V2 – zakoupena v r. 2012, cena 2,43 mil. Kč, leasing 40.803 Kč po dobu 5 let, odpisová doba stroje 5 let
- 1 elektroerozivní propalovačka otvorů AGEMA AS320
- 1 CNC tří-osé frézovací centrum HERMLE UWF902H
- 1 CNC pěti-osé frézovací centrum Micron UCP 600 VARIO
- 1 klasická NC frézka
- 1 bruska na plocho JUNG
- 1 sloupová vrtačka
- 1 rámová pila Kasto VBS 252
- 2 pískovačky Peenmatic 620S s různými velikostmi abraziva (kovové, balotinové kuličky)
- 1 měřicí přístroj 3D Zeiss



Obr.3.3 Elektroerozivní drátové řezačky AGIE CLASSIC 2 a AGIE AgieCut PROGRESS V2.

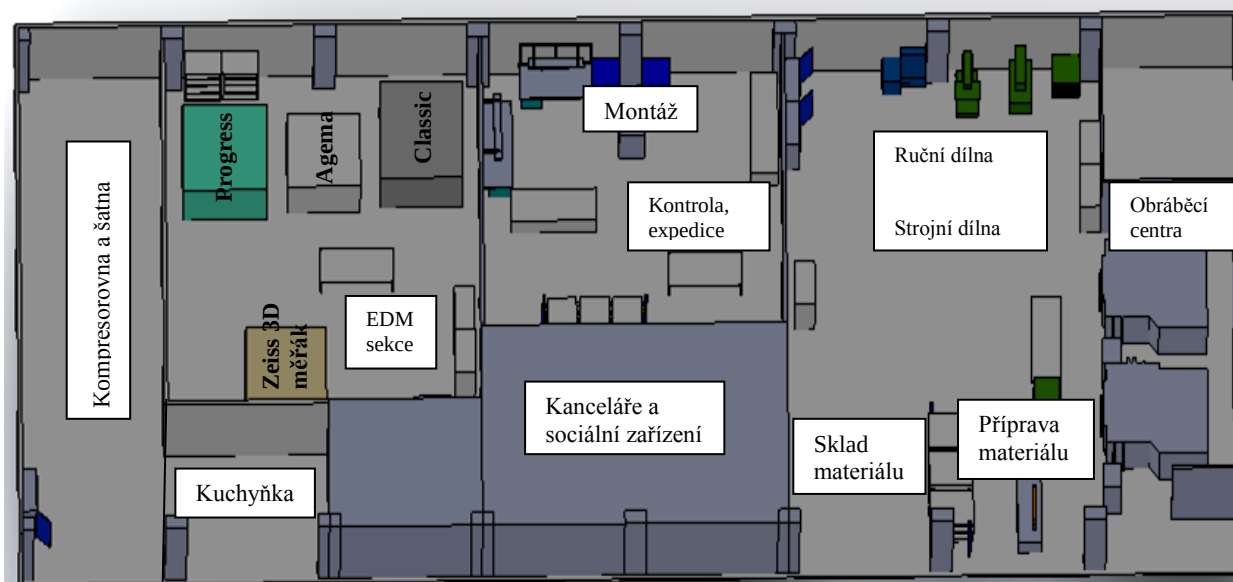
Drátové řezačky jsou ve firmě nejvíce využívány pro výrobu tvrdokovových matic, střížníků, ozubených planžetových koleček, hledáček a podložek, pro řezání přesných otvorů v kalených materiálech, atd.





Obr. 3.4 Propalovačka AGEMA a 3D měřicí přístroj značky Zeiss.

### 3.1.2 Rozmístění pracovišť firmy a WEDM strojů



Obr. 3.5 3D - Layout firmy Eberhard s.r.o. a rozmístění jednotlivých pracovišť.

Volba místa pro ustavení je pro přesný nástrojařský stroj velmi důležitá, neboť na tom závisí stupeň přesnosti opracovávaného dílce.

Zařízení AGIE řezaček by se neměly umisťovat v blízkosti strojů, které prostřednictvím fundamentu přenášejí chvění, protože to může zapříčinit ztrátu přesnosti a vyrovnaní stroje. Není-li žádná možnost vyhnout se takovýmto zdrojům chvění, musí se tyto zdroje ustavit na

aktivní izolaci proti chvění. [10] V tomto případě jsou však jiné výrobní stroje umístěné v dostatečné vzdálenosti na vedlejším výrobním segmentu.

Dodávku vzduchu zabezpečuje sekce kompresorovny, kde se nalézají i chladicí zařízení, které odvádí teplo vznikající od příkonu řezaček chladicí kapalinou a částečně se pohlcuje okolím.

Destilovaná voda se získává z vodovodního řádu přes destilovací a filtrační zařízení umístěné v montážní sekci. Stlačený vzduch o tlaku přibližně 6MPa je rozveden od kompresorovny skrz celou výrobní halu.

Uzavíratelnými dveřmi do vedlejší výrobní sekce je zabezpečena bezprašnost prostředí a omezení tepelného proudění. Pracovní teplotní podmínky jsou mimo letní období teoreticky udržitelné  $20^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$  za den. V létě je teplotu prostředí poměrně těžké bez použití klimatizační jednotky udržovat.

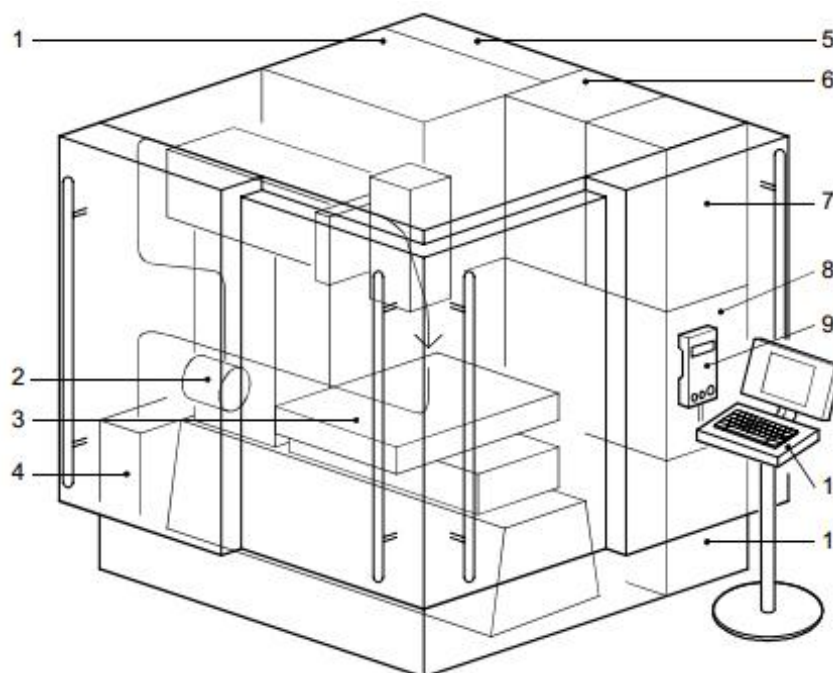
### 3.1.3 Rozhodovací koncepce pro pořízení WEDM strojů

Základní **důvody** pro pořízení WEDM strojů do firmy Eberhard Automatizace s.r.o. byly:

- vylepšení celkových kapacit mateřské firmy Eberhard AG,
- snížení externích služeb od externích dodavatelů, s tím související:
  - snížení doby dodání a splnění termínů,
  - zlepšení kvality a přesnosti,
  - snížení výrobních nákladů na nákladné komponenty stavěných strojů a linek,
  - pokrytí rizik pro případné neschopnosti externích dodavatelů.
- poptávka pokrytí kapacit řezání mezi českými zákazníky / dodavateli.

### 3.2 Základní popis zařízení a vybavení AGIE WEDM strojů

Stroj, generátor, řízení a dielektrický agregát tvoří jeden kompaktní celek. Umístění celého zařízení na jednom tuhém rámu zaručuje omezení vibrací a chvění.[12]



Obr. 3.6. Základní části AGIE WEDM stroje. [10]

|                              |                                                                                                                                               |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Impulzní generátor        | Tento generátor dodává vybíjecí proud a reguluje vyjiskřovací proces.                                                                         |
| 2. Systém drátu              | Zahrnuje: Odvíjecí cívku, systém přivádění drátu do pracovního prostoru, likvidaci drátu a jednotku pro rozstřihávání drátu.                  |
| 3. Pracovní prostor          | Vybavený podložkami, na které se pokládá a upíná dílec                                                                                        |
| 4. Zásobník použitého drátu  | Zde se použitý drát, vypadávající ze stříhacího zařízení drátu shromažďuje.                                                                   |
| 5. Řízení os                 | Elektronické prvky, které řídí pohyby os.                                                                                                     |
| 6. Napájení                  | Jednotka pro připojení na elektrickou síť.                                                                                                    |
| 7. Numerické řízení          | Provádí výpočty, potřebné pro pohyby os.                                                                                                      |
| 8. Agregát dielektrika       | Zahrnuje: filtrační systém, deionizaci, chlazení, čerpací jednotku a rozdělování dielektrika                                                  |
| 9. Ruční ovládací panel      | Umožňuje obsluze zadávat určité příkazy v bezprostřední blízkosti pracovního prostoru.                                                        |
| 10. Ovládací konzola obsluhy | Na této konzole obsluha plánuje, připravuje a spravuje požadované práce.                                                                      |
| 11. Zásobník dielektrika     | Rozdělen do jedné sekce pro znečištěné dielektrikum (přicházející od pracovního prostoru) a čisté dielektrikum (určené pro pracovní prostor). |

### 3.2.1 Vedení drátu a řízení WEDM strojů

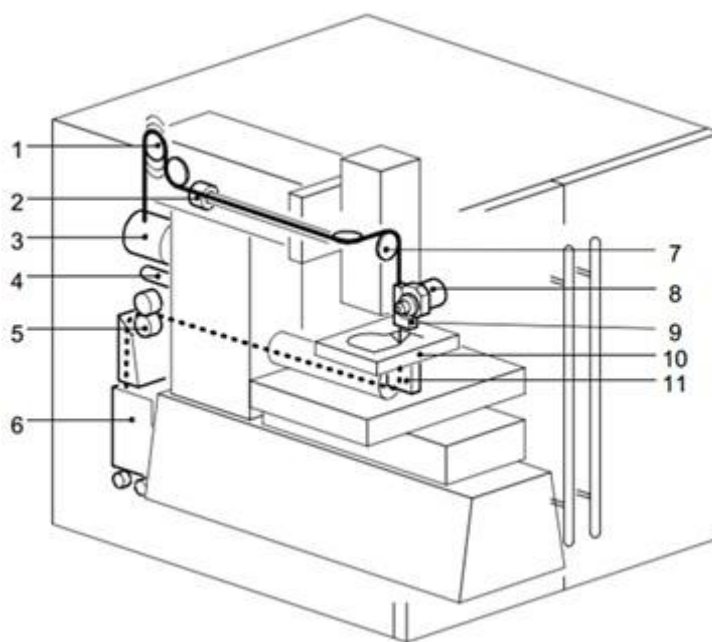
Při procesu řezání mohou od výbojů a tlakem vyplachujícího dielektrika vznikat amplitudy vychýlení drátu až  $10\mu\text{m}$ , což může způsobovat zkraty, neproduktivní čas, snížení řezné rychlosti, zvýšení šíře řezu a nepřesnosti. Důležitým faktorem je proto způsob vedení, předepínání drátu a přesnost řízení.

#### Systém vedení drátu

Vedení drátové elektrody zajišťuje soustava vedení drátu, která zabezpečuje plynulé vedení od cívky k místu řezání skrz řezací hlavu a následně do zásobníku použitého drátu.

Drát vytahovaný z cívky je veden kolem unášecí kladky, která prostřednictvím motoru reguluje odvíjecí rychlost cívky. Jeho rychlost je se zpravidla pohybuje  $120 - 200 \text{ mm.s}^{-1}$ . Pomocí nasávacího vedení se začátek drátu nasaje a je veden přes odkláněcí tělesa, jejichž kladky umožňují lehký chod až do pracovního prostoru. V pracovním prostoru se drát ovíjí kolem brzdového kolečka, zajišťujícího napětí drátu udané řídicím systémem. Nakonec veden přes horní a dolní vodící hlavu a automaticky dále k odtahovacímu zařízení a sekačce drátu [10]

- 1 Unášecí kladka
- 2 Nasávací vedení
- 3 Nová cívka drátu
- 4 Motor cívky
- 5 Odtahovací zařízení drátu a sekačka drátu
- 6 Zásobník použitého drátu
- 7 Odkláněcí těleso
- 8 Brzda
- 9 Horní vodící hlava
- 10 Dílec
- 11 Dolní vodící hlava



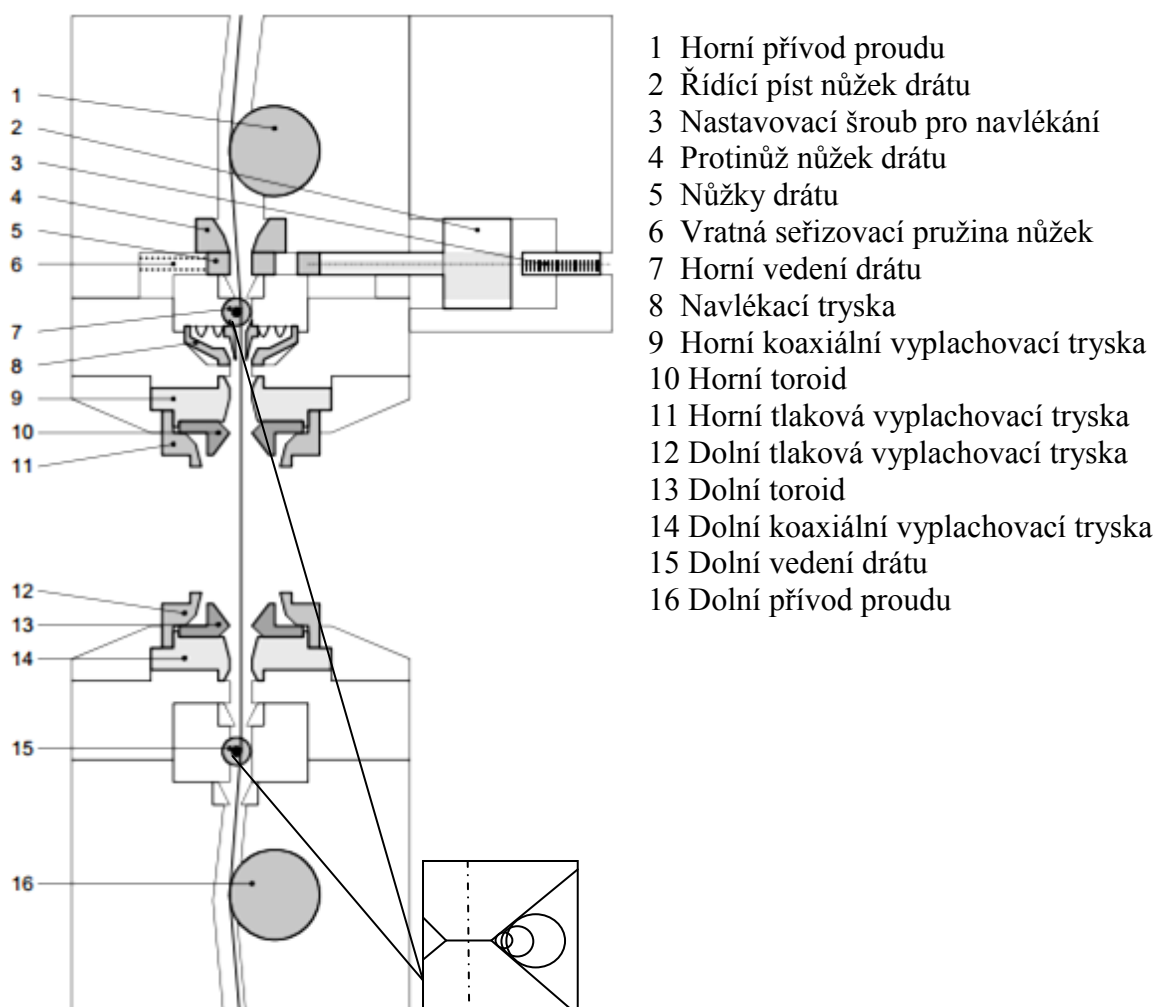
Obr. 3.7. Základní části systému vedení drátu. [10]

Pro všechny průměry drátu od 0,1 do 0,33 mm se používá pouze jedno tzv. kombinované vedení drátu (detail obr. 3.8), které se navíc vyznačuje dlouhou životností. Vysokou autonomii provozu při řezání velkých obrobků mimo pracovní dobu, přes noc či o víkendu zaručuje spolehlivé navlékání drátu.[12]

Pro podmínky bezobslužného provozu stroje byly vyvinuté podpůrné funkce elektroerozivních řezaček. Dnešní stroje jsou již vybavovány systémem automatického navlékání drátu s využitím proudu dielektrické kapaliny pro jeho navedení.

### Vodící hlavy

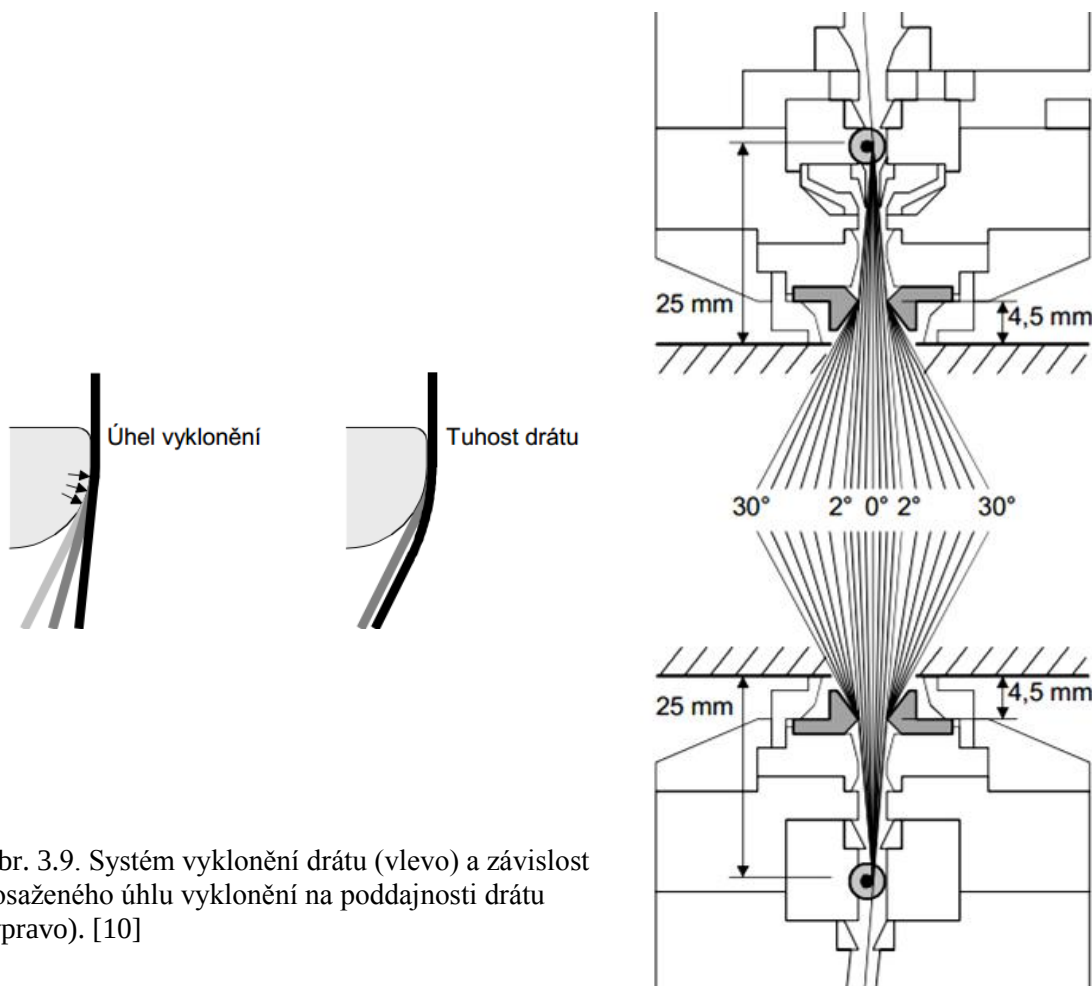
Úloha vodících hlav spočívá kromě přesného a spolehlivého vedení drátu v zabezpečení proudového napájení drátu a zajištění vyplachování řezu. Horní vodící hlava má kromě toho za úkol drát zastříhávat a navlékat.



Obr. 3.8. Schéma horní a dolní vodící hlavy a detail kombinovaného vedení. [10]

Pro řezání úkosů se hlavy vůči sobě vychylují. Až do kónicity  $2^\circ$  je drát veden oběma horními a dolními vedeními drátu. Od  $2^\circ$  do  $30^\circ$  přebírají tuto funkci toroidy, které jsou umístěny blíže k dílci. Je zřejmé, že úhel vyklonění drátu je závislý na tuhosti a ohebnosti drátu. Obr. 3.9.

Numerické řízení provádí veškeré potřebné výpočty pro polohování os X, Y, U a V, přičemž se bere zřetel na přemístění vodících bodů. Dále se vypočítává dotykové místo mezi drátem a toroidem, jakož i různé prohnutí drátu v závislosti na průměru a materiálu. [10]



Obr. 3.9. Systém vyklonění drátu (vlevo) a závislost dosaženého úhlu vyklonění na poddajnosti drátu (vpravo). [10]

### Řízení a řídicí systém stroje

Řízení CNC vypočítává přejížděcí souřadnice os a posílá je k řízení os (obr. 3.10), které je dále zpracovává, aby každá osa obdržela příslušné odpovídající příkazy.

Všechny osy jsou ovládány bezkartáčovými dynamickými střídavými servomotory. Tento pohyb se přenáší prostřednictvím zubového řemenu ke vřetenu s kuličkovým uložením. V současnosti se tyto pohony čím dál častěji nahrazují lineárními pohony, které netrpí kuličkovým opotřebením a vůlemi a tudíž jsou přesnější.

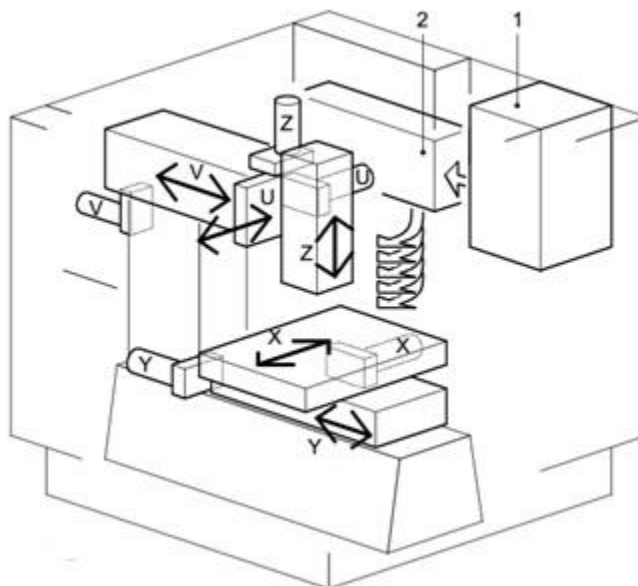
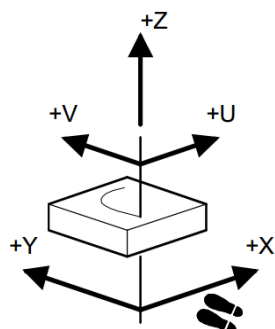
Impulzní generátor vysílá k proudovému přívodu horní a dolní hlavy impulzy s amplitudou určenou použitou technologií.

K vybití dochází mezi drátem a dílcem s opačnou polaritou. Servořízení reguluje rychlost posuvu podle velikosti štěrby mezi drátem a dílcem: je-li příliš velká, zvětšuje se posuv, je-li příliš malá, posuv se zmenšuje. Tato štěrbina se měří ve spodní vodící hlavě a tyto údaje se posílají k servořízení. Toto je kvantifikuje a vede je dále k interpolátoru, který sám odesílá souřadnice jednotlivých pohybů k řízení os. [10]



1 Řízení CNC

2 Řízení os



Obr. 3.10. Řízení a jednotlivé pracovní osy stroje. [10]

Řídicí systém stroje Agievision podporuje obsluhu stroje ve všech pracovních krocích, při programování, seřizování i při vlastní erozi. Po zadání kvality opracování, geometrických rozměrů a druhu materiálu se z databáze technologií vyberou příslušné technologické parametry. Jednotlivé řezy včetně hodnot korekcí jsou pak automaticky vygenerovány. Různé moduly softwaru jsou schopny sledovat proměnné podmínky eroze přímo na obrobku. Zabraňuje se tak vzniku chyby v rádiusech a rozích, automaticky se upravuje výkon při proměnné výšce řezu. [12]

### 3.2.2. Okruh dielektrika

Pro dosažení dobré přesnosti a povrchu obrobku je nutné, aby byly plynné a pevné odpady z místa řezu odstraněny a nebránily tak vzniku výboje zachytáváním izolačních vrstev na nástroji či obrobku. Proto je nutné zajistit efektivní vyplachování z místa řezu a obnovu dielektrika.

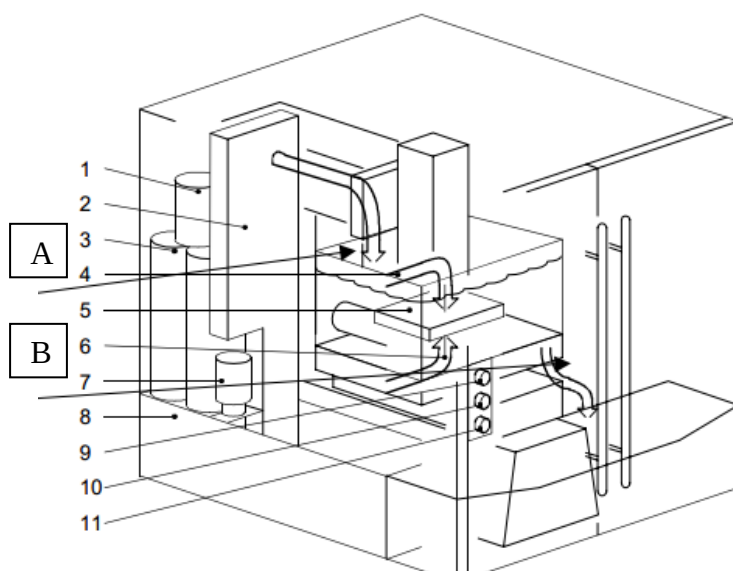
Proto jsou stroje vybavené deionizačními láhvemi, filtračními patrony. Dielektrikum je dopravováno čerpadly ze zásobníku čistého dielektrika do místa řezu. Odtokem putuje do zásobníku použitého dielektrika, odkud je čerpadlem vedena k filtrům. Větší částice, především vznikajících při hrubovacích procesech s vyššími výkony, se usazují ve formě kalu ve filtrační nádobě a jemnější se filtrují přes filtrační kazety. Dalším čerpadlem je přefiltrované dielektrikum hnané k deionizování skrz pryskyřici, která zabezpečuje obnovu předepsané vodivosti dielektrika. Pro stabilizování teploty obrobku je nutné chlazení kapaliny pomocí chladicího zařízení.



Tlakové vyplachování je možné provádět z horní vodící hlavy a pomocí dolní vodící hlavy je možné provádět tlakové nebo odsávané vyplachování.

Elektrojiskrové opracovávání se může provádět s použitím lázně nebo bez. [10]

- 1 Zásobník deionizační pryskyřice
  - 2 Ventily vyplachování a chlazení
  - 3 Filtrační patrony
  - 4 Vyplachování v horní vodící hlavě
  - 5 Dílec
  - 6 Vyplachování v dolní vodící hlavě
  - 7 Filtrační a deionizační čerpadlo
  - 8 Nádrž s dielektrikem
  - 9 Kohout AGIEDUOFLUX
  - 10 Kohout vyplachování Qo v horní vodící hlavě
  - 11 Kohout vyplachování Qu v dolní vodící hlavě
- A – plnění pracovní vany a cirkulace  
B – vyprazdňování pracovní vany



Obr. 3.11. Schéma okruhu dielektrika. [10]



Obr. 3.12 Papírové filtry a deionizační láhev s kuličkami pryskyřice.

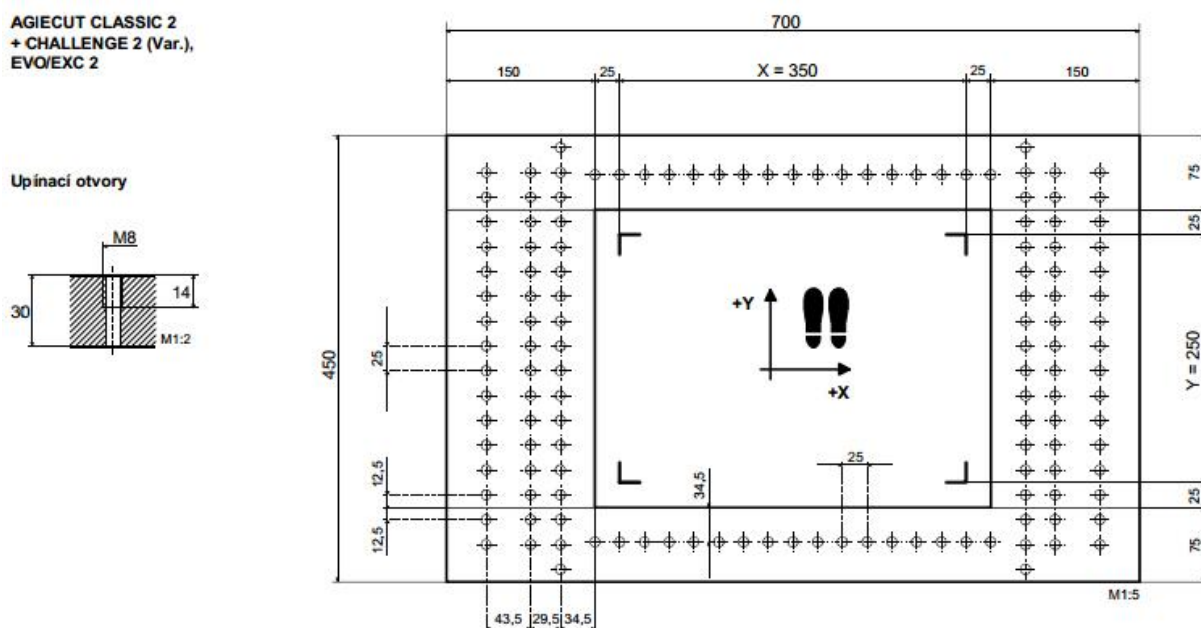
### 3.2.3. Výbava strojů a upínání

Upínací prostředky zabezpečují hlavně stabilitu obrobku proti síle proudu dielektrika a vlastní váhy. Tuhost obrobku je spojena pak s přesností výsledného řezu.

Upínací prostředky se volí dle tvaru a rozměru polotovaru, jeho hmotnosti a možnosti upínání. Standardní běžné upnutí lze provést přímo na stůl pomocí základní upínací sady (upínky, podložky, upevňovací šrouby či prostavce šroubů pro vyšší dílce). Používat lze též paletový systém pro snadnou výměnu obrobku pro snižování ztrátových časů při upínání a snížení nákladů s přípravou upnutí mimo stroj na externím pracovišti. Pro větší a těžší kusy se používají univerzální lišty a rámy.

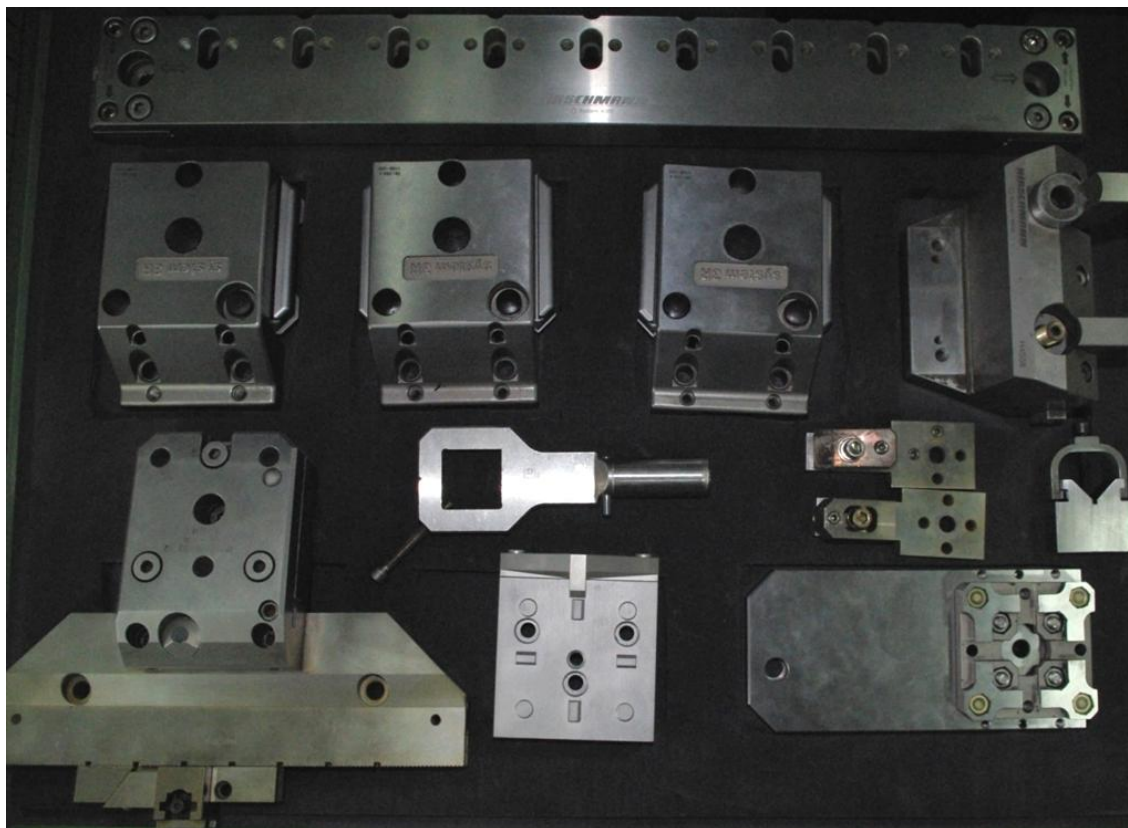
Upínače držáku využívá obsluha jak manuálních s ručním dotažením šroubů, tak pneumatických s centrálním silovým působením se zajišťovacími západkami proti vypadnutí v neutažené poloze. Na něj se upíná paletka se svěrákem. Ty mohou být i prizmové pro upnutí rotačních dílců, vertikální výškově nastavitelné pro různé tloušťky obrobků nebo univerzální.

Upínací rám AGIE dovoluje připevnění dílce přímo na jeho upínací lišty pomocí závitů M8 a dodávaných upínek (obr. 3.13). Upínací otvory jsou kompatibilní se všemi běžnými upínacími prostředky výrobců Mecatool, EROWA, 3R, Hirschmann. [10]



Obr. 3.13 Upínací stůl a jeho rozměry pro stroj AGIE Classic 2. [10]

Ve firmě jsou používány systémy upínání 3R, Hirschmann plus vlastní přípravy a upínky. Ukázka na obr. 3.14.



Obr. 3.14. Příklady výbavy upínání systému 3R, Hirschmann. [10]

### 3.3 Srovnání parametrů AGIE WEDM strojů

AGIE PROGRESS V2 je výkonnější následovník AGIE CLASSIC 2. Technická specifikace obou strojů je v příloze č. 5.

U AGIE PROGRESS je možno využívat i novou technologii generátoru eCut. Tou lze jedním přesným řezem dosáhnout kvality povrchu až  $Ra = 0,8 \mu m$  a díky tomu je oproti technologii s hlavním řezem a dokončovacím řezem dvakrát rychlejší. Pro povrchy s  $Ra = 0,2$  až  $0,7 \mu m$  se díky přesnému řezu snižuje počet dokončovacích řezů a tím snižuje spotřebu drátů a filtrů a tím i provozních nákladů. Se standardními dráty se dosahuje u většiny výšek řezu vyšších výkonů řezání od  $350$  do  $500 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$  než je tomu u AGIE Classic 2. [13]

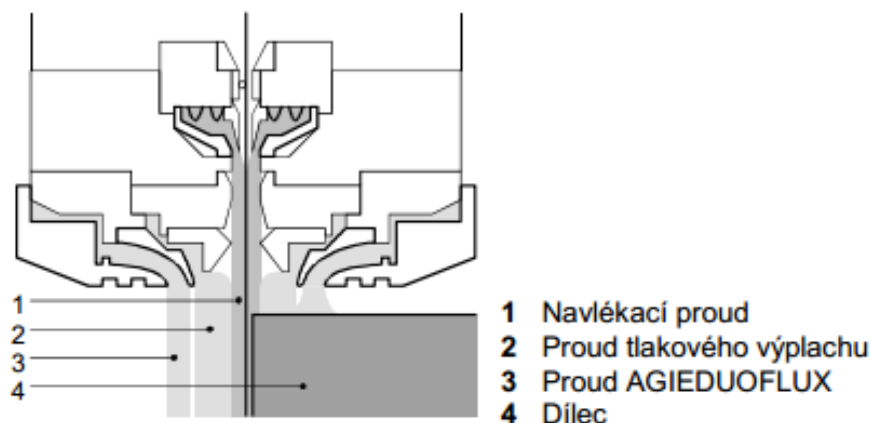
Porovnání základních parametrů strojů je uvedeno v tabulce 3.1.

Tab. 3.1. Porovnání parametry strojů AGIE WEDM. [14]

| Základní údaje                              | Agie Classic 2                   | AGIE AgieCut Progress V2              |
|---------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| systém výplachu                             | sprcha, <b>koaxiální výplach</b> | s <b>vodní lázní</b> nebo sprchou     |
| rozjezdy os X/Y/Z                           | 350x250x256 mm                   | 350x250x256 mm                        |
| rozměr obrobku X/Y/Z                        | 750x550x250 mm                   | 750x550x250 mm                        |
| počet řízených os                           | 5                                | 5                                     |
| váha obrobku                                | 450 kg                           | 450 kg                                |
| max.úhel náklonu/při výšce                  | 30°/100 mm                       | 30°/100 mm                            |
| průměr drátu                                | 0.2-0.33 mm                      | <b>0.1-0.33 mm</b>                    |
| max. $R_a$                                  | 0.45 $\mu\text{m}$               | <b>0.3 <math>\mu\text{m}</math></b>   |
| $T_{km}$ tvarová tolerance                  | + - 6 $\mu\text{m}$              | + - <b>3 <math>\mu\text{m}</math></b> |
| výkon (d 0.33/ocel 50mm)                    | 300m <sup>2</sup> /min           | > <b>400m<sup>2</sup>/min</b>         |
| CNC řízení                                  | AGIE VISION                      | AGIE VISION 3                         |
| generátor                                   | AGIE HSS                         | AGIE IPG + <b>eCUT</b>                |
| Spotřeba el. energie v pohotovostním režimu | <b>9 kW</b>                      | 12,8 kW                               |
|                                             | integrováný agregát dielektrika  | integrováný agregát dielektrika       |
|                                             | externí chlazení                 | externí chlazení                      |
| Cena nového stroje                          | 120.000,- EUR                    | 175.000,- EUR                         |

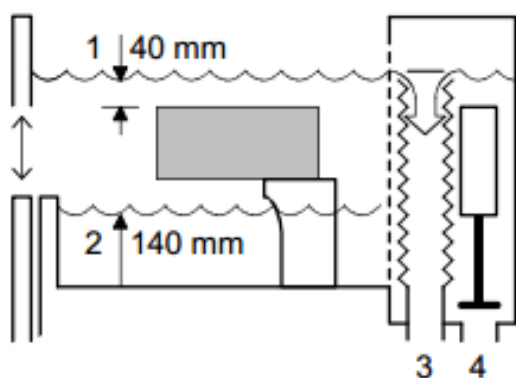
### Systém výplachu

Classic 2 používá systém výplachu AGIEDUOFLUX, který kombinuje výhody EDM bez zaplavení (jednodušší konstrukce, tudíž menší náklady na údržbu a pokles neproduktivního času) s výhodami strojů s dobrým výplachem. AGIEDUOFLUX utváří nízkotlakou dielektrickou obálku, která obklopuje drát a zajišťuje nucený výplach. Průměr proudu a průtok je takový, že zajišťuje dobré vyplachování dokonce i v obtížných případech (nepravidelné povrchy, vysoce kónické detaily a přístupy z prostoru mimo obrobek).



Obr. 3.15. Schéma koaxiálního výplachu AGIEDUOFLUX. [10]

Řezačka typu PROGRESS má kombinovaný výplach a je již vybavena pracovní vanou a systémem zaplavení viz. obr. 3.16, tudíž lze na ní řezat obrobek zcela ponořený ve vodní lázni. To umožňuje lepší chlazení obrobku a stabilizaci odvodem tepla roztažnosti materiálu obrobku, lepší výplach a zaplavení v mezeře, omezuje stříkání dielektrika v pracovním prostoru. [10]



- 1 Pracovní hladina
- 2 Hladina tepelné stability
- 3 Přepadový odtok (hladina a výpust)
- 4 Výpust vany

Pracovní hladina 1 během vyjiskřování se nastavuje automaticky na 40 mm nad dílec.

Hladina tepelné stabilizace 2 se nachází pod dílcem a používá se při seřizování a přípravných operacích. Automaticky se jí dosáhne, když se při plné vaně zadá příkaz pro spuštění vany.

Rozdílné hladiny se regulují prostřednictvím výpustě měchového provedení 3 a kontrolují se plovákem.

Vyprazdňování vany se provádí snížením měchové výpustě 3 a současným otevřením výpustě 4.

Obr. 3.16. Princip napouštění a vypouštění lázně v pracovním prostoru vany. [10]

### Systém odměřování posuvu stolu

U Agie Progress se již pro odměřování posuvu a odečítání polohy v jednotlivých osách používají skleněná pravítka se stupnicí. Tento způsob je přesnější než odečítání polohy v krokových servomotorech jako je tomu u Classicu.

## 4 HODNOCENÍ MOŽNOSTÍ SOFTWARE PEPS

PEPS software od výrobce Camtek je obsáhlý CAD/CAM software rozdělený na jednotlivé aplikace podle zvolené specifické technologie (drátové řezání, 3D a 2,5 D frézování, soustružení, řezání laserem a vodním paprskem, děrování a stříhání, vlastní SolidCut CAD modul pro tvorbu či úpravu geometrie ploch a těles, další přídavné moduly např. SolidElectrod pro tvorbu hloubicích elektrod a NC programu, CAMMAN 3.5 - správa NC programů a výkresů, Peps modul pro ozubená kola, soustružnické tvarové nože, pro vačky a zvláštní makra).

Pro tuto práci se však zaměříme jen na software PEPS pro drátové řezání.

### 4.1. Drátové řezání PEPS Verze 7.0

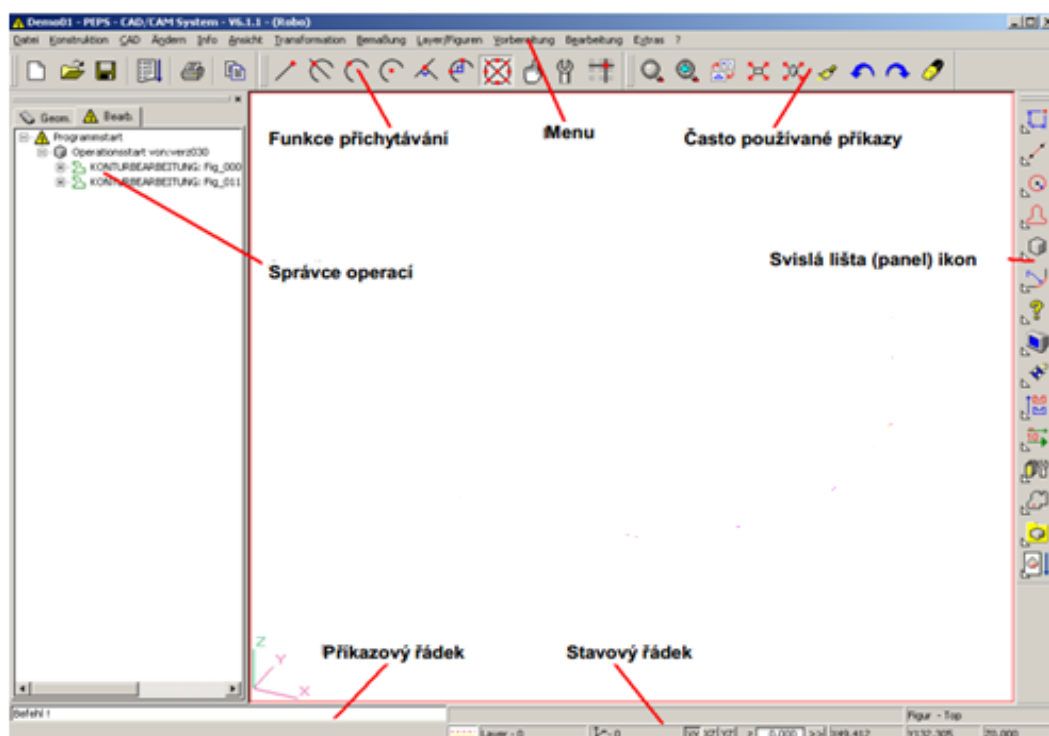
Modul PEPS Drátové řezání byl vyvinut ve spolupráci s významnými výrobci strojů a obsahuje postprocesory pro většinu běžně se vyskytujících se strojů. Software je kompatibilní s operačními systémy Microsoft Windows XP, Windows Vista, Windows 7. Modul drátového řezání je vybaven rozsáhlou paletou funkcí např.:

- Komfortní ovládání systému a rychlý přístup ke všem podstatným datům obrábění pomocí plně integrovaného manažeru operací,
- Obrábění na 3D plochách a Solid modelech,
- Automatické rozpoznání a obrobení drátem obrobitelných ploch,
- Projekční asistent k automatickému vytváření projekční geometrie pomocí 3D křivky a úhlu nebo pomocí dvou 3D křivek a synchronizačních přímek,
- Fotorealistická simulace včetně upínek,
- Simulace včetně posunutí dráhy a zobrazení drátku, kontrola kolize,
- Automatický výpočet dráhy nájezdu a výjezdu,
- Automatické navlečení a přestřižení drátku,
- Automatické najetí na pozici,
- Automatický výpočet výchozího bodu,
- Konstantní a proměnný úkos,
- Řezání přímkových ploch,
- Kontrola za řezem,
- Šikmé řezání včetně projekce do referenční roviny,
- Řezání válcových kapes a kapes s úkosem s libovolnou geometrií výjezdu,
- Kyvadlový řez (dokončování ve štěrbině řezu),
- Automatické oddělení vypadávajících částí,
- Trojúhelníkový můstek,
- Vícebodový můstek,
- Posunutí části kontury,
- Proměnná referenční výška,
- Databáze technologií pro všechny běžné typy strojů,
- Generování podprogramů,
- Technologie najetí a vyjetí,
- Objektově orientovaná definice obrábění,
- Změna geometrie a obrábění jednoduchým kliknutím myši,
- Obráběcí strategie jsou kompletně složité,
- Automatická tvorba grafického seřizovacího listu .



#### 4.1.2. Uživatelské rozhraní:

Prostředí softwaru Peps pro drátové řezání je uživatelsky příjemné a rychle naučitelné. Základní jeho části jsou uvedené na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Popis obrazovky PEPS V 7.0 drátové řezání.

**Menu:** Roletové menu se používají pro volání příkazů

**Svislá lišta ikon:** Výklopná lišta (panel) ikon jako alternativa k volání příkazů

**Často používané příkazy:** Tato lišta ikon se používá pro často používané příkazy

**Správce operací:** Zde jsou uloženy příkazy obrábění a 3D geometrie

**Funkce přichytávání:** Slouží ke zjištění souřadnic v rámci grafického zobrazení

**Příkazový řádek:** Oblast zobrazuje dotaz na příkaz

**Stavový řádek:** Zobrazuje informace, které se mění v závislosti na volaném příkazu

Také lze doplnit lištu ikon dle vlastní potřeby o další příkazy, nebo definovat jak bude prostředí graficky znázorněné. Může měnit barvy a typy tvarů konstrukčních geometrie, pozadí grafického editoru, zobrazení pomocných grafik (osových křížů, rozměrů) a definovat zobrazení 3D modelů.



#### 4.1.3. Ovládání grafického zobrazení

Pomocí myši je možné ovládat grafické zobrazení použitím levého tlačítka myši a rolovacího kolečka (pro přiblížení či oddálení). Jednoduchým způsobem provádět otáčení a posunování grafického zobrazení pomocí levého tlačítka myši. Za tímto účelem je grafické okno vnitřně rozděleno do 5 svislých pruhů. Podle toho, do kterého pruhu se klikne levým tlačítkem myši a pohybuje se nahoru či dolů, provádí se různé operace změny grafického zobrazení.

Pracovní plochu je možné rozdělit ze zobrazení jednoho okna do zobrazení čtyř oken různých pohledů dílce a jeho promítání.

#### 4.1.4. Přednastavení NC výstupu

V systému PEPS lze individuálně nastavit NC výstup pro každý EDM stroj, což je velmi důležité, protože existují rozdílné typy řízení od různých výrobců. V možnostech lze proto nastavit a uložit konfiguraci postprocessoru dle typu řízení se zohledněním specifických strojních cyklů.

Lze také nastavit, zda má být k souboru NC dat doplňkově vygenerován soubor se seřizovacím listem a souborem startovních otvorů.

#### 4.1.5. Pomocné funkce a moduly

Program disponuje mnoho funkcemi a rozšiřitelnými moduly, které pomáhají zefektivnit práci obsluhy a proces obrábění. Některé z nich jsou zde uvedeny:

##### **AUTO matrice/razník**

Definováním otvorů (např. podle barev či průměrů) systém vyhledá všechny tyto výchozí otvory, jejich polohu a sestrojí automaticky obráběcí figury.

##### **Automatické rozpoznávání vlastností pomocí modulu Wire Expert**

Wire Expert analyzuje naimportovaný 3D model konstrukčního dílu, rozpozná plochy vhodné k elektroerozivnímu obrábění drátem a vytvoří návrh obrábění. Automaticky vytvořené obrábění může uživatel dodatečně a bez jakýchkoliv omezení změnit, rozšířit a optimalizovat.

##### **Funkce pro bezodpadové řezy**

S využitím možnosti bezodpadového řezu (kapsové řezání) lze odstranit geometrie pomocí takzvaného rozrušovacího řezu, takže nevznikne žádný vyříznutý díl, protože je postupně odjískřen. Tento způsob obrábění se používá zejména u malých vybrání a otvorů, nebo při použití čtyřosého rozrušovacího řezu u tvarově složitých trojrozměrných odpadů špatně vyjmutelných z řezu.

Je možné odstraňovat i otevřené kontury. Pomocí výběru začáteční a koncové polohy se definují oblasti jedné geometrie, jež budou automaticky odstraněny rozrušovacím řezem. Funkce tohoto dílčího odstranění odpadu je vhodná pro vyšší využití stroje v nočním provozu, protože odstraní nutnost ručního zajišťování malých vypadávajících částí.

## 4.2. Tvorba programu v softwaru PEPS V 7.0 modulu drátového řezání

V podstatě lze program vytvořit dvěma způsoby a to buď přímo nakreslením kontur dílce, nebo pomocí CAD-rozhraní importováním geometrie a dat z připravených elektronických podkladů (výkresu, modelu). Na začátku práce se musí zadat do systému určité informace, jako např. číslo dílu a specifikaci materiálu.

### 4.2.1. Tvorba programu z dxf výkresů a modelů:

Načtení souboru Cad uloženého na disku se provede přes funkci import/export dat. Tím se načte výkres do prostředí Peps.

Mezi **podporované formáty** patří DXF, DWG, IGES, STEP, XMT, ProE, Catia Version 4+5, Unigraphics Solidworks, Inventor HiCad, Solid Edge, Rhino Gerber, Daveg).

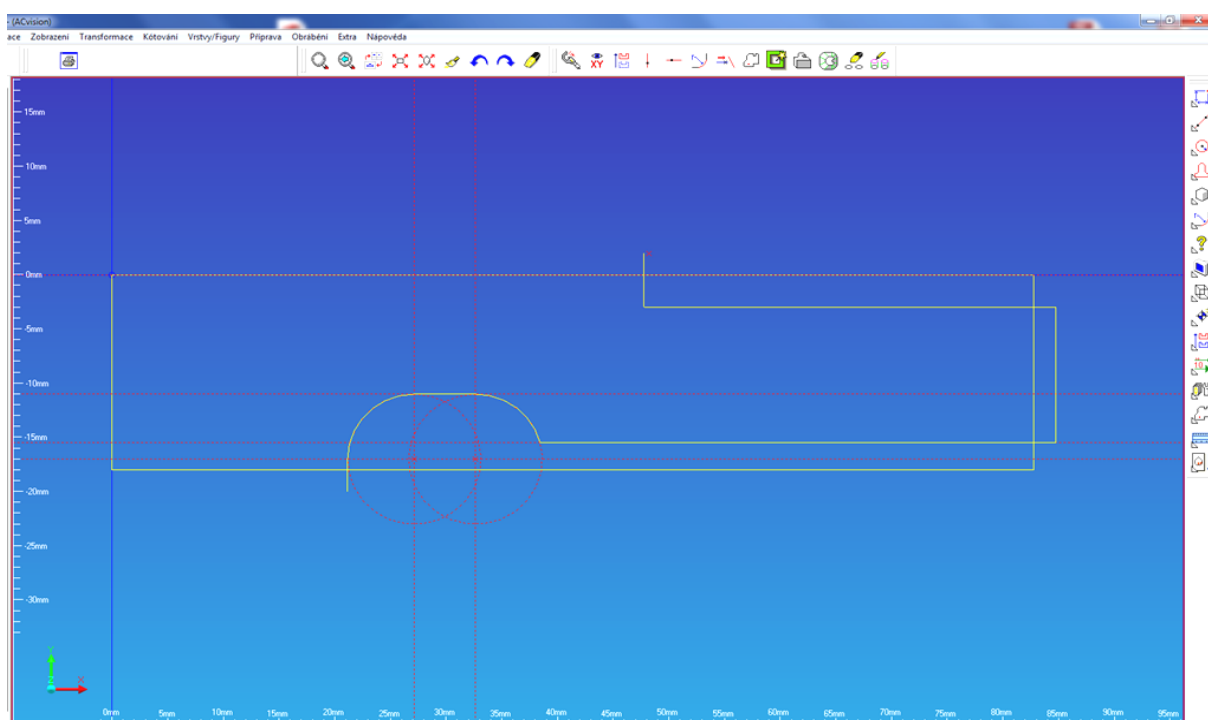
Data však nebývají správně umístěné v souřadnicovém systému, proto se provádí transformace dat dle zvoleného referenčního bodu do nulového počátku soustavy X0Y0. Často jsou načteny i nepotřebné hladiny výkresu, které nemají pro výrobu žádný význam (tj informace o geometrii a kótování). Funkcí vrstvení se docílí jejich skrytí.

Pokud načítáme 3D modely lze s nimi pracovat skrz odvození 2D geometrie, nebo přímo volbou uzavřených smyček z modelu. Lze též použít program pro projekci těles, kdy se z modelu automaticky detekují obrobitelné plochy a uživatel si vybere ty, které chce skutečně obrábět.

### 4.2.2. Ruční tvorba kontury:

Nejprve se zpravidla vytváří nekonečná pomocná konstrukční geometrie pomocí zadání horizontálních a vertikálních přímek, rovnoběžek, kružnic a bodů. Poté se vytváří již omezená konstrukční geometrie pomocí úseček, oblouků, obdélníků atd. Zde se využívá funkce přichytávání bodů a jejich spojováním vzniká kontura. Z této omezené konstrukční geometrie se následně vytváří figura obrábění.

Příkazem „Vytvořit figuru obrábění“ určí uživatel geometrii obráběné dráhy, pozici startu drátu (otvoru), výchozího bodu obrábění na figuře stejně jako směr figury. Potom se bude tato figura obrábět s možnostmi v menu Obrábění. Na dílci bývá zpravidla více než jedna figura. Figury a jejich definování volí uživatel postupně.

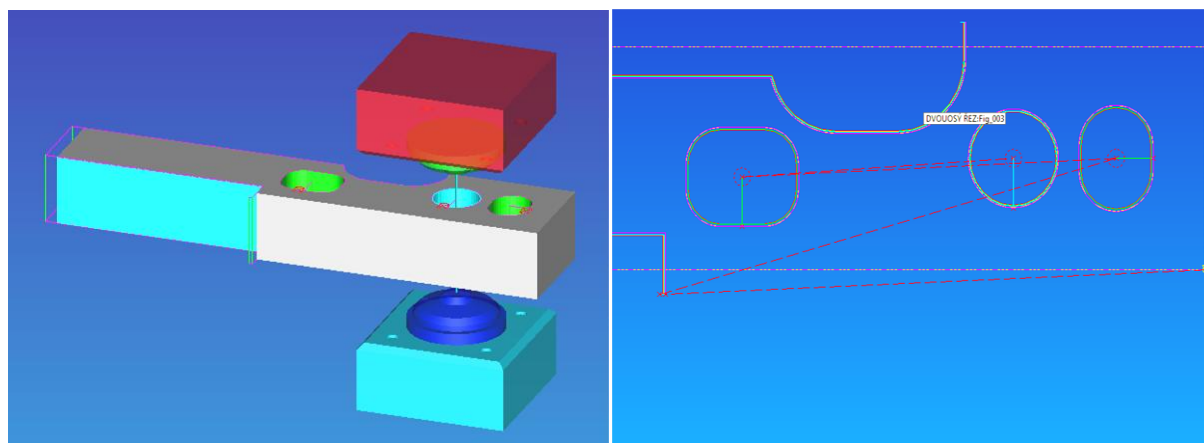


Obr. 4.2. Ruční tvorba kontury dílu pomocí pomocné geometrie – ukázka pro ořez ohybníku.

Při programování obrábění se pomocí příkazů volí parametry a technologie obrábění a pro každou figuru se volí zvlášť a v konkrétním pořadí. Lze např. používat příkazy „standartní dvou-osé obrábění kontury, čtyř-osé obrábění nebo bezodpadový rozrušovací řez (kapsování)“. Parametry obrábění se mohou nastavit při každé tvorbě programu ručně, nebo lze vyvolat již existující řezná schémata a přiřadit je k obráběným figurám, čím se dosáhne zautomatizování procesu a ušetření času při nastavování parametrů obrábění opakujících se úloh.

V řezném schématu jsou uloženy parametry obrábění (např. počet řezů, použitý drát, technologie, délka spojovacího můstku, směr obrábění, atd.).

Když bude provedeno obrábění v simulaci obr. 4.3. a provedena kontrola, může se spustit postprocesor, který generuje data jako NC soubor včetně informace doby teoretického čistého řezu a délky (ukázka viz. příloha č.8.).



Obr. 4.3 Kontrola řezání pomocí simulace a grafického znázornění řezů a přejezdů.

Takto připravená data se přenesou do stroje a to buď pomocí sériového rozhraní RS232, RJ45, bezdrátově či disketou. U stroje AGIE Classic se pomocí sériových rozhraní nepodařilo technikovi stroj s počítačem propojit, proto přenesení programu probíhá přes 3,5 palcovou disketu. Po nahrání do stroje se provede ještě odzkoušení programu a kontrola, následně úprava parametrů jiskření na základě zkušeností obsluhy pro daný stroj a zahájení vlastního fyzického řezání.

#### **4.3 Zhodnocení možností software PEPS WIRE**

Software poskytuje uživateli přístup k snadnému intuitivnímu ovládání a definování uživatelského prostředí. Zobrazení a geometrické parametry se nastavují pomocí myši a zadáním příslušného požadavku v ovládacím panelu. Vytvořené programy lze kdykoliv zpětně vyvolat a editovat jejich parametry obrábění nebo geometrie a to i po zadání technologických parametrů.

Celý proces lze odsimulovat v 3D prostředí s následnou dvojrozměrnou kontrolou pohybů nástroje a grafického rozlišení jednotlivých řezů a přejezdů.

Operace se volí dle konkrétního dílce a jsou zobrazené ve stromě, kde se dají editovat. Pro válcové a jednodušší kóniky se použije operace dvouosé obrábění kontury, pro složitější trojrozměrné kónické dílce pak čtyřoké obrábění. Oba s možností výběru typu a konstrukcí úkosů. Čtyřosé obrábění se používá, pokud jsou geometrie horní a geometrie dolní roviny obrobku odlišné a nelze použít obrábění kontury s jednoduchým nebo variabilním úkosem. Dále mezi základní operace patří operace pro bezodpadové rozrušovací řezání popsané již v kapitole 4.1.5 a také operace pro řezání fazetek.

Postprocesory jsou součástí systému a slouží pro kódování drah nástroje do příslušného NC souboru stroje. Řeší také i výpočet teoretických výrobních časů.

Dále je základní software drátového řezání rozšiřitelný o funkce a moduly drátového řezání na 3D modelu, postprocesoru pro pěti-osé NC vrtání startovacích otvorů, technologických databází a simulací obrábění. Dále o moduly pro výrobu soustružnického tvarového zápichového nože, evolventního ozubení, tvarovou vačku, modul pro elektroerozivní řezání na rotační ose a makra pro úpravy geometrie matrice k vytvoření brzdy odpadu. [15]

## 5 ŘEŠENÍ TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU A NC PROGRAMU PRO VYBRANÉHO PŘEDSTAVITELE

Podklady pro konkrétní ohýbací jednotku pinů označenou svým specifickým číslem stroje pro něž je jednotka určena, jsou papírové výkresy i elektronické 2D výkresy případně modely. Dále je přiložena rozpiska, která je důležitá především z hlediska množství jednotlivých pozic potřebných pro ohýbací jednotku stroje, použitých polotovarů a další doplňující informace vnitřního charakteru. Ukázka rozpisky v příloze 1.

### 5.1. Použitý materiál pro výrobu

Pro výrobu představitelů dílců ohýbací jednotky se používá materiál nástrojová ocel 1.2312 (ČSN 19 573), což je vysoce výkonná nástrojová ocel s vysokým obsahem uhlíku pro práci za studena pod 200 °C. Vyznačuje se vynikající odolností proti opotřebení, vysokou pevností v tlaku a dobrou houževnatostí. Ocel je všestranně využitelná a sekundárně vytvrditelná. Díky tomu je to materiál vhodný pro následné chemicko-tepelné zpracování (nitridace, CVD, PVD).

Tab. 5.1 Označování, chemické složení a fyzikální vlastnosti nástrojové oceli 1.2379. [16]

| Označení                        |            |       | Chemické složení |     |     |                                        |      |      |  |
|---------------------------------|------------|-------|------------------|-----|-----|----------------------------------------|------|------|--|
| ISO 4957                        | EN 10027-2 | ČSN   | C                | Si  | Mn  | Cr                                     | Mo   | V    |  |
| X153CrMoV12                     | 1.2379     | 19573 | 1,55             | 0,4 | 0,3 | 11,8                                   | 0,75 | 0,82 |  |
| Fyzikální vlastnosti:           |            |       |                  |     |     |                                        |      |      |  |
| Hustota                         |            |       |                  |     |     | 7.7 kg / dm <sup>3</sup>               |      |      |  |
| Modul pružnosti                 |            |       |                  |     |     | 210 kN / mm <sup>2</sup>               |      |      |  |
| Tepelná vodivost                |            |       |                  |     |     | 20 W / m.K                             |      |      |  |
| Koeficient teplotní roztažnosti |            |       |                  |     |     | 11,0.10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> |      |      |  |
| Měrný odpor                     |            |       |                  |     |     | 0,65 Ω..mm <sup>2</sup> / m            |      |      |  |

**Použití:** Střížné nástroje na stříhání (střížníky a matrice), nástroje pro extruzi za studena, nástroje pro zpracování a tváření polymerů, nástroje pro tažení a ohyb, hluboké tažení, frézy, protahovací trny, vystřihovací a děrovací formy, válcovací nástroje, dřevoobráběcí, měřicí a kreslicí, protlačovací a lisovací nástroje. [16]

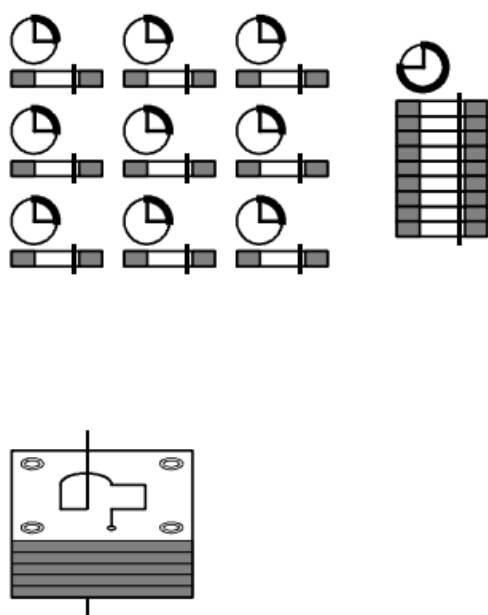
## 5.2. Příprava polotovaru

Nejprve je nutné u ohybníků a dílců jim přidruženým zabezpečit přípravu polotovarů, a to konkrétně sloučit dílce s podobnými či stejnými tloušťkami (rozměry), zvolit potřebné celkové množství materiálu pro výrobu, objednat hutní polotovar a předat k nařezání, ofrézování, tepelnému zpracování a nakonec k nabroušení síly a dvou bočních ploch. Zpracování pracovního postupu je uvedeno v tab. 5.2 a výkres řešeného dílce v příloze 7. Případné kooperace operací jako např. kalení, na které nemá firma výrobní možnosti, se zabezpečí v externí firmě.

### 5.2.1. Volba rozměrů polotovaru a výrobní postup

Rozměry jsou voleny jako erodovací kostky 150mmx150mmxt, kdy t je tloušťka volená dle výrobní sady a tloušťek dílců a je nutné k ní připočíst potřebné přídavky na opracování. Výchozí surovinou je hutní polotovar kovaný vyžíhaný blok o rozměrech 150,5x150,5x500mm s přefrézovaným povrchem. Cena takového bloku materiálu 1.2312 se pohybuje kolem 17.800Kč.

V případě, že některé dílce mají stejný boční obvodový tvar dílce identický, nebo se jedná o výrobu více kusů téhož dílce, je možné výrobu při prvním WEDM řezu zefektivnit tím, že zvolíme vyšší tloušťku polotovaru a pak se díl rozřízne, nebo upneme více desek stejných tloušťek sešroubovaných k sobě a provedeme tzv. „hromadné řezání“ obrysu. Výhodou této metody pak spočívá ve vyšším výkonu s větší tloušťkou řezu a tím úsporou času při najíždění a upnutí polotovaru a při samotném prvním řezu tvaru ohybníku. Viz. obr. 5.1 vlevo.



Obr. 5.1 Vlevo úspora času při hromadném řezání bloku desek a vpravo rozkreslení pozic na kostce.

Spotřebu materiálu je možné odvodit z rozkreslení jednotlivých setříděných detailů podle podobné či shodné tloušťky na rozměry erodovací kostky viz. příklad vpravo na obr. 5.1. Obsluha si tak může hned připravit kromě umístění samotného dílu i pozici startovacích bodů pro propalování a pro automatické navlékání drátu a pouštění programu v bezobslužném nočním režimu.

Tabulka 5.2 Výrobní postup pro vybraného představitele ohýbací jednotky – 1ks ohybníku.

| VUT FSI UST Brno               |                   | <b>Výrobní postup</b>                                                                                                                                                                                    |                    | Název součásti:<br><b>Biegestempel Ohybník</b> | Strana:<br>1/1        |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
| Vyhotovil:<br>Bohumír Zlatuška |                   | Kontrola                                                                                                                                                                                                 | Materiál<br>1.2379 | Číslo součásti:<br><b>5.627.452.138</b>        | Třída odpadu:         |
| Dne: 20.4.2013                 |                   | Výchozí polotovár:                                                                                                                                                                                       |                    | 150,5x150,5x500                                | Hmotnost: 89 kg       |
| Číslo operace                  | Stroj             | Dílna<br>Popis práce                                                                                                                                                                                     |                    | t <sub>AC</sub> (min)                          | t <sub>BC</sub> (min) |
| 10                             | KastoVBS252       | Strojní dílna                                                                                                                                                                                            |                    | 50                                             | 10                    |
|                                |                   | Upnout blok do čelistí svěráku a uříznout přířez o délce 25mm již včetně započteného přídávku dalších operací                                                                                            |                    |                                                |                       |
| 20                             | CNC Hermle        | Strojní dílna                                                                                                                                                                                            |                    | 33                                             | 17                    |
|                                |                   | Frézovat obvod na 150±0,2x150±0,2. Frézovat na tloušťku 18,8mm s přídávkem brusu 0,4mm na stranu.                                                                                                        |                    |                                                |                       |
| 30                             | Kalírna           | Kooperace                                                                                                                                                                                                |                    | -                                              | -                     |
|                                |                   | Kalit a popustit při 400°C na tvrdost 58±1HRC                                                                                                                                                            |                    |                                                |                       |
| 40                             | JUNG              | Strojní dílna                                                                                                                                                                                            |                    | 192                                            | 18                    |
|                                |                   | Brousit 2 boční strany a tloušťku desky na 18,0±0,1mm.                                                                                                                                                   |                    |                                                |                       |
| 50                             | AGEMA             | WEDM                                                                                                                                                                                                     |                    | 8                                              | 7                     |
|                                |                   | Hloubení startovacích otvorů měděnou víceotvorovou elektrodou s Ø 0,5 mm a Ø1,5 mm.                                                                                                                      |                    |                                                |                       |
| 60                             | AGIE Classic      | WEDM                                                                                                                                                                                                     |                    | 202                                            | 31                    |
|                                |                   | Řezat hlavní tvar obvodu a přesný otvor Ø1,00mm.                                                                                                                                                         |                    |                                                |                       |
| 70                             | AGIE Classic      | WEDM                                                                                                                                                                                                     |                    | 119                                            | 31                    |
|                                |                   | Ořezat boky dílce, řezat otvor Ø11mm a oválnou drážku pro šrouby, řezat přesný otvor Ø8,00 mm                                                                                                            |                    |                                                |                       |
| 80                             | AGEMA             | WEDM                                                                                                                                                                                                     |                    | 12                                             | 8                     |
|                                |                   | Hloubení startovacích otvorů měď. elektrodou Ø1,5 mm.                                                                                                                                                    |                    |                                                |                       |
| 90                             | CNC Hermle        | Strojní dílna                                                                                                                                                                                            |                    | 6                                              | 14                    |
|                                |                   | Upnout do svěráku a předvrtat vrtákem do tvrdokovu otvory Ø2,5mm, zahloubit a řezat závity M3x0,5. Na Ø1,00mm udělat 60° sražení do hloubky 0,30mm. Kolmo k ose závitu, vrtat a zahloubit otvory Ø4,0mm. |                    |                                                |                       |
| 100                            | JUNG              | Strojní dílna                                                                                                                                                                                            |                    | 12                                             | 3                     |
|                                |                   | Zabroušení můstku po WEDM řezu hlavního tvaru                                                                                                                                                            |                    |                                                |                       |
| 110                            | AGIE Classic      | WEDM                                                                                                                                                                                                     |                    | 8                                              | 30                    |
|                                |                   | 3. ořez funkční části první směr – řezání zubů                                                                                                                                                           |                    |                                                |                       |
| 120                            | AGIE Classic      | WEDM                                                                                                                                                                                                     |                    | 7                                              | 30                    |
|                                |                   | 4. ořez funkční části druhý směr – řezání náběhů zubů                                                                                                                                                    |                    |                                                |                       |
| 130                            | Dreml             | Ruční dílna                                                                                                                                                                                              |                    | 5                                              | -                     |
|                                |                   | Odjehlení s úkosem 0,3x45° všech hran těla a otvorů dílce mimo funkční část!                                                                                                                             |                    |                                                |                       |
| 140                            | 2D-vláknový laser | Kooperace                                                                                                                                                                                                |                    | 15                                             | 3                     |
|                                |                   | Laserové gravírování identifikačního výkresového čísla a nastavovací stupnice pro excentrický kolík.                                                                                                     |                    |                                                |                       |
| 150                            | Pískovačka        | Kompresorovna                                                                                                                                                                                            |                    | 8                                              | 2                     |
|                                |                   | Opískování povrchu dílce ocelovými a balotinovacími kuličkami. Ochrana funkční části!                                                                                                                    |                    |                                                |                       |
| 160                            | -                 | Ruční dílna                                                                                                                                                                                              |                    | 15                                             | -                     |
|                                |                   | Leštění pomocí pasty a dřívku.                                                                                                                                                                           |                    |                                                |                       |



### 5.2.1. Opracování polotovaru

Na dělení materiálu pro přípravu desek k erodování je použita rámová pila Kasto VBS 252 s prořezem 4-5mm. Přídavek pro přefrézování a srovnání do roviny byl zvolen 3,0 mm na každou stran. Pro frézovací operaci – zuhlování polotovaru proběhne na tříosém CNC frézovacím centru HERMLE UWF902H se zanecháním přídavku na tloušťce 0,4 mm pro brus tloušťky na hotový rozměr. Použitý nástroj na ofrézování je čelní fréza pro osmiboké, kruhové, pozitivní frézovací 16-břité VBD destičky na kalenou a kovanou ocel, na hliník a titan. Typ čelní frézy a destiček s doporučenými řeznými podmínkami a geometrií uveden v příloze 2.



Obr. 5.2 Použitá čelní fréza s VBD destičkami.

Následuje kalení ve vakuu a popouštění na 400°C na tvrdost 58±1HRC. To probíhá v kooperaci. Cena kalení vč. popouštění: 156Kč/kg (do 15kg), 47Kč/kg (nad 15 kg).

Tab. 5.3 Doporučené tepelné zpracování nástrojové oceli 1.2379. [17]

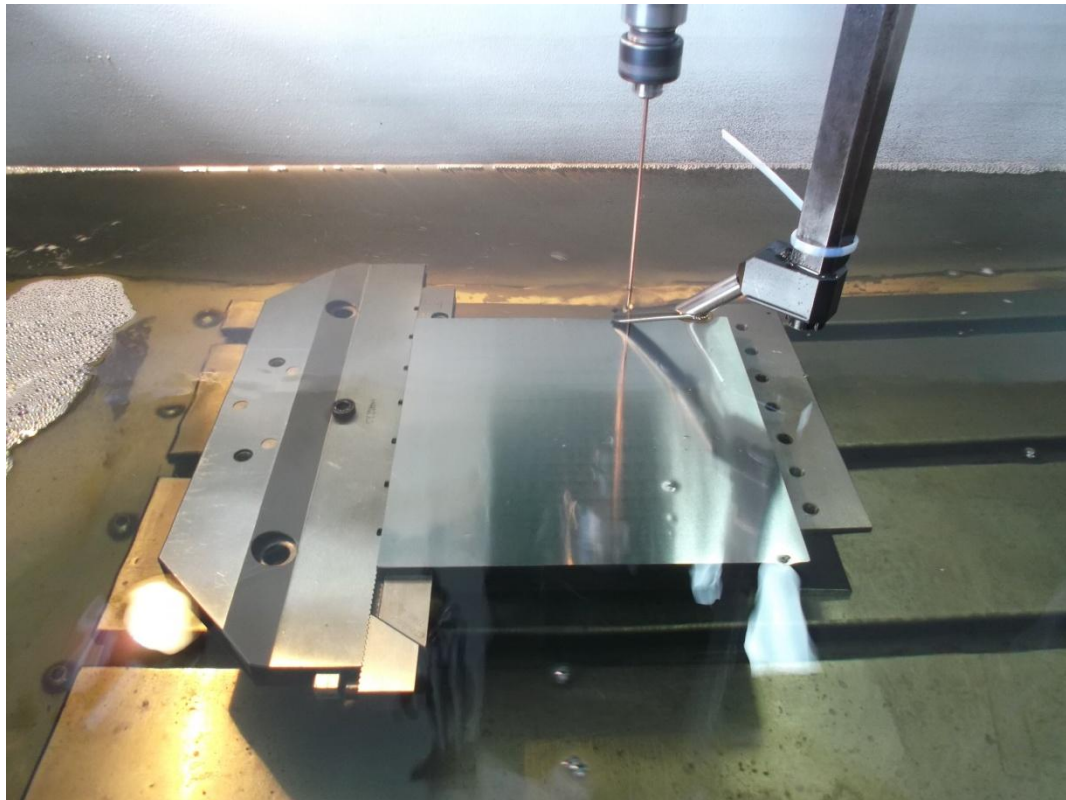
|                           |                    |                                                              |                                          |
|---------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Žihání na měkko:          | Teplota [°C]       | Chlazení                                                     |                                          |
|                           | 820 - 850          | Pec                                                          |                                          |
| Žihání pro snížení pnutí: | Teplota [°C]       | Chlazení                                                     |                                          |
|                           | 600 - 650          | Pec                                                          |                                          |
| Kalení a popouštění:      | Austenitizace [°C] | Kalení                                                       | Popouštění                               |
|                           | 1000 - 1030        | Olej, tlakový plyn (N <sub>2</sub> ),<br>vzduch, horká lázeň | dle popouštěcí křivky<br>obvykle < 300°C |
|                           | 1040 - 1080        | Olej, tlakový plyn (N <sub>2</sub> ),<br>vzduch, horká lázeň | dle popouštěcí křivky<br>obvykle = 300°C |

Po tepelném zpracování jde polotovar na broušení na čistý rozměr a zuhlování dvou stran polotovaru nutného k upnutí a vyrovnání před řezáním ve WEDM stroji. Výsledná tloušťka se brousí na střed tolerančního pole požadovaného rozměru vyráběného dílu. V tomto případě musí být tloušťka 18,0±0,1mm.



Obr. 5.3 Výsledný polotovár po opracování.

Takto připravený polotovár se upne a vyrovná v propalovačce startovacích otvorů značky AGEMA a vyhloubí se veškeré potřebné startovací body (viz. obr. 5.4). Průměr elektrody je volen dle použitého drátu  $\varnothing 0,25\text{mm}$  pro WEDM řezání a pro zabezpečení úspěšného navlečení i s možností pouštění prvních řezů v nočním bezobslužném provozu. Startovací otvor pro první řez obvodu dílce je zvolen o  $\varnothing 1,6 - 1,7\text{mm}$ . Pro tento rozměr se použije pro hloubení měděná trubičková elektroda s dutinami pro vnitřní výplach o průměru  $1,5\text{mm}$ . Pro otvor s  $\varnothing 1,0\text{mm}$  na funkční části ohybníku, kde má procházet kalená jehla, se použije trubičková elektroda o  $\varnothing 0,5\text{mm}$ .



Obr. 5.4 Hloubení startovacích otvorů v propalovačce AGEMA.

### 5.3. Volba technologických parametrů a počtu řezů

Stroje mají již v sobě přednastavenou databázi technologických parametrů, tak že po zadání určitých specifik (jako materiálu, řezané výšky, požadované výsledné přesnosti a kvality povrchu, průměru a typu drátu, typu obrábění) je technologie z databáze vyvolána.

Mezi hlavní parametry patří nastavení generátoru, vyplachování, definice pulsu, nastavení rychlosti posuvu, parametry drátu, korekce geometrie popř. další. Přehled a jejich význam těchto parametrů je uveden v příloze 3.

Pro dosažení lepší kvality řezu, tolerance tvaru, zamezení praskání drátu či z jiných důvodů může obsluha tyto parametry optimalizovat. Příklad úprav parametrů a vliv na proces řezání:

↓I : snižuje drsnost a vyjiskřovací mezeru

↓P : snižuje tvarovou chybu a nebezpečí přetržení drátu

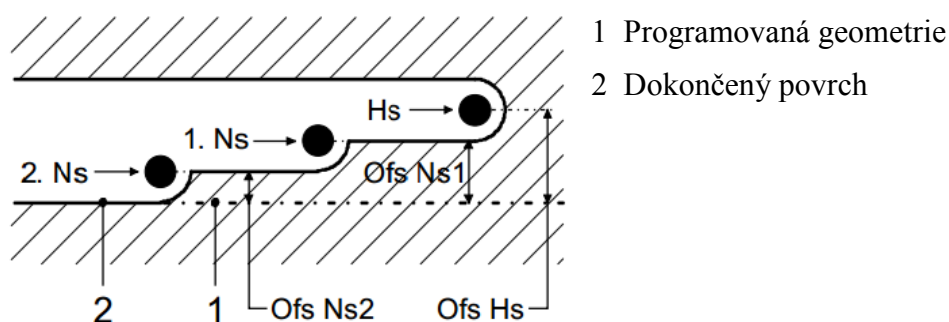
↑td : stabilizuje vyjiskřovací proces

↑Fw : zlepšuje toleranci tvarů a přesnost rohů, je však nutné dbát na nebezpečí přetržení drátu

↓p : snižuje vyplachovací tlak, např. použití při odřezávání můstků a problémech s linearitou

↓Ofs1 : snižuje korekci dráhy

Počet pracovních kroků řezů obr. 5.5 se určí na základě parametrů kvality volené v požadavku povrchové strategie a přesnosti dílce a významně ovlivňuje také dobu řezání. Pro hlavní tvar ohybníku, přesné otvory a řezy na funkční části je volena drsnost Ra 0,3 a počet řezů 4. První je hlavní řez (Hs), jenž vyřizne hrubý obrys z celého kusu dílu. Tento řez zanechává přídavek na místě několik desetin milimetrů nadbytečného materiálu jako rezervu stopy tzv. "Offset" konečného tvaru. Další tři řezy jsou dočist'ovací řezy (Ns), které tento nadbytečný materiál po vrstvách odstraňují až do dokončení programovaného tvaru a konečného vyráběného povrchu. Dočist'ovací řezy také slouží k dosažení větší přesnosti řezání a hladšího povrchu, ale vyžadují delší čas řezání. [10]



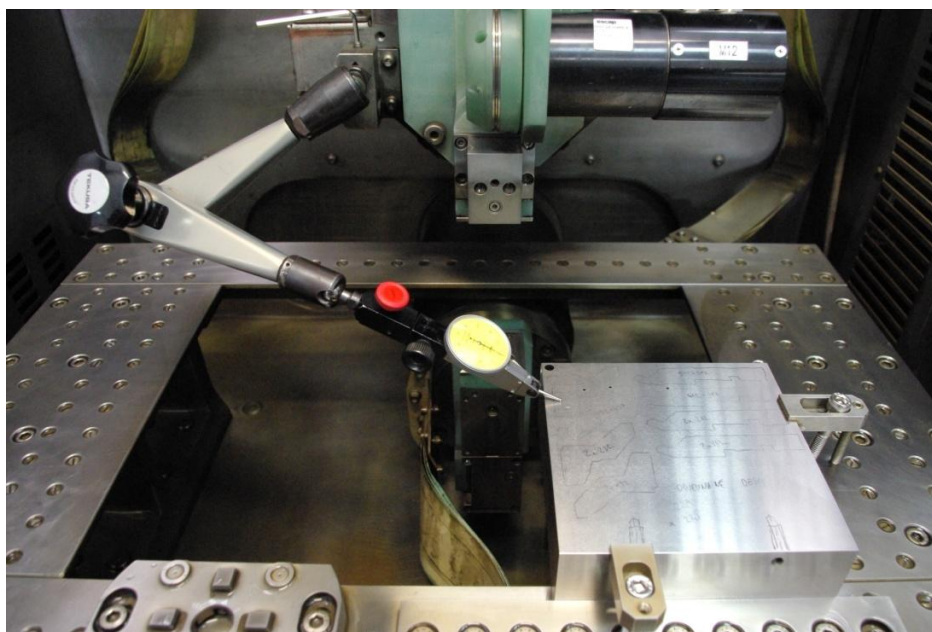
Obr. 5.5 Počet pracovních kroků řezů. [10]

## 5.4. Výroba ohybníku elektrojiskrovým řezáním

Řezání ohybníku je rozděleno do 4 hlavních fází, jejichž kritériem je poloha upnutí a řezy jednotlivých prvků v dané poloze. Prvním je řezání základního tvaru ohybníku a přesného otvoru na nosu dílce z kostky připraveného polotovaru, poté bude následovat ořez boků ohybníku, vyříznutí volných otvorů pro upevňovací šrouby a přesného otvoru pro excentrický kolík. Třetí a čtvrtý řez bude probíhat ve speciálních upínacích přípravcích zajišťující řez zubů a jejich náběhů na funkční části pod dvěma úhly pootočením ohybníku vůči ose drátu.

### 5.4.1 Příprava a první řez hlavního tvaru ohybníku:

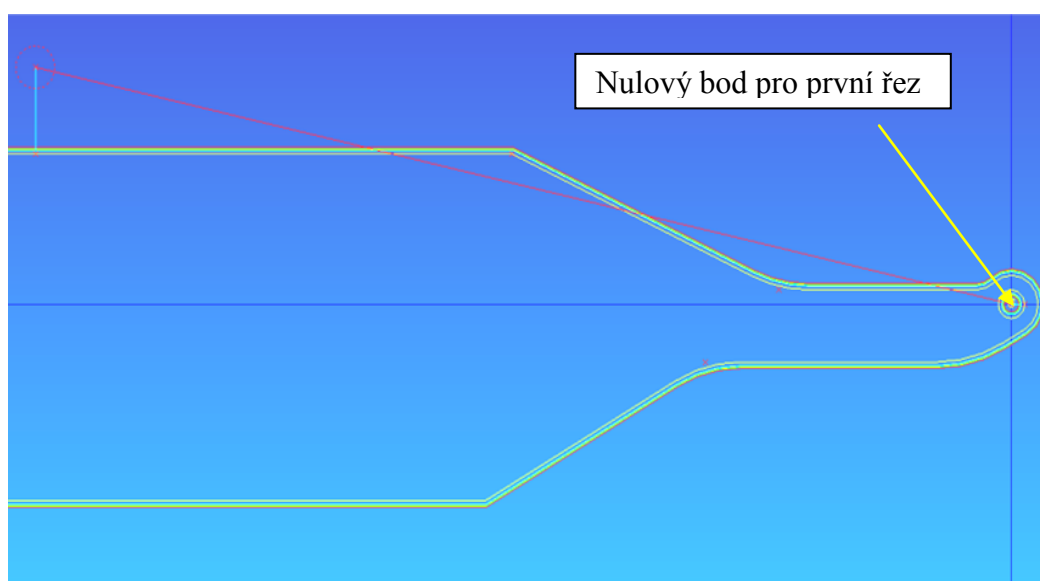
Připravený polotovaz erodovací kostky se upne pomocí základní sady upínek na stůl stroje drátové řezačky a ustaví se v pracovním prostoru pomocí úchylkoměru. Agie stroje obsahují možnost automatického ustavení drátu vůči obrobku pomocí funkce AGIESETUP 3D, kdy stroj si odměří pomocí výsuvné sondy (kovového dřívku) z horní hlavy tříbodově polohu obrobku a umožňuje tak automatické a rychlé ustavení. Tato funkce však v tomto případě není využita, protože stroje nejsou výsuvnou sondou vybaveny.



Obr. 5.6 Upnutí základního polotovaru pomocí upínek a vyrovnání úchylkoměrem.

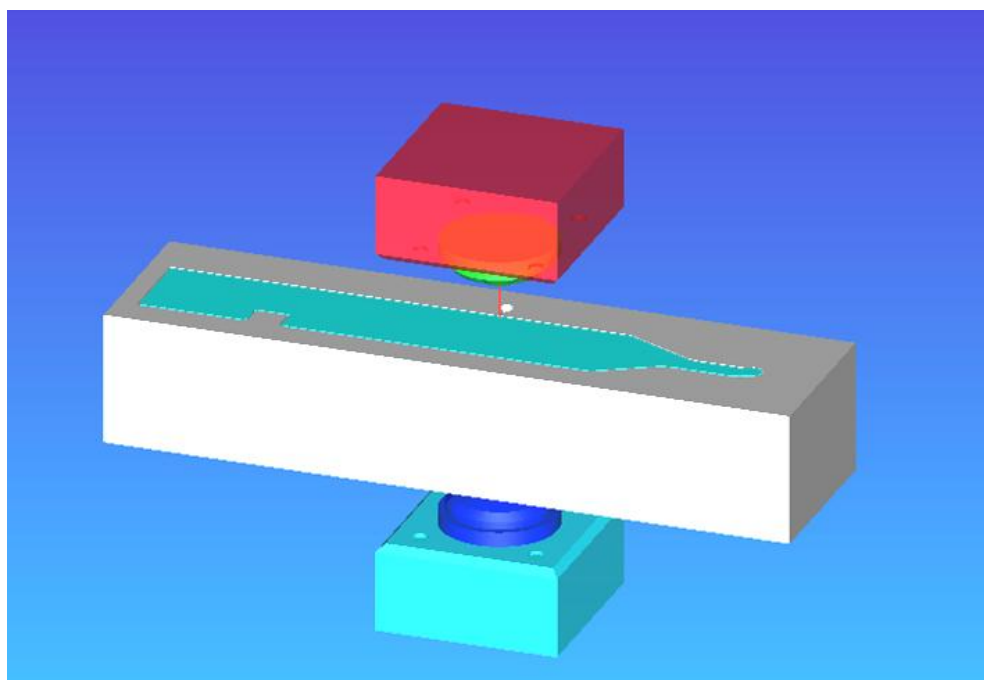
Poté se manuálně najede horní hlavou nad startovací otvor a spustí se cyklus navlékání drátu. Drát je navlečen paprskem tryskajícího dielektrika a následně je zapnut strojní cyklus středění drátu na střed otvoru pomocí stanovení třech bodů. Impulzy dotyku jsou snímány pomocí spojení obvodu mezi drátem a obrobkem. Tímto získáme nulový startovací bod obrobku.

Nulový bod ohybníku je startovací otvor v místě budoucího otvoru Ø1mm pro kalenou jehlu. Z tohoto bodu vychází i hlavní tvar celého ohybníku. Po vystředění je drát přestříhnut a navlečen do druhého startovacího bodu pro obvod řezání tvaru těla ohybníku.



Obr. 5.7 Nulový bod v otvoru nosu ohybníku a znázorněný přejezd drah drátu mezi figurami.

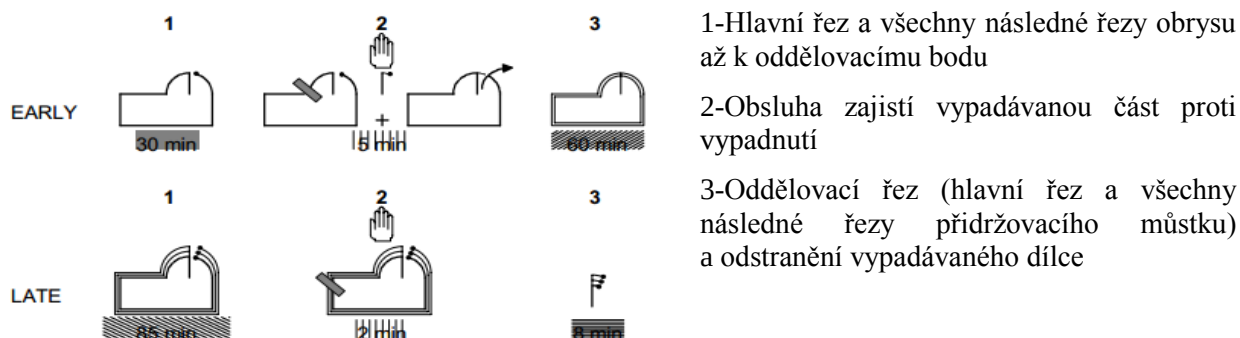
Postup drah řezání je ověřený jak v simulaci softwaru PEPS, tak po načtení NC dat i v simulaci stroje. NC programy včetně teoretických drah a časů u jednotlivých částí řezů ohybníku, vytvořené pro tuto práci, jsou uvedené v příloze 8.



Obr. 5.8 Simulace prvního řezu ohybníku.



U prvního řezu ohybníku by bylo možné využívat plánování bezobslužného nočního režimu. Na polotovaru lze připravit hned několik startovacích otvorů a ve stroji najet každý zvlášť s uložením k danému vlastnímu programu. Následně se zvolí jejich pořadí v plánování softwaru stroje a strategie více obrobků. Pro jednotlivé díly je vždy použita podstrategie řezání LATE, což je strategie zasahování a vyjímání odpadu dle využití doby nepřítomnosti obsluhy. Princip strategie vysvětluje ukázka na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Využití strategií Early a Late a rozvrh vyjímání odpadu. [10]

Pro noční řezy se obvykle volí menší výkony řezů, aby nedocházelo k přerušení procesu kvůli přetrhnutí drátu a neúspěšnému navlečení drátu.

Ráno pak stačí díl zajistit magnety, odříznout můstky a obsluha vyjme dílec vyřezaný v prvním směru. Můstek je volen na horní nefunkční straně ohybníku o délce 15-20mm. Tento delší můstek nám tak zajistí stabilitu obrobku pro následný řez přesného otvoru Ø1,00mm na nose ohybníku. Odříznutí můstku a vyjmutí ohybníku probíhá tedy až nakonec.



Obr. 5.10 Ohybník po první fázi řezání.

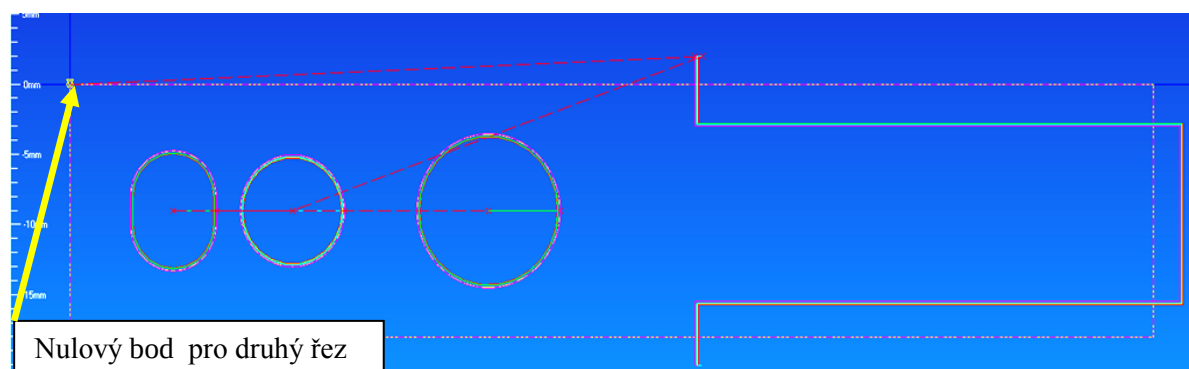
Z tabulky 5.4 jsou vidět rozdílné technologické parametry obrábění vygenerované databází stroje při zadání stejných kvalitativních cílů obrobku. Také jsou zde uvedeny výsledné řezné časy pro první řez hlavního tvaru ohybníku uskutečněného na dvou WEDM strojích AGIE.

Tab.5.4 Technologické, řezné parametry a časy prvního obvodového řezu na dvou strojích AGIE.

| WEDM stroj                                      | AGIE CLASSIC 2  |       |       |       | AGIE PROGRESS V2 |       |       |       |
|-------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|
| Typ řezu                                        | Main            | Trim1 | Trim2 | Trim3 | Main             | Trim1 | Trim2 | Trim3 |
| Technologické a řezné parametry:                | Použité hodnoty |       |       |       |                  |       |       |       |
| Výška řezu H [mm]                               | 18,0            | 18,0  | 18,0  | 18,0  | 18,0             | 18,0  | 18,0  | 18,0  |
| Korekce tras drátu Ofset [ $\mu\text{m}$ ]      | 254             | 174   | 142   | 131   | 230              | 169   | 153   | 131   |
| Parametry drátu:                                |                 |       |       |       |                  |       |       |       |
| Aw rychlost odvinu drátu [ $\text{mm.s}^{-1}$ ] | 195             | 150   | 135   | 135   | 180              | 150   | 135   | 120   |
| Fw napnutí drátu [N]                            | 17              | 20    | 20    | 20    | 17               | 20    | 20    | 20    |
| Parametry generátoru a pulsu:                   |                 |       |       |       |                  |       |       |       |
| Modul M                                         | 0               | 2     | 2     | 2     | 0                | 0     | 10    | 30    |
| Strategie Str                                   | 4               | 1     | 5     | 3     | 133              | 0     | 0     | 0     |
| Vybíjecí proud I [A]                            | 17              | 13    | 10    | 7     | 17               | 13    | 4     | 3     |
| Výkon při vybíjení P [A]                        | 9               | 25    | 30    | 25    | 40               | 55    | 63    | -     |
| Délka pulzu Ton [ $\mu\text{s}$ ]               | -               | -     | 6     | 9     | 32               | 32    | 19    | -     |
| Posuv drátu VADV [ $\text{mm.min}^{-1}$ ]       | 1,98            | 4,62  | 3,60  | 5,75  | 2,52             | 4,78  | 12,20 | 7,23  |
| Parametry výplachu a lázně:                     |                 |       |       |       |                  |       |       |       |
| Typ lázně B                                     | 0               | 0     | 0     | 0     | 1                | 1     | 1     | 1     |
| Množství a typ vyplachování Q                   | 13              | 13    | 13    | 13    | 13               | 13    | 13    | 13    |
| Tlak p [Bar]                                    | 8,0             | 0,5   | 0,3   | 0,3   | 8,0              | 0,3   | 0,2   | 0,2   |
| Vodivost K [ $\mu\text{S/cm}$ ]                 | 15              | 15    | 14    | 14    | 6                | 10    | 10    | 10    |
| Čas erodování                                   |                 |       |       |       |                  |       |       |       |
| Časy jednotlivých řezů                          | 100:37          | 23:30 | 40:58 | 30:46 | 79:22            | 27:10 | 14:58 | 25:48 |
| Celkový čas                                     | 195:24          |       |       |       | 147:18           |       |       |       |

### 5.4.2 Příprava a druhý řez ohybníku

Následuje ořez boků ohybníku, vyříznutí volných otvorů pro upevňovací šrouby a přesného otvoru pro excentrický kolík. Pro otvory se musí propálit startovací otvory elektrodou  $\varnothing 1,5\text{mm}$ . Ohybník je upnut do paletky se svěrákem a zasazen do mechanického upínače držáku přidělaného na stole stroje. Vyrovná se pomocí úchylkoměru, najede se hlavami k obrobku a spustí se strojní cyklus středění a stanovení nulového bodu obrobku – v rohu ohybníku. Viz. obr. 5.11.



Obr. 5.11 Nulový bod ohybníku pro druhý řez a dráhy přejezdů a návleků drátu mezi prky řezání.



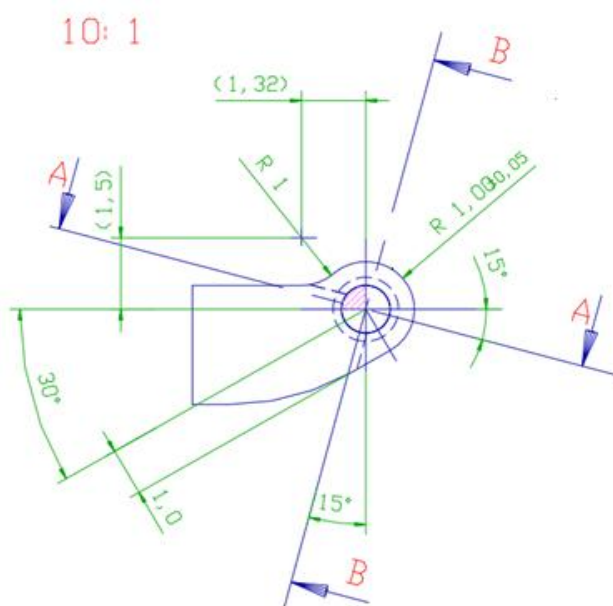
Pořadí řezání prvků je možno zvolit libovolně. V tomto případě se nejdříve ořežou boky ohybníku celkem čtyřmi řezy, následně je drát přestřižen a navlečen do startovacího otvoru přesné kolíkové díry  $\varnothing 8,00^{+0,005}_{-0}$  mm, přičemž je otvor vyřezán též čtyřmi řezy. Další dva otvory jsou volné pro šrouby, proto zde stačí použít jen hrubovací řez.



Obr. 5.12 Uchycení ohybníku ve svěráku a jeho výsledný tvar po ořezu.

#### 5.4.3 Příprava třetího a čtvrtého řezu ohybníku

Po vyvrtání bočních děr, závitů, zahloubení pokračuje jiskření na funkční části ohybníku. Třetí a čtvrtá fáze řezání mají společnou charakteristiku v odlišnosti upínání a to upínání ohybníku pod úhlem  $15^\circ$  vůči ose drátu.

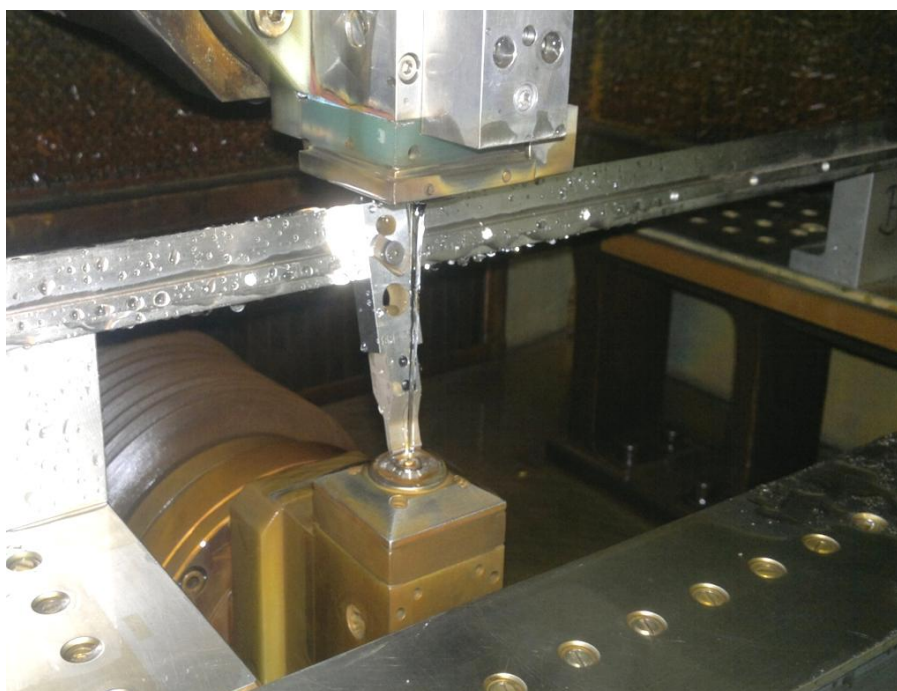


Obr. 5.13 Natočený směr řezů A a B o  $15^\circ$  vůči osám ohybníku.

K tomu byly navrženy a vytvořeny dva upínací přípravky. Jednouúčelový pro zakládání po jednom obrobku a univerzální přípravek pro obě upnutí s možností upnutí vícero ohybníků vedle sebe. Na lištu s otvory pro šrouby a drážkou se upevní ohybník, přičemž je její čtyřhranný profil zasazen v bočních stojkách upevněných na protilehlých stranách stolu stroje. Pro změnu vychýlení ohybníku vůči rovině XY pracovního stolu stačí jen měnit polohu univerzální lišty pootočením o 90° oproti předchozí poloze.



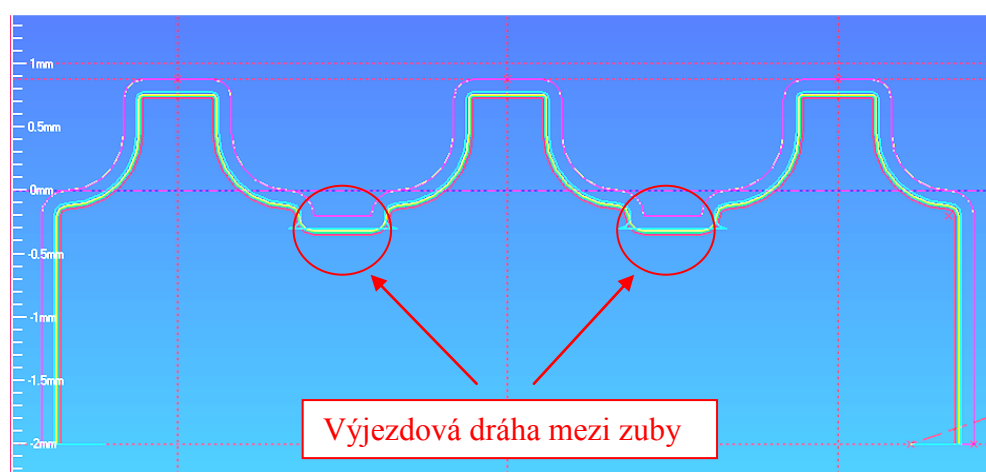
Obr.5.14 Upnutí ohybníku v jednoúčelovém přípravku.



Obr.5.15 Upnutí ohybníku na univerzální liště.

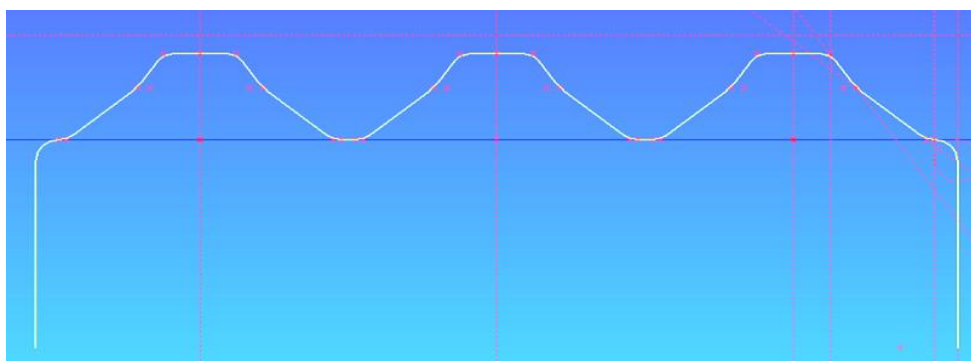
Po vyrovnaní obrobku pomocí úchylkoměru se spustí strojní cyklus pro určení pozice nuly v ose X na boku ohybníku a v ose Y dotekem na nose funkční části. Tímto se určí a do stroje potvrdí nulový bod. Pokud se nejedná o středění na otvor, stroj automaticky započte korekci o poloměr drátu, jinak by byl nulový bod stanoven chybně.

U obou řezů se použije jeden hlavní a tři dokončovací řezy, protože předepsaná drsnost na funkční části je  $Ra0,4$ . U třetího řezu, řezání tvaru zubů, je nutné zabránit jiskření a poškození povrchu z předešlého prvního řezu na nose ohybníku mezi přejezdy jednotlivých zubů, proto se dráha naprogramuje s výjezdy mimo obrobek viz. obr. 5.16.



Obr. 5.16 Geometrie dráhy drátu řezání zubů ohybníku s výjezdy.

U čtvrtého řezu, náběhů na zubové části, již výběhy nejsou nutné, protože horizontální dráha mezi jednotlivými tvary je zanedbatelná viz. obr. 5.17.



Obr. 5.17 Geometrie dráhy drátu řezání náběhů zubů ohybníku.

**Následné ošetření povrchu:**

V poslední fázi je ohybník pískován a leštěn. Pískování kovovými kuličkami s hrubostí 100-200  $\mu\text{m}$  a balotinovými kuličkami s hrubostí zrna 40-70 $\mu\text{m}$  má dva důsledky. A to odstranění bílé vrstvy v prvním kroku a v druhém kroku zmenšení hrubosti povrchu. Vzdálenost trysky by měla být více než 30mm a tlak kolem 1 baru. Doba pískování je individuální dokud není povrch čistý, zpravidla však bývá kolem 2-3sek/ $\text{cm}^2$ . Při řezání je nutné dbát, aby byla provedena úprava offsetu v závislostech na parametrech pískování materiálu. Zpravidla offset posledního řezu o 1-2 $\mu\text{m}$  snížit.

Kovovými kuličkami s větší hrubostí se pískuje tělo ohybníku a balotinovanými skleněnými kuličkami s jemným zrnem především funkční část ohybníku. Před prvním krokem opískováním je nutné funkční část chránit, protože takto tenké stěny malých zoubků by mohly být tlakem a abrazivem poškozeny. Před druhým krokem pískování je do přesného otvoru vložena kalená jehla, která chrání hrany od sražení a zachovává jejich ostré hrany. Posledním krokem dokončení ohybníku je lapování pomocí lapovací pasty a jehly na vnitřku přesného otvoru Ø1,00mm.



Obr. 5.18 Zhotovené ohybníky.

## 6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

V této části se řeší ekonomika provozu elektroerozivních strojů Agie a náklady na výrobu typového představitele ohýbací jednotky.

### 6.1. Ekonomika provozu stroje

#### 6.1.1. Využití stroje a organizace práce

Oba stroje Agie Charmilles pracují v jednosměnném provozu, avšak práci odvádějí i bezobslužně po skončení směny pracovníků. Teoretický počet provozních hodin stroje za rok se vyjádří dle vztahu (6.1) a je dán následujícími faktory:

- směnnost  $S=1$  (jednosměnný provoz)
- pracovní doba směny  $T_s = 8\text{h}$
- počet pracovních dní za rok  $D= 251$  dní
- bezobslužný provoz  $T_{bp}= 3\text{h}$  denně

Do výpočtu efektivního časového fondu  $E_f$  je potřeba zahrnout i dobu plánovaných údržeb ( $T_{pl} = 9\text{dní}$  ročně) a předpokládanou dobu údržby po poruše ( $T_{npl} = 3\text{dny}$  ročně).

**efektivní časový fond stroje jednosměnného plně obslužného provozu:**

$$E_{f1} = S \cdot T_s \cdot (D - T_{pl} - T_{npl}) = 1.912\text{h} / \text{rok} \quad (6.1)$$

**efektivní časový fond stroje s využitím možnosti bezobslužného provozu:**

$$E_{f2} = S \cdot (T_s + T_{bp}) \cdot (D - T_{pl} - T_{npl}) = 2.629\text{h} / \text{rok} \quad (6.2)$$

Pokud budeme ve firmě počítat s volitelným plánováním pouštění dlouhých řezů na víkend, můžeme efektivní časový fond zvýšit až o 720 hodin:

- sobota / neděle -  $16\text{ h} \text{ týdně} \times 45 \text{ týdnů} = 720\text{h} / \text{rok}$

**maximální efektivní fond stroje:**  $E_{fmax} = E_{f2} + 720 = 3.349\text{ h/rok} \quad (6.3)$

### 6.1.2. Výpočet hodinové sazby pro jednosměnný provoz WEDM stroje

#### 6.1.2.1. Pořizovací náklady

Náklady na pořízení WEDM strojů patří mezi výrazně ovlivňující faktory hodinové sazby stroje. Je tedy potřeba znát celkové pořizovací náklady jednoho WEDM stroje včetně jeho uvedení do chodu a doplňkového vybavení stroje. Pořizovací investice vyjadřuje tabulka 6.1.

Tab.6.1 Investice do WEDM obrábění ve firmě.

| Investice                                       |
|-------------------------------------------------|
| použité AGIE WEDM stroje                        |
| odstavení (demontáž)                            |
| oprava stroje specializovanou společností       |
| doprava / uvedení do provozu                    |
| chladicí jednotka                               |
| zařízení pro úpravu vody (změkčení, deionizace) |
| přizpůsobení sítě elektřiny a rozvodu           |
| CAM programování (PEPS) + PC DELL               |
| přípravné místo/ 3D měřicí přístroj Zeiss       |
| potřeba přednastavení                           |
| doplňkové vybavení stroje                       |
| 4-denní školení probíhající v Jihlavě           |

**Celkové pořizovací náklady** pro stroj Classic činí 1,27 mil. Kč a pro Progress 2,43 mil. Kč. Tedy při odpisové době 5 let činí hodinové pořizovací náklady pro stroj Classic  $2 N_{poř1} = 132,8 \text{ Kč.hod}^{-1}$  a pro Progress V2  $N_{poř2} = 254,2 \text{ Kč.hod}^{-1}$ .

Kromě pořizovacích nákladů stroje je dále nutné kalkulovat i s **náklady provozními a osobními**.

#### 6.1.2.2. Osobní náklady

Do osobních nákladů patří mzdové náklady na obsluhu stroje viz tab. 6.2 a vedlejší náklady (pracovní oděv a ochranné pomůcky...). Náklady za jedno pracovní místo tak činí **459.216 Kč/rok**.

Tab. 6.2 Položky obsažené v mzdových nákladech na obsluhu.

| Mzdové náklady na obsluhu |                                                                                       |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.                        | Základní mzda kvalifikovaného pracovníka                                              |
| 2.                        | Motivace 25÷30% (prémie, odměny, příplatky za práci o víkendu, přesčas, ve svátek...) |
| 3.                        | Sociální a zdravotní hrazené zaměstnavatelem 34% z hrubé mzdy                         |
| 4.                        | Zákonná dovolená 25 dní v roce                                                        |
| 5.                        | Úhrada nemocenské za zaměstnance                                                      |

Vztažené tedy na hodinu provozu stroje jsou **osobní náklady na jednoho pracovníka**

$$N_{os} = 228,7 \text{ Kč.hod}^{-1}.$$

### 6.1.2.3. Provozní náklady

Do provozních nákladů stroje patří náklady nutné k provozu stroje. A to například spotřeba elektrické energie potřebné pro chod stroje, spotřeba stlačeného vzduchu, spotřeba destilované vody a filtrů, deionizační pryskyřice, drátu, náklady za servisní údržbu, náklady na náhradní díly spotřebních komponent strojů (přehled všech dílů v příloze č. 6), jejichž přehled je možno vidět v tabulce 6.3.

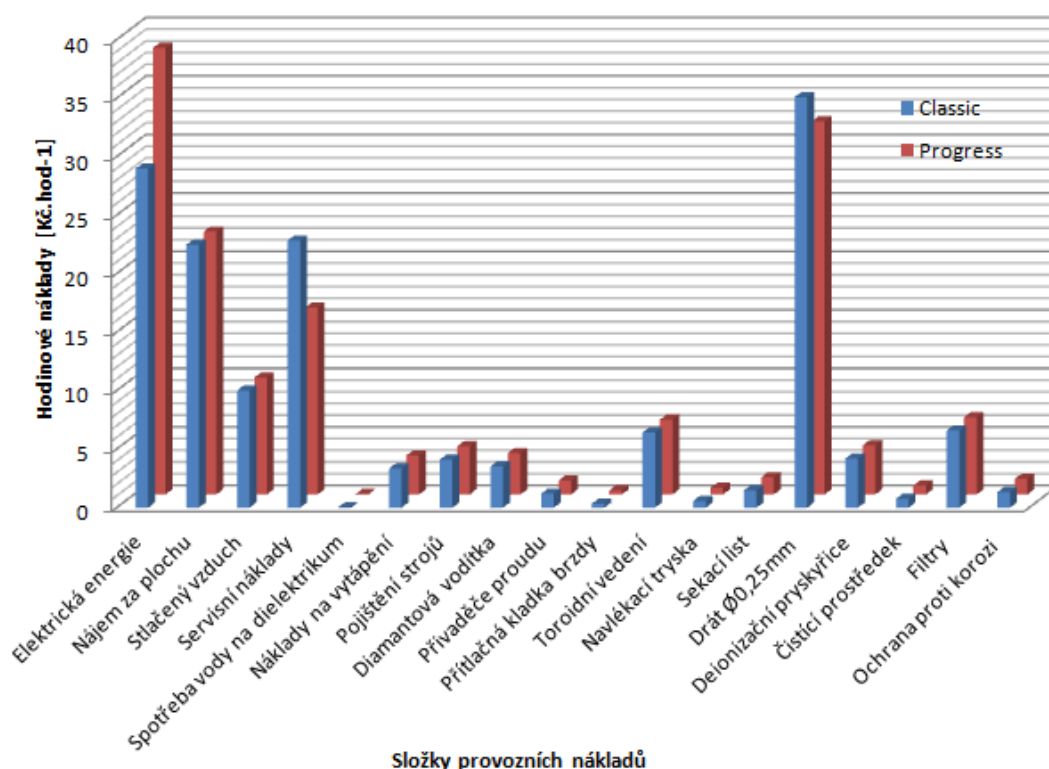
Tab. 6.3 Přehled propočtu nákladů za energie a služby, náhradní díly stroje a spotřební materiál.

| Classic 2/Progress                                          |                               |                       |                       |                          |           |                                          |        |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------|------------------------------------------|--------|
|                                                             |                               | Označení položky      |                       | Spotřeba/Množství        |           | Jednotková cena                          |        |
|                                                             |                               |                       |                       |                          |           | Životnost                                |        |
|                                                             |                               |                       |                       |                          |           | Hodinové náklady [Kč.hod <sup>-1</sup> ] |        |
| Energie, služby                                             | Elektrická energie            | 6,3kW.h <sup>-1</sup> | 8,3kW.h <sup>-1</sup> | 4,6 Kč.kWh <sup>-1</sup> | -         | 28,98                                    | 38,18  |
|                                                             | Plocha na 1 stroj             | 37 m <sup>2</sup>     | 37 m <sup>2</sup>     | 133Kč.m <sup>-2</sup>    | -         | 22,47                                    | 22,47  |
|                                                             | Stlačený vzduch               | 4 m <sup>3</sup> /h   | 4 m <sup>3</sup> /h   | 2,5Kč/m <sup>3</sup>     | -         | 10,00                                    | 10,00  |
|                                                             | Servisní náklady              | 5000Kč/měs            | 3500Kč/měs            | -                        | měsíc     | 22,83                                    | 15,18  |
|                                                             | Spotřeba vody na dielektrikum | 25l/týdně             | 25l/týdně             | 71,56Kč/m <sup>3</sup>   | -         | 0,04                                     | 0,04   |
|                                                             | Náklady na vytápění           | 731Kč/měs             | 731Kč/měs             | -                        | měsíc     | 3,34                                     | 3,34   |
|                                                             | Pojištění strojů              | 900Kč/měs             | 900Kč/měs             | -                        | měsíc     | 4,11                                     | 4,11   |
| Náhradní díly                                               | Diamantová vodítka            | 1                     | 1                     | 42300Kč/pár              | 12000h    | 3,53                                     | 3,53   |
|                                                             | Přiváděče proudu              | 2                     | 2                     | 3560Kč/ks                | 6000h     | 1,19                                     | 1,19   |
|                                                             | Přítlačná kladka brzdy        | 1                     | 1                     | 2688Kč/ks                | 8000h     | 0,34                                     | 0,34   |
|                                                             | Toroidní vedení               | 2                     | 2                     | 38430Kč/ks               | 12000h    | 6,41                                     | 6,41   |
|                                                             | Navlékací tryska              | 1                     | 1                     | 5670Kč/ks                | 10000h    | 0,57                                     | 0,57   |
|                                                             | Sekací list                   | 2                     | 2                     | 2960Kč/ks                | 4000h     | 1,48                                     | 1,48   |
| Spotřební materiál                                          | Drát Ø0,25mm                  | 165mm.s <sup>-1</sup> | 150mm.s <sup>-1</sup> | 144Kč.kg <sup>-1</sup>   | 65h   72h | 35,09                                    | 31,90  |
|                                                             | Deionizační pryskyřice        | 50l sud               | 50l sud               | 105 Kč/l                 | 1400h     | 4,20                                     | 4,20   |
|                                                             | Čistící prostředek            | 5l.rok <sup>-1</sup>  | 5l.rok <sup>-1</sup>  | 1514Kč/ks                | 2000h     | 0,76                                     | 0,76   |
|                                                             | Filtry                        | 8ks                   | 8ks                   | 330Kč/ks                 | 400 h     | 6,60                                     | 6,60   |
|                                                             | Ochrana proti korozi          | 5l/100l vody          | 5l/100l vody          | 3492Kč/ks                | rok       | 1,33                                     | 1,33   |
| Suma hodinových provozních nákladů $\sum N_{i\text{ prov}}$ |                               |                       |                       |                          |           | 153,27                                   | 152,43 |

Z výsledku porovnání má stroj Classic nepatrně vyšší celkové provozní náklady než stroj Progress. V některých položkách mají oba AGIE WEDM stroje rozdílné náklady. To lze názorně vidět v sloupcovém grafu 6.1, z něhož je též patrné, které položky mají nejvýraznější vliv na celkové provozní náklady.



Graf 6.1 Hodinové náklady jednotlivých položek provozních nákladů strojů Classic a Progress.



Jednou z těchto položek je spotřeba elektrické energie. Hodnota příkonu stroje je závislá na zatížení generátoru a nastavení pracovních podmínek řezu, přičemž největší vliv na příkon a energii pulzu má tloušťka obrobku. Maximální příkon stroje je udán výrobcem na štítku stroje pro maximální zatížení stroje. Stroj však v těchto podmínkách pracuje jen zřídka, proto se pro určení hodinových nákladů spotřeby elektrické energie použije hodnota příkonů strojů ve standardních podmínkách konkrétního provozu.

Taktéž cena drátů významně ovlivňuje celkové provozní náklady. Cena se odvíjí od jejich vlastností a výrobců. Firmou nejčastěji používaným typem drátu je mosazný drát CuZn36 o Ø0,25mm **bercocut**<sup>®</sup> pro 900 – cívka 16kg, délka drátu 39.10<sup>3</sup>m od firmy Bedra. Cena nepovlakovaného je zhruba 220Kč/kg a doba jeho využití závisí na rychlosti odvinu drátu AW (pro výpočty spotřeby bylo použito průměrné rychlosti odvinu). Snížením parametru AW lze spotřebu snížit a tím významně i provozní náklady, avšak za zvýšení rizika praskání drátu, znovu navlékání a ztrátových neefektivních časů. Proto se velká změna parametru odvinu nedoporučuje. Méně používaný je zinkem povlakovaný drát pro vyšší výkony řezů **Cobracut**<sup>®</sup> A. Jeho cena je však oproti nepovlakovanému téměř dvojnásobná 399 Kč/kg. Specifikace obou typů a procentuální srovnání řezných rychlostí je v příloze č. 4. Od nákupní ceny cívky je nutné odečíst výkupovou cenu za mosaz, které činí 76Kč/kg.

Životnost deionizační pryskyřice a filtrů, tím samozřejmě i jejich hodinové náklady, jsou proměnlivé a to v závislosti na druhu řezaného materiálu. Např. při řezání tvrdokovů se oproti řezání ocele životnost pryskyřice sníží dvojnásobně, tudíž náklady na ní dvojnásobně vzrostou. Pro tuto kalkulaci se počítá s řezáním ocele.

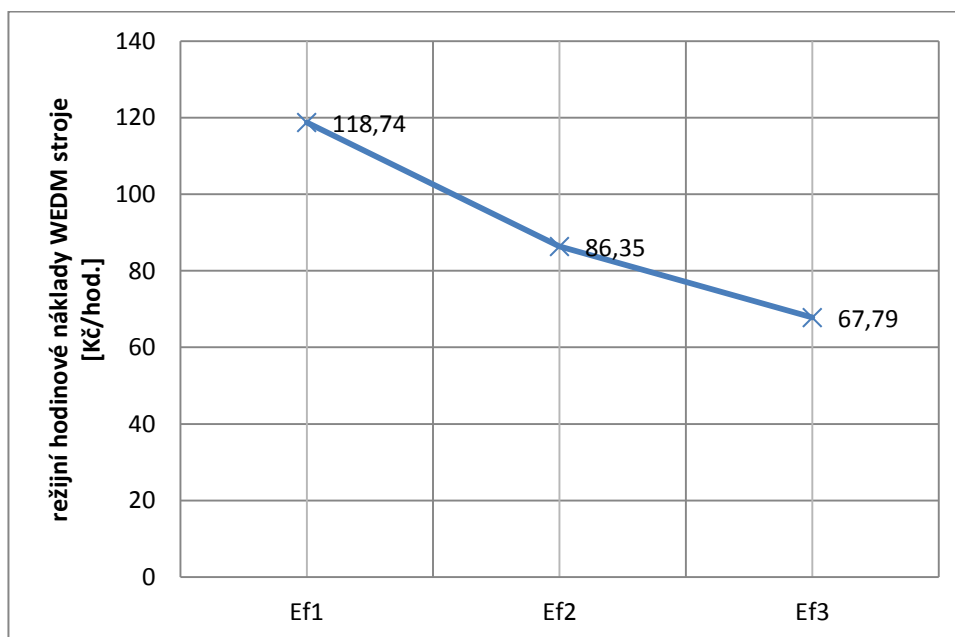
Z uvedených příkladů je patrné, že pro výpočty hodinových sazeb WEDM strojů je nutné dbát zřetel nad výběrem řezaných materiálů, vhodné technologie, nastavení parametrů stroje a použitých drátů.

#### 6.1.2.4. Ostatní nepřímé náklady

Do celkových nákladů je potřeba započítat také poměrnou část nepřímých nákladů tj. režijních nákladů nevýrobních sekcí. Sem patří náklady za energie (nájemné, stočné, spotřebovaný plyn na vytápění, elektrické energie spotřebičů nutných pro provoz firmy, benefity a příspěvky zaměstnancům jako např. stravenky apod.) a mzdy podpůrného personálu, vedení. Na sekci WEDM dvou strojů ve firmě tak připadá 5.340 Kč měsíčně za energie a 32.500Kč za mzdy personálu, vedení a dalších vedlejších nákladů. Běžně tedy činí tyto náklady 20 až 30 % z celkových nákladů stroje. Obecně platí, že menší firmy mají procento režijních nákladů nižší než velké firmy, kde náklady na režii bývá 40% a více, protože je zde více administrativní sekce.

Režijní náklady připadající na WEDM pracoviště lze významně ovlivnit počtem efektivních hodin stroje  $E_f$ . Obecně platí, že s využitím bezobslužného provozu po pracovní směně a automatického chodu volitelného víkendového provozu se náklady přímo úměrou snižují k vzrůstu počtu hodin provozu stroje. Klesající průběh pro tři různé využití provozu stroje je znázorněn v grafu 6.2.

Graf 6.2 Křivka klesajících režijních nákladů s narůstajícím počtem provozních hodin.



Pro výpočet sazby stroje je použito modelu využití stroje  $E_{f2}$  o 2.629 pracovních hodin a k tomu odpovídající režijní hodinové náklady  $N_{rež}=86,35 \text{ Kč.hod}^{-1}$ .

### 6.1.2.5. Celkové náklady a zisk

Celková hodinová sazba stroje po započtení všech nákladů **bez zisku** je:

**Classic:**

$$N_{\text{celk1}} = N_{\text{poř}} + N_{\text{os}} + N_{\text{prov}} + N_{\text{rež}} = 132,8 + 228,7 + 153,8 + 86,4 = 601,7 \text{ Kč.hod}^{-1} \quad (6.4)$$

**Progress:**

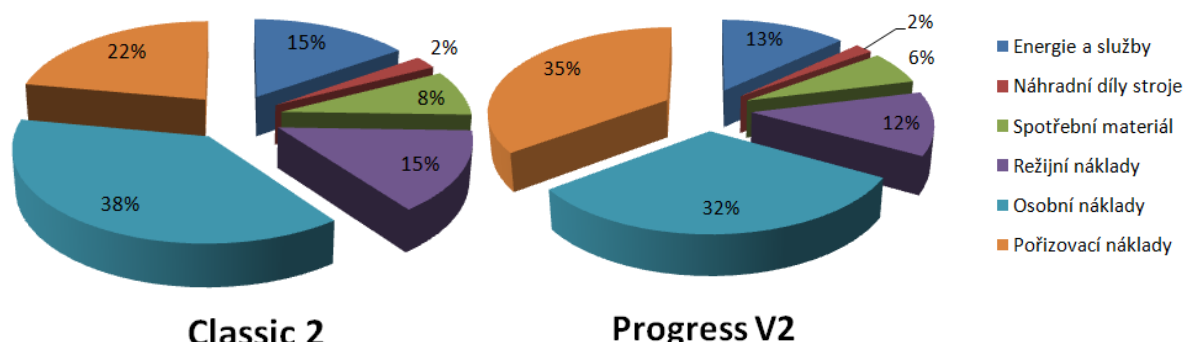
$$N_{\text{celk2}} = N_{\text{poř}} + N_{\text{os}} + N_{\text{prov}} + N_{\text{rež}} = 254,2 + 228,7 + 152,4 + 86,4 = 721,7 \text{ Kč.hod}^{-1} \quad (6.5)$$

Celková hodinová sazba **včetně 20% zisku** je:

$$\text{Classic:} \quad H_{s1} = 1,2 * N_{\text{celk1}} = 722,1 \text{ Kč.hod}^{-1} \quad (6.6)$$

$$\text{Progress:} \quad H_{s2} = 1,2 * N_{\text{celk2}} = 866,1 \text{ Kč.hod}^{-1} \quad (6.7)$$

Graf 6.3 Procentuální rozložení položek celkových nákladů obou strojů.



Zhodnocení ceny hodinové sazby; stroje jsou provozovány pouze v jednosměnném provozu, a proto je hodnota sazby poměrně vysoká. Největší vliv na ní hraje v případě obou strojů položka pořizovacích nákladů a osobních nákladů, což je názorně vidět z koláčových grafů 6.3. V případě staršího stroje Classic jsou pořizovací náklady nižší, avšak jeho provozní náklady jsou o něco vyšší než u stroje Progress. Rozšířením na vícesměnný provoz a zvýšením provozních hodin stroje by se pořizovací i režijní náklady výrazně snížily a mohlo by dojít ke snížení celkových nákladů a sazeb obou strojů přibližně o 20% nebo k rychlejší návratnosti investic.

## 6.2. Stanovení nákladů na výrobu typového představitele

### 6.2.1 Spotřeba materiálu a náklady

Spotřebovaný materiál zahrnuje odebraný materiál při zpracování polotovaru a při samotném WEDM řezu, čistou hmotnost opracovaného dílu a nevyužitý materiál daný tvarem, rozměrem a rozmístěním dílů na polotovaru pro erodování.

Výpočet normy spotřeby materiálu  $N_m$ :

$$N_m = V_p \cdot \rho = 5,09 \cdot 10^{-5} \cdot 7900 = 0,403 \text{ [kg]} \quad (6.9)$$

Výpočet stupně využití materiálu  $k_m$ :

$$k_m = \frac{Q_s}{N_m} = \frac{V_o \cdot \rho}{V_p \cdot \rho} = \frac{1,063 \cdot 10^{-5}}{5,09 \cdot 10^{-5}} = 0,21 \quad (6.8)$$

Kde  $Q_s$  je čistá hmotnost součásti,  $V_p$  je objem materiálu nutného pro výrobu polotovaru pro 1 ks ohybníku,  $V_o$  je čistý objem ohybníku a  $\rho$  hustota materiálu.

Procentuálně je využití materiálu poměrně nízké a to 21%. Stupeň využití  $k_m$  materiálu se zpravidla pohybuje ve strojírenské výrobě v hodnotách  $0,4 \div 0,8$ . Lepším rozvrhem dílců na erodovací kostce, snížením mezer mezi dílci a menším odsazením od krajů je možno dosáhnout vyššího využití materiálu.

Pro konkrétní případ při ceně 190 Kč/kg jsou náklady na přímý materiál 76,57 Kč.

### 6.2.2 Čas řezání dílce a přípravy:

Hrubovací řezy a dočišťovací řezy probíhají při různých podmínkách generátoru a posuvech drátu a od toho se odvíjí čas řezání. Reálné strojní časy pro jednotlivé operace a řezy udává tabulka 6.4. Stroj v průběhu řezu udává okamžitou rychlost posuvu. Střední průměrnou rychlost posuvu k danému řezu lze získat použitím vzorce 6.10. a reálných hodnot strojních časů a délek příslušných řezů.

střední rychlost posuvu  $v_s$  [mm.min<sup>-1</sup>]

délka kontury  $l$  [mm]

celkový počet řezů  $n$  [-]

strojní čas řezu dílce  $T_{AS}$

$$T_{AS} = \frac{l \cdot n}{v_s} \quad [\text{min}] \quad (6.10)$$

Tab. 6.4 Strojní výrobní časy při výrobě ohybníku a střední průměrná rychlost posuvu.

| Označení WEDM stroje                       |     |        | Classic 2 |          | Progress V2 |          |
|--------------------------------------------|-----|--------|-----------|----------|-------------|----------|
| Operace řezání                             | $n$ | $l$    | $v_s$     | $T_{AS}$ | $v_s$       | $T_{AS}$ |
| 1. Hlavní tvar                             | 4   | 190,03 | 3,88      | 195:24   | 5,16        | 147:18   |
| Hs - Hlavní hrubovací řez                  | 1   |        | 1,88      | 100:37   | 2,39        | 79:22    |
| Ns <sub>1</sub> - Následný dokončovací řez | 1   |        | 8,09      | 23:30    | 6,99        | 27:10    |
| Ns <sub>2</sub> - Následný dokončovací řez | 1   |        | 4,64      | 40:58    | 12,70       | 14:58    |
| Ns <sub>3</sub> - Následný dokončovací řez | 1   |        | 6,18      | 30:46    | 7,37        | 25:48    |
| Otvor na nose                              | 4   | 3,64   | 0,76      | 02:24    | 7,16        | 2:02     |
| Hs                                         | 1   |        | 7,53      | 00:29    | 9,93        | 0:22     |
| Ns <sub>1</sub>                            | 1   |        | 5,75      | 00:38    | 4,96        | 0:44     |
| Ns <sub>2</sub>                            | 1   |        | 6,83      | 00:32    | 12,13       | 0:18     |
| Ns <sub>3</sub>                            | 1   |        | 4,85      | 00:45    | 5,75        | 0:38     |
| 2. Ořez boků                               | 4   | 96,72  | 5,00      | 58:00    | 9,07        | 42:38    |
| Hs                                         | 1   |        | 2,78      | 34:48    | 3,29        | 29:14    |
| Ns <sub>1</sub>                            | 1   |        | 13,46     | 07:11    | 15,94       | 06:04    |
| Ns <sub>2</sub>                            | 1   |        | 6,04      | 16:01    | 22,85       | 04:14    |
| Ns <sub>3</sub>                            | 1   |        | -         | -        | 32,97       | 02:56    |
| Přesný otvor Ø 8mm                         | 4   | 29,12  | 5,38      | 21:39    | 8,22        | 14:10    |
| Hs                                         | 1   |        | 2,20      | 13:16    | 3,61        | 08:04    |
| Ns <sub>1</sub>                            | 1   |        | 9,60      | 03:02    | 14,09       | 02:04    |
| Ns <sub>2</sub>                            | 1   |        | 5,41      | 05:23    | 21,31       | 01:22    |
| Ns <sub>3</sub>                            | 1   |        | -         | -        | 10,92       | 02:40    |
| Volný otvor Ø 11mm                         | 1   | 40,04  | 2,31      | 17:19    | 3,73        | 10:44    |
| Hs                                         | 1   |        | 2,31      | 17:19    | 3,73        | 10:44    |
| Volný otvor ovál                           | 1   | 28,02  | 2,42      | 11:34    | 7,84        | 07:18    |
| Hs                                         | 1   |        | 2,42      | 11:34    | 7,84        | 07:18    |
| 3. Řez zubů na funkční části               | 4   | 15,84  | 11,73     | 5:24     | 15,52       | 04:05    |
| Hs                                         | 1   |        | 6,60      | 02:24    | 9,70        | 01:38    |
| Ns <sub>1</sub>                            | 1   |        | 23,76     | 00:40    | 19,01       | 00:50    |
| Ns <sub>2</sub>                            | 1   |        | 14,62     | 01:05    | 23,76       | 00:40    |
| Ns <sub>3</sub>                            | 1   |        | 12,67     | 01:15    | 17,93       | 00:53    |
| 4. Řez náběhů zubů                         | 4   | 14,37  | 12,23     | 04:42    | 15,97       | 03:36    |
| Hs                                         | 1   |        | 8,29      | 01:44    | 13,47       | 01:04    |
| Ns <sub>1</sub>                            | 1   |        | 31,93     | 00:27    | 15,40       | 00:56    |
| Ns <sub>2</sub>                            | 1   |        | 11,98     | 01:12    | 19,60       | 00:44    |
| Ns <sub>3</sub>                            | 1   |        | 10,91     | 01:19    | 16,58       | 00:52    |
| Celkový čas                                |     |        |           | 316:53   |             | 231:51   |

Vedle čistého času jiskřícího řezu se v celkovém strojním čase projeví i vedlejší časy včetně časů nečinnosti stroje (tj. prodlevy mezi ukončením a spouštěním strojní operace). Stroj je sice v tu chvíli zapnut v automatickém režimu, ale nevykonává obráběcí cyklus, protože probíhá příprava stroje na vlastní řez.

Celkové vedlejší časy stroje jsou pak závislé zejména na množství prvků a tím i přejezdů mezi naprogramovanými prvky dílce a znovu navlékání drátu s najžděním do řezu.

V následující tabulce 6.5 je uvedené srovnání změřených vedlejších časů přípravy před řezem u obou strojů AGIE.

Tab. 6.5 Ukázka vedlejších časů strojů Agie.

| Označení WEDM stroje                                                 | Classic V2 | Progress 2 |
|----------------------------------------------------------------------|------------|------------|
|                                                                      | Čas [s]    |            |
|                                                                      | 2:05       | 1:28       |
| <b>Automatický režim stroje po obrábění:</b>                         |            |            |
| přestřihnutí drátu                                                   | 26         | 18         |
| odjezd horní hlavy                                                   | 20         | 10         |
| <b>Automatický režim stroje před začátkem obrábění:</b>              |            |            |
| příjezd horní hlavy do bezpeč.výšky, napuštění do úrovně pod obrobek | 25         | 12         |
| nájezd do polohy startovacího bodu                                   | 4          | 3          |
| navlečení drátu                                                      | 39         | 19         |
| sjetí hlavy do pracovní výšky nad obrobek                            | 5          | 10         |
| dopouštění vany – zatopení obrobku včetně spuštění výplachu          | 0          | 15         |
| spuštění výplachu                                                    | 2          | 0          |
| spuštění cyklu řezání – prodleva                                     | 4          | 1          |

Pro stanovení nákladů výroby ohybníku na WEDM strojích je potřebné počítat také s **časem přípravným a seřizovacím**.

Do přípravného času patří například čas tvorby NC programu, přenesení do stroje, úprava dat, řezných parametrů popř. technologií ve stroji. Seřizovací čas obsahuje například výměnu drátu a příslušenství stroje a úpravu nástrojových korekcí zadáním parametrů do softwaru stroje (jen v případě potřeby), dále zasazení upínacích přípravků a svěráků na stůl, upnutí obrobku a jeho ustanovení pomocí číselníkového úchylkoměru, stanovení nulového bodu obrobku NBO atd.

Tab.6.6 Přípravný čas pro výrobu ohybníku.

| Přípravný čas                            |        |
|------------------------------------------|--------|
| Tvorba NC programu v PEPS                | 65 min |
| Přenesení dat do řídicího systému stroje | 5 min  |
| Úprava dat, technologií                  | 5 min  |
| Úprava řezných parametrů                 | 2 min  |
| Celkem                                   | 77 min |

Tab.6.7 Seřizovací časy pro výrobu ohybníku.

| Označení WEDM stroje                                             | Classic V2 | Progress 2 |
|------------------------------------------------------------------|------------|------------|
|                                                                  | čas [s]    |            |
| <b>Upnutí, měření a stanovení NBO, zásahy obsluhy, kontrola:</b> | 12:25      | 8:40       |
| upnutí upínacího přípravku na stůl stroje                        | 60         | 60         |
| upnutí obrobku do svěráku či upínkami                            | 45         | 45         |
| nasazení a vyjmutí úchylkoměru                                   | 6          | 6          |
| vyrovnání polotovaru úchylkoměrem                                | 190        | 190        |
| ruční najetí do blízkosti hlav                                   | 35         | 30         |
| navlečení drátu                                                  | 39         | 19         |
| stanovení nulového bodu obrobku – středění drátem prováděno 2x   | 285        | 140        |
| nasazení krytky proti odstříku                                   | 5          | -          |
| zajištění obrobku magnety                                        | 25         | 25         |
| vyjmutí odpadu z pracovního prostoru                             | 5          | 15         |
| ručně ovládané odjetí hlav, vyjmutí a očištění obrobku ofukem    | 30         | 25         |
| základní kontrola dílce                                          | 30         | 30         |

Celkový výrobní čas je 458 minut (Classic) a 357 min (Progress). Tzn. 28% rozdíl.

### 6.2.3 Kalkulace nákladů výroby představitele

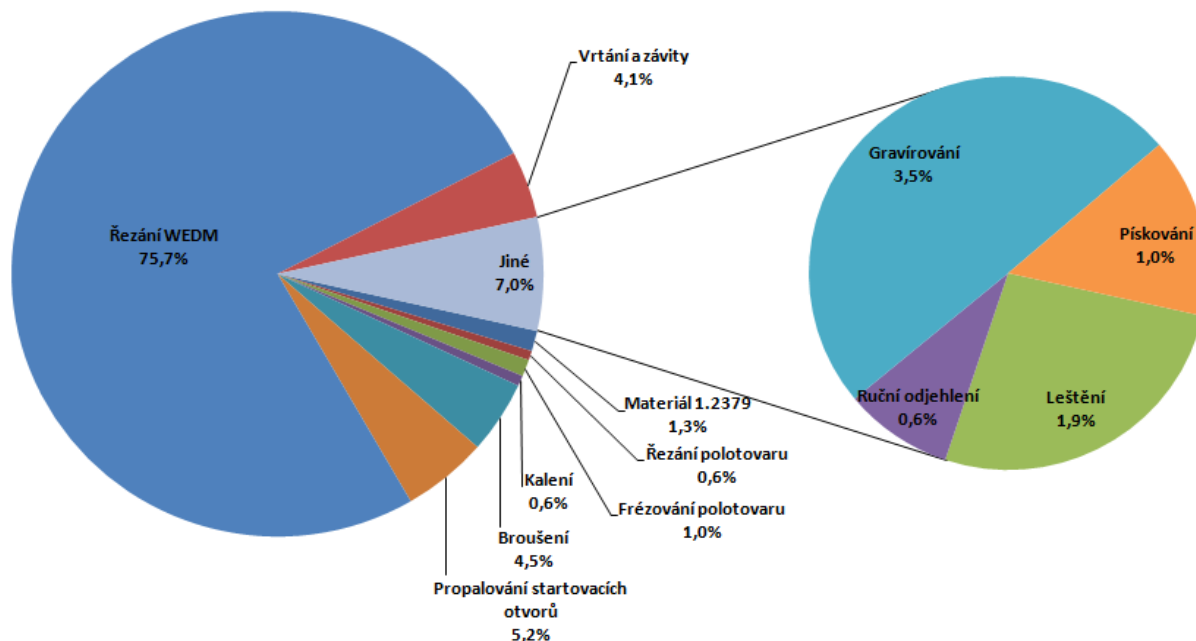
Cena za přípravu polotovaru je rozpočítaná na poměrnou část 1 ks ohybníku. V tabulce 6.8 jsou uvedené jednotlivé sazby pracovišť, hmotnost spotřebovaného materiálu a výrobní čas pro konkrétní operaci.

Tab. 6.8 Náklady na jednotlivé operace výroby ohybníku.

| Operace                | Čas [min] |     | Hmotnost [kg] | Sazba pracoviště        | Náklady [Kč] |          |
|------------------------|-----------|-----|---------------|-------------------------|--------------|----------|
|                        |           |     |               |                         | Classic      | Progress |
| Materiál 1.2379        | -         | -   | 0,4           | 190Kč/kg                | 77           |          |
| Řezání polotovaru      | 6         | -   | -             | 350Kč/hod.              | 35           |          |
| Frézování polotovaru   | 5         | -   | -             | 750Kč/hod.              | 62,5         |          |
| Kalení                 | -         | -   | 0,25          | 156Kč/kg                | 39           |          |
| Broušení               | 21        | -   | -             | 450Kč/hod.              | 157,5        |          |
| Propalování otvorů     | 35        | -   | -             | 540Kč/hod.              | 315          |          |
| Řezání WEDM            | 458       | 357 | -             | 602Kč/hod.   722Kč/hod. | 4590         | 4287     |
| Vrtání děr a závitů    | 20        | -   | -             | 750Kč/hod.              | 250          |          |
| Broušení můstku        | 15        | -   | -             | 450Kč/hod.              | 112,5        |          |
| Ruční odjehlení ostřin | 5         | -   | -             | 450Kč/hod.              | 37,5         |          |
| Gravírování            | 18        | -   | -             | 700Kč/hod.              | 210          |          |
| Pískování              | 10        | -   | -             | 375Kč/hod.              | 62,5         |          |
| Leštění                | 15        | -   | -             | 450Kč/hod.              | 112,5        |          |
| Celkové náklady        |           |     |               |                         | 6061         | 5758     |

Celkové náklady na výrobu ohybníku tak činí ve verzi výroby na stroji Classic 6061Kč a 5758 Kč na stroji Progress. Přičemž z koláčového grafu 6.4 rozložení nákladů je patrné, že technologie drátového řezání má při výrobě ohybníků zásadní vliv na výslednou cenu, což je dáno poměrným časem výroby i sazbou strojů.

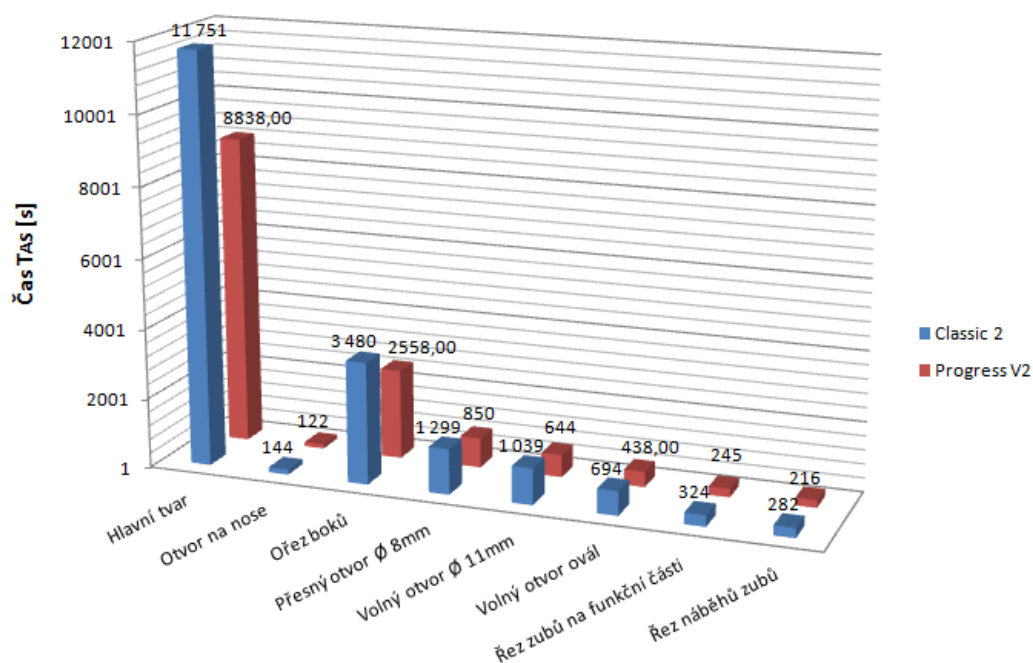
Graf. 6.4 Rozložení nákladů na výrobu ohybníku.



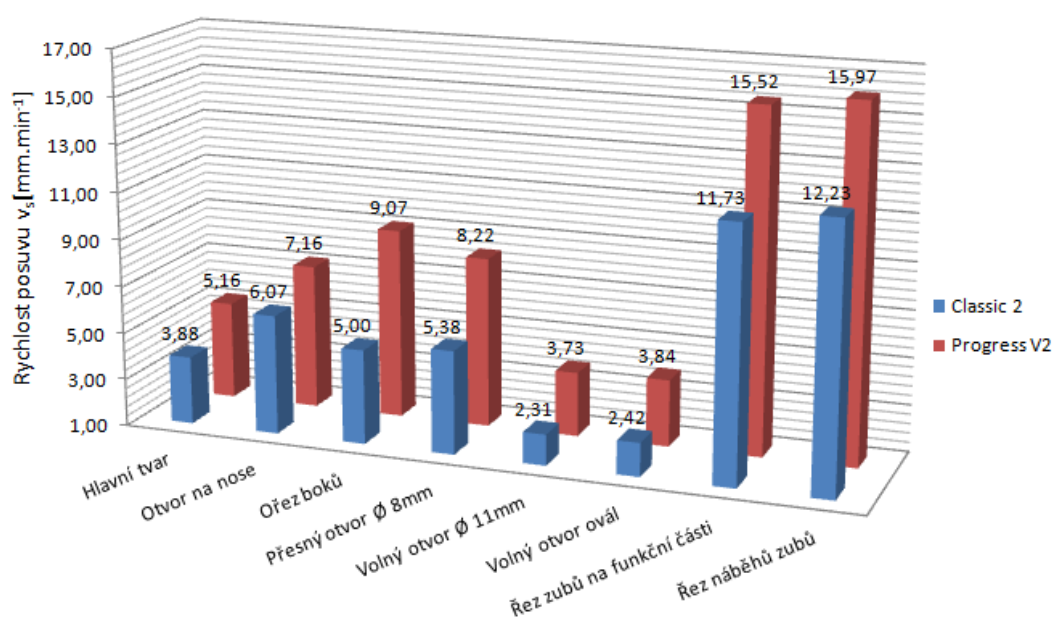


## 7 DISKUZE

Bližším zaměřením na výsledky čistých obráběcích časů obou ve firmě používaných WEDM strojů viz tab. 6.4 lze vyhotovit sloupcové grafy 7.1 a 7.2, jež jasně ukazují zhruba o 30% až 50% kratší řezné časy a vyšší produktivitu Progressu, která je daná vyšší střední rychlostí posuvu řezů, přičemž technologické podmínky byly stanoveny výběrem z automatické databáze technologií Teccut podle cílů opracování. Pro oba Agie stroje byly voleny shodné kvalitativní parametry obrobku.



Graf. 7.1 Sloupcově znázorněné porovnání řezných časů u strojů Classic a Progress.



Graf. 7.2 Porovnání středních rychlostí posuvů u strojů Classic a Progress.

**Řezné časy** jsou kratší díky novějšímu generátoru a databázi technologií. Souhrnně jsou kratší i vedlejší časy včetně časů nečinnosti (prodlev) stroje.

Ze výpisu dat softwaru stroje Progress bylo zjištěno, že **vedlejší časy** WEDM strojů v automatickém chodu stroje pro první fázi řezání ohybníku činí přibližně 3% pro řez hlavního tvaru a 50% pro otvor na nose ohybníku, pro ořez a otvory v druhé fázi jsou téměř 25% z čistého času a pro třetí fázi a čtvrtou fázi kolem 40-50 %. Obecně je procento závislé na délce řezu a řezaného času. Při dlouhém řezu je pochopitelně procento vedlejší čas nižší než u krátkých řezů a velkého množství prvků s neustálým stříháním, přejížděním a navlékáním drátu. Takovými prvky mohou být například masky s množstvím přesných otvorů. Zde by byl stroj Progress díky optimalizovaným vedlejším časům poznatelně výkonnější, jak ukazuje tabulka 6.5 vedlejších časů v kapitole 6.

Jednotlivé cykly stroje jako např. spuštění měření a vyhodnocení nulového bodu na obrobku je u stroje Progress časově o polovinu rychlejší. Tyto **optimalizované seřizování časy** jsou kratší než u stroje Classic díky rychlejší reakci řídicího software a díky jinému odměřování polohy os. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3., Progress využívá k odměřování skleněných pravítek, a proto může být stanovení polohy určeno rychleji.

I přes téměř dvojnásobnou pořizovací cenu stroje Progress a tudíž vyšší hodinovou sazbou stroje o 20% jsou vlivem vyšší produktivity jeho náklady na řezání v konečném důsledku o 7% nižší než u stroje Classic.

Nicméně i starší stroj AGIE Classic 2 má své přednosti. Tím může být jednodušší systém a konstrukce výplachu bez lázně. U toho systému odpadají časy potřebné pro napouštění a vypouštění lázně a možné poruchy plovacích a spínacích prvků. Zato však musí být vždy opatřován krytkou proti odstříku dielektrické kapaliny ven mimo pracovní prostor a rohožemi bránícím odrazu kapek dielektrika od boků krytu. Odvod tepla a odpadu z obrobku není tak účinný jako při zatopení celého obrobku v lázni s čímž souvisí i nižší dosahovaná přesnost obrobku (viz srovnání tvarové tolerance  $T_{km}$  a drsnosti  $R_a$  v kapitole 3.3. a v tabulce 3.1.) S dosahovanou přesností výsledných obrobků souvisí i podmínky prostředí sekce WEDM oddělení ve firmě. Pro obtížné regulování teploty přes letní období by bylo vhodné doporučit pořízení klimatizační jednotky.

V případě sériové výroby identických tvarů ohybníků by bylo možné pro první řez volit noční bezobslužný provoz stroje vhodný pro dlouhé řezy a vyšší tloušťku polotovaru pro řezání základního tvaru pro více obrobků zaráz. Tím se dá proces řezání zefektivnit, protože odpadne část vedlejších časů. V následném kroku by se ale musel tento tvar rozřezávat a dobrušovat na požadovaný rozměr jednotlivých ohybníků. Zároveň pro použití bezobslužného režimu na noc obsluha běžně nastavuje snížený výkon řezání o řádově 30 až 40%, aby byl zajištěn bezporuchový stabilní řezný proces v době jejich nepřítomnosti. To přináší delší řezné časy. Zůstává tedy otázkou, o kolik by noční řezy a použití silnějších polotovarů přineslo snížení výrobních nákladů. To by mohl být například předmět zkoumání případných zájemců na téma drátového řezání.

## ZÁVĚR

Byly zpracovány všechny body zadání práce včetně realizace výroby typového představitele ohýbací jednotky - ohybníku.

V teoretické části práce je představen fyzikální princip elektroerozivního obrábění, rozbor a funkce součástkové základny dílců ohýbací jednotky, současný stav firmy, základní popis AGIE WEDM strojů a možnost používaného programovacího softwaru drátového řezání.

V praktické části diplomové práce je řešena výroba ohybníku pomocí drátové elektroeroze v podmínkách firmy Eberhard Automatizace s.r.o. v Jihlavě. Pro ni byl zpracován výrobní a technologický postup ohybníku označeného výrobním výkresem č. 5.627.452.138 a vytvořen NC program v softwaru drátového řezání PEPS V7.0. Výroba ohybníku je rozdělena na přípravu polotovaru erodovací kostky, na doplňkové a dokončovací operace ohybníku a na hlavní část výroby pomocí drátového řezání rozvrženého posloupně do čtyř fází.

V technicko-ekonomické části práce jsou řešeny jednotlivé dílčí náklady, výpočet celkových nákladů na provoz strojů AGIE Progress V2 a AGIE Classic 2 a stanovení jejich hodinové sazby. V druhé části jsou rozebrány reálné výrobní časy při elektroerozivním drátovém obrábění a provedena kalkulace celkových nákladů na výrobu představitele ohybníku.

Při výrobě dvou kusů identických dílců ohybníků za stejných podmínek výběru kvalitativních parametrů obrobku bylo zjištěno následující:

- kratší řezné časy v průměru o 30-50 % při řezání strojem Progress V2,
- kratší výsledný výrobní čas o 28 % při řezání strojem Progress V2,
- použitím výkonnějšího novějšího stroje Progress dojde k snížení přípravného, seřizovacího i výrobního času a tím také ke snížení konečné ceny obrobku,
- z ekonomického hlediska je u stroje Progress 7 % úspora nákladů při výrobě ohybníku oproti stroji Classic a i přes vyšší hodinovou sazbu u stroje Progress V2, která je téměř o 20% vyšší hlavním vlivem dvojnásobné pořizovací ceny stroje.

Elektroerozivní obrábění je vhodné pro výrobu přesných dílců, zejména pokud se jedná o kalené tvrdé materiály polotovaru. Použitá metoda výroby ohybníku se proto jeví jako velmi vhodná i přes vyšší nákladovost elektroerozivní technologie.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1.vydání. Košice: Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.
3. PÍŠKA, Miroslav, a kolektiv autorů. *Speciální technologie obrábění*, 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2009. 252 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
4. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KERAČINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění: Technologie EDM*. [online]. 2007-19-7 [cit. 2013-02-10]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>.
5. *Theory: To study influence of process parameters on the Wire EDM*. [online]. [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://coep.vlab.co.in/?sub=34&brch=105&sim=1028&cnt=1>
6. MOURALOVÁ, Kateřina. *Vyšší požadavky na snižování nákladů: rubrika Výroba/Nekonvenční technologie*. [online]. 2010-11-18 [cit. 2013-03-05]. Dostupné také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyssi-pozadavky-na-snizovani-nakladu.html>.
7. DMOWSKA, A., B. NOWICKI a A. PODOLAK-LEJTAS. *Surface Layer Properties after Successive EDM or EDA and Then Superficial Roto-Peen Machining*. Advances in Tribology, ID 723919, 12, s. 2012. doi:10.1155/2012/723919 [online]. [cit. 2013-03-13]. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/at/2012/723919/fig1/>.
8. HARCUBA, P., L. BAČÁKOVÁ, J. STRÁNSKÝ, M. BAČÁKOVÁ, K. NOVOTNÁ a M. JANEČEK. *Surface treatment by electric discharge machining of Ti–6Al–4V alloy for potential application in orthopaedics*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. [online]. 2012-03-07 [cit. 2013-03-16]. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616111001822>
9. OSKUJE, A.A, T. SHAHRABI a A. LAJEVARDI. *Failure of pipeline expander segments due to undesirable EDM*, Engineering Failure Analysis, s. 34-46, ISSN 1350-6307, 10.1016/j.engfailanal.2012.09.001. [online]. 2013-03-28 [cit. 2013-03-30]. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630712001860>.
10. FISHER, G. et al. *Příručka pro uživatele. C. AGIE CHARMILLES GROUP*. Praha: Geaálka AG, 2000.
11. Eberhard. [online]. [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.eberhard-ag.com/>
12. *Elektroerozivní drátové řezání obrobků ve vodní lázni: rubrika Trendy*. [online]. 2002-2-9 [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-dratove-rezani-obrobku-ve-vodni-lazni.html>.
13. *MM průmyslové spektrum*, Elektroerozivní stroje: rubrika Trendy/Obrábění [online]. 2003-21-5 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-stroje.html>.
14. *AGIE drátové řezačky*. [online]. [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.agiecharmilles.cz/agiewedm.html>

15. *PEPS CAD SAM SYSTÉM, Drátové řezání*. [online]. [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: [http://www.peps.cz/dratove\\_rezani/](http://www.peps.cz/dratove_rezani/)
16. *Stauberstahl, Kaltarbeitsstahl* . [online]. [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: [http://www.stauberstahl.com/fileadmin/pdf/1.2379\\_TD.pdf](http://www.stauberstahl.com/fileadmin/pdf/1.2379_TD.pdf)
17. *Poldi, materiálové listy*. [online]. [cit. 2013-06-02]. Dostupné z: <http://www.poldi.cz/materialove-listy>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka/Symbol                        | Jednotka              | Popis                                       |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| <b>A<sub>w</sub></b>                  | [mm.s <sup>-1</sup> ] | Rychlost odvinu drátu                       |
| <b>B</b>                              | [-]                   | Typ lázně                                   |
| <b>CAD</b>                            | [-]                   | Computer aided design                       |
| <b>CAM</b>                            | [-]                   | Computer aided manufacturing                |
| <b>CNC</b>                            | [-]                   | Computer numerical control                  |
| <b>CVD</b>                            | [-]                   | Chemical vapor deposition                   |
| <b>D</b>                              | [-]                   | Počet pracovních dní za rok                 |
| <b>DC</b>                             | [-]                   | Direct current                              |
| <b>DWG</b>                            | [-]                   | Cad formát                                  |
| <b>DXF</b>                            | [-]                   | Drawing exchange format – cad formát        |
| <b>EDG</b>                            | [-]                   | Elektrick discharge grinding                |
| <b>EDM</b>                            | [-]                   | Elektrick discharge machining               |
| <b>E<sub>f</sub></b>                  | [-]                   | Počet efektivních hodin stroje              |
| <b>E<sub>fmax</sub></b>               | [h/rok]               | Maximální efektivní fond stroje             |
| <b>E<sub>f1</sub></b>                 | [h/rok]               | Efektivní časový fond obslužného provozu    |
| <b>E<sub>f2</sub></b>                 | [h/rok]               | Efektivní časový fond bezobslužného provozu |
| <b>F</b>                              | [N]                   | Síla                                        |
| <b>F<sub>w</sub></b>                  | [N]                   | Napnutí drátu                               |
| <b>H</b>                              | [mm]                  | Výška řezu                                  |
| <b>H<sub>I</sub></b>                  | [A.mm <sup>-2</sup> ] | Proudová hustota                            |
| <b>HRC</b>                            | [-]                   | Tvrdost podle Rockwella                     |
| <b>H<sub>s</sub>, N<sub>s</sub></b>   | [-]                   | Označení hrubovacího a dokončovacího řezu   |
| <b>H<sub>s1</sub>, H<sub>s2</sub></b> | [-]                   | Hodinová sazba stroje                       |
| <b>HV</b>                             | [-]                   | Mikrotvrdost dle Vickerse                   |
| <b>I</b>                              | [A]                   | Pracovní proud výboje                       |
| <b>I<sub>e</sub></b>                  | [A]                   | Střední vybíjecí proud                      |
| <b>IGES</b>                           | [-]                   | Cad formát                                  |
| <b>K</b>                              | [μS/cm]               | Vodivost                                    |
| <b>K<sub>a</sub></b>                  | [-]                   | Součinitel                                  |
| <b>K<sub>e</sub></b>                  | [-]                   | Konstanta úměrnosti                         |
| <b>K<sub>i</sub></b>                  | [-]                   | Součinitel úběru katodu a anodu             |
| <b>LATE/EARLY</b>                     | [-]                   | Typ strategie                               |
| <b>M</b>                              | [-]                   | Modul                                       |
| <b>NC</b>                             | [-]                   | Numerical control                           |
| <b>N<sub>celk</sub></b>               | [-]                   | Náklady celkové                             |
| <b>N<sub>m</sub></b>                  | [kg]                  | Norma spotřeby materiálu                    |
| <b>N<sub>os</sub></b>                 | [-]                   | Náklady na osobu                            |
| <b>N<sub>poř</sub></b>                | [-]                   | Pořizovací náklady                          |
| <b>N<sub>prov</sub></b>               | [-]                   | Provozní náklady                            |
| <b>N<sub>rež</sub></b>                | [-]                   | Režijní náklady                             |
| <b>N<sub>2</sub></b>                  | [-]                   | Molekula dusíku                             |
| <b>Ofs</b>                            | [μm]                  | Dráhová korekce                             |
| <b>Offset</b>                         | [μm]                  | Korekce tras drátu                          |
| <b>P</b>                              | [W]                   | Výkon při vybíjení                          |
| <b>ProE</b>                           | [-]                   | Pro Engineering - cad formát                |

|                        |                                     |                                         |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>PVD</b>             | [-]                                 | Physical vapor deposition               |
| <b>Q</b>               | [-]                                 | Množství a typ vyplachování             |
| <b>Q<sub>s</sub></b>   | [-]                                 | Čistá hmotnost součásti                 |
| <b>Q<sub>v</sub></b>   | [mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ] | Celkový objem. úbytek materiálu         |
| <b>Ra</b>              | [μm]                                | Střední aritmetická hodnota drsnosti    |
| <b>RS232, RJ45</b>     | [-]                                 | Typ sériového rozhraní                  |
| <b>S</b>               | [-]                                 | Směnnost                                |
| <b>STEP</b>            | [-]                                 | Cad formát                              |
| <b>Str</b>             | [-]                                 | Strategie                               |
| <b>T</b>               | [°C]                                | Teplota                                 |
| <b>T<sub>AS</sub></b>  | [min]                               | Strojní čas řezu dílce                  |
| <b>T<sub>bp</sub></b>  | [h]                                 | Doba bezobslužného provozu              |
| <b>Teccut</b>          | [-]                                 | Automatická databáze technologií Agie   |
| <b>T<sub>km</sub></b>  | [μm]                                | Tvarová tolerance                       |
| <b>T<sub>npl</sub></b> | [dny]                               | Předpokládanou doba údržby po poruše    |
| <b>Ton</b>             | [μs]                                | Délka pulzu                             |
| <b>T<sub>p</sub></b>   | [s]                                 | Doba periody                            |
| <b>T<sub>pl</sub></b>  | [dny]                               | Doba plánovaných údržeb                 |
| <b>T<sub>s</sub></b>   | [h]                                 | Pracovní doba směny                     |
| <b>U<sub>e</sub></b>   | [V]                                 | Střední vybíjecí napětí                 |
| <b>U<sub>k</sub></b>   | [V]                                 | Napětí při zhasnutí výboje              |
| <b>U<sub>z</sub></b>   | [V]                                 | Napětí naprázdno                        |
| <b>U,V</b>             | [-]                                 | Osy stroje                              |
| <b>VADV</b>            | [mm.min <sup>-1</sup> ]             | Posuv drátu                             |
| <b>VBD</b>             | [-]                                 | Výměnné břitové destičky                |
| <b>V<sub>i</sub></b>   | [mm <sup>3</sup> ]                  | Množství odebraného materiálu           |
| <b>V<sub>o</sub></b>   | [m <sup>3</sup> ]                   | Objem dílu                              |
| <b>V<sub>p</sub></b>   | [m <sup>3</sup> ]                   | Objem materiálu polotovaru              |
| <b>WEDM</b>            | [-]                                 | Wire electric discharge machining       |
| <b>W<sub>i</sub></b>   | [J]                                 | Energie výboje                          |
| <b>XMT</b>             | [-]                                 | Cad formát                              |
| <b>X,Y, Z</b>          | [-]                                 | Osy stroje                              |
| <b>d,Ø</b>             | [mm]                                | Průměr                                  |
| <b>f</b>               | [s <sup>-1</sup> ]                  | Frekvence výbojů                        |
| <b>h</b>               | [μm]                                | hloubka                                 |
| <b>k<sub>m</sub></b>   | [%]                                 | Stupeň využití materiálu                |
| <b>l</b>               | [mm]                                | Délka kontury                           |
| <b>n</b>               | [-]                                 | Celkový počet řezů                      |
| <b>p</b>               | [MPa,Bar]                           | Tlak                                    |
| <b>pH</b>              | [-]                                 | Potential of hydrogen                   |
| <b>q</b>               | [C]                                 | Náboj                                   |
| <b>r</b>               | [m]                                 | Poloměr                                 |
| <b>t</b>               | [s]                                 | Čas                                     |
| <b>t<sub>AC</sub></b>  | [min]                               | Jednotkový čas s podílem času směnového |
| <b>t<sub>BC</sub></b>  | [min]                               | Dávkový čas s podílem času směnového    |
| <b>t<sub>d</sub></b>   | [s]                                 | Doba zpoždění                           |
| <b>t<sub>e</sub></b>   | [s]                                 | Doba výboje                             |
| <b>t<sub>i</sub></b>   | [s]                                 | Doba impulzu                            |
| <b>t<sub>o</sub></b>   | [s]                                 | Doba pauzy                              |



|               |                         |                         |
|---------------|-------------------------|-------------------------|
| $v_c$         | [m.min <sup>-1</sup> ]  | Řezná rychlost          |
| $v_s$         | [mm.min <sup>-1</sup> ] | Střední rychlost posuvu |
| <b>2D, 3D</b> | [-]                     | 2,3 Dimenzion           |
| $\eta$        | [%]                     | Účinnost výboje         |
| $\rho$        | [kg.m <sup>-3</sup> ]   | Hustota materiálu       |
| $\Sigma$      | [-]                     | Suma                    |

## SEZNAM PŘÍLOH

|           |                                                                                                                                         |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Příloha 1 | Ukázka rozpisky dílců pro první ohýbací řadu                                                                                            |
| Příloha 2 | Typ čelní frézy a destiček s doporučenými řeznými podmínkami a geometrií                                                                |
| Příloha 3 | Význam parametrů generátoru, drátu, lázně a jejich nastavení                                                                            |
| Příloha 4 | Specifikace drátů firmy Bedra a procentuální srovnání relativních řezných rychlostí nepovlakovaného a povlakovaného drátu různých tříd. |
| Příloha 5 | Technické parametry AGIE CLASSIC V2 a Progress V2                                                                                       |
| Příloha 6 | Opotřebitelné náhradní díly WEDM strojů                                                                                                 |
| Příloha 7 | Výkres ohybníku                                                                                                                         |
| Příloha 8 | NC programy                                                                                                                             |

