

Aplikační možnosti elektroerozivního obrábění při výrobě forem

Bc. Zbyněk Pavlát

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zbyněk Pavlát**
Osobní číslo: **T11035**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Aplikační možnosti elektroerozivního obrábění při výrobě forem**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma
2. Vypracujte postup při výrobě formy od návrhu až po konečný výrobek
3. Provedte experimentální EDM obrábění daných entit, popište postup
4. Porovnejte EDM a frézování na NC (kvalita obráběných ploch, ekonomický rozbor)

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

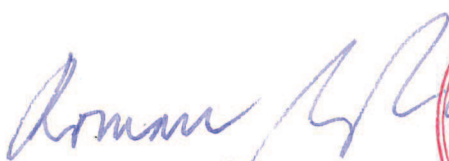
Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

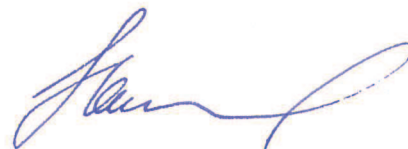
10. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: PAVLÁT Zbyněk

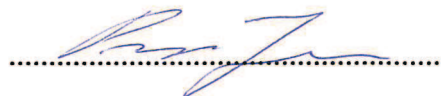
Obor: Vyr. inž.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 25. 4. 2013



¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Cílem mé diplomové práce bylo provést elektroerozivní obrábění daných entit vstřikovací formy. Byl popsán technologický proces výroby tvárníku vstřikovací formy. Náplní bylo vytvořit modely a programy pro frézování nástrojových elektrod pro EDM. U EDM byl zaznamenán celý proces, včetně zhodnocení opotřebení elektrod nebo jakosti povrchu. Závěrem bylo porovnání reálného elektroerozivního obrábění se simulovaným frézováním pro stejné entity z ekonomického hlediska.

Klíčová slova: elektroerozivní obrábění, frézování, vstřikovací forma, elektroda, grafit, CAM, plasty

ABSTRACT

The aims of my thesis were to perform EDM entities of the injection mold. It was described the technological process of production of injection mold core. The scope was creating of models and programs for milling tool electrodes for EDM. The EDM was recorded the whole process, including the assessment of electrode wear and surface quality. In conclusion was the comparison of real EDM milling with simulated milling for the same entities from an economic point of view.

Keywords: electrical discharge machining, milling, injection mold, electrode, graphite, CAM, plasticss

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za odborné rady, ochotu a věcné připomínky při vypracovávání této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval firmě KONFORM – Plastic s.r.o. za využití prostor při vypracování práce. A v neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině za plnou podporu v době zpracovávání práce.

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

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 10 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 11 |
| 1 FORMY PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ | 12 |
| 1.1 VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ | 12 |
| 1.1.1 Vstřikovací cyklus..... | 12 |
| 1.2 MATERIÁLY PRO VSTŘIKOVÁNÍ | 13 |
| 1.2.1 Termoplasty..... | 13 |
| 1.2.2 Reaktoplasty | 14 |
| 1.2.3 Elastomery..... | 14 |
| 1.3 VSTŘIKOVACÍ FORMA | 14 |
| 1.3.1 Konstrukce formy..... | 15 |
| 1.3.2 Vtoková soustava | 16 |
| 1.3.3 Temperace formy | 16 |
| 1.3.4 Vyhazovací systémy..... | 17 |
| 1.3.5 Materiály forem..... | 17 |
| 1.4 KONSTRUKCE VÝSTŘIKU | 18 |
| 1.4.1 Tloušťky stěn..... | 19 |
| 1.4.2 Žebra | 20 |
| 1.4.3 Hrany a zaoblení | 20 |
| 1.4.4 Podkosoý a úkosoý..... | 20 |
| 1.4.5 Závity | 21 |
| 1.4.6 Značky a popisky | 21 |
| 1.4.7 Přesnost výstřiku | 21 |
| 1.4.8 Jakost povrchu..... | 22 |
| 1.4.9 Vady výstřiku | 22 |
| 1.5 VSTŘIKOVACÍ STROJ..... | 23 |
| 1.5.1 Vstřikovací jednotka | 23 |
| 1.5.2 Uzavírací jednotka | 24 |
| 2 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ | 25 |
| 2.1 ROZDĚLENÍ KONVENČNÍCH METOD..... | 25 |
| 2.1.1 Metody s definovanou geometrií nástroje..... | 25 |
| 2.1.2 Metody s nedefinovanou geometrií nástroje | 27 |
| 2.2 CNC FRÉZOVÁNÍ A PROGRAMOVÁNÍ | 28 |
| 2.2.1 CAM systémy..... | 30 |
| 3 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ | 31 |
| 3.1 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ | 32 |
| 3.1.1 Mechanické procesy..... | 32 |
| 3.1.2 Chemické procesy | 33 |
| 3.1.3 Elektrochemické nebo elektrické procesy..... | 33 |
| 3.1.4 Elektrotepelné nebo tepelné procesy..... | 34 |
| 3.2 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ (EDM)..... | 36 |
| 3.2.1 Historie elektroerozivního obrábění..... | 36 |
| 3.2.2 Princip EDM | 37 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.3 | Obráběcí stroje pro EDM | 38 |
| 3.2.4 | Mechanismus úběru materiálu | 39 |
| 3.2.5 | Materiály nástrojových elektrod | 40 |
| 3.2.6 | Dielektrická kapalina | 41 |
| 3.2.7 | Procesní charakteristiky a využití EDM | 41 |
| 3.2.8 | Kvalita výsledného povrchu..... | 42 |
| 3.2.9 | Elektroerozivní drátové řezání | 42 |
| 3.2.10 | Elektroerozivní broušení | 43 |
| 4 | CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE | 44 |
| II | PRAKTICKÁ ČÁST | 45 |
| 5 | ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI..... | 46 |
| 6 | KONSTRUKČNÍ PŘÍPRAVA..... | 47 |
| 6.1 | MODEL VSTŘIKOVANÉHO DÍLU..... | 47 |
| 6.2 | MODEL TVÁRNÍKU A TVÁRNICE | 47 |
| 7 | TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA | 49 |
| 7.1 | STANOVENÍ HRUBÉHO TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU | 49 |
| 7.2 | PROGRAMOVÁNÍ PRO CNC FRÉZOVÁNÍ..... | 49 |
| 7.3 | PŘÍPRAVA PRO ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ..... | 52 |
| 7.3.1 | Modelování nástrojových elektrod..... | 52 |
| 7.3.2 | Volba grafitu pro elektrody | 54 |
| 7.3.3 | Příprava elektrody | 55 |
| 7.3.4 | Frézování nástrojových elektrod..... | 55 |
| 8 | ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ..... | 61 |
| 8.1 | OBRÁBĚCÍ STROJ | 62 |
| 8.2 | UPNUTÍ A VYROVNÁNÍ OBROBKU | 63 |
| 8.3 | NAJÍŽDĚNÍ ELEKTROD | 64 |
| 8.4 | NASTAVENÍ OBRÁBĚCÍHO STROJE..... | 65 |
| 8.5 | PROCES OBRÁBĚNÍ | 69 |
| 8.6 | POVRCH PO OPRACOVÁNÍ | 74 |
| 9 | REÁLNÝ VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK..... | 76 |
| 10 | NÁVRH FRÉZOVÁNÍ ŽEBER NA TVÁRNÍKU | 78 |
| 11 | SROVNÁNÍ FRÉZOVÁNÍ A ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ | 79 |
| 11.1 | ZHODNOCENÍ DLE JAKOSTI POVRCHU | 79 |
| 11.2 | EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ..... | 79 |
| 11.2.1 | Žebra vyrobená elektroerozivním obráběním | 79 |
| 11.2.2 | Žebra vyrobená frézováním | 80 |
| 11.3 | CELKOVÉ ZHODNOCENÍ | 80 |
| | ZÁVĚR | 81 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 82 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 84 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 85 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 87 |

ÚVOD

Formy pro vstřikování plastů zatím nejsou pro širší okruh lidí tak známý pojem. Ovšem s plastovými výrobky z těchto vstřikovacích forem se mohou lidé setkat na každém kroku. Vstřikované výrobky se rozvíjí závratnou rychlostí a v mnoha odvětvích už si nedovedeme život bez nich představit. Jedním z nich je bezpochyby automobilový průmysl, který se neustále vyvíjí a zdokonaluje. Stejným stylem, kterým roste složitost vstřikovaných výrobků a tedy i dutin forem tvořících tyto výrobky, se musí zdokonalovat technologie výroby těchto tvarových dílců. U dílců, kde v dřívějších dobách bylo možno použít konvenční stroje, se dnes setkáváme s číslicově řízenými stroji, ale ani ty již nedovedou zaručit kompletní zhotovení tvarových částí formy. Proto se přistupuje k metodám nekonvenčním, jejichž technologiemi je možno vyrábět tvary a povrchy, jež jsou tradičními technologiemi nevyrobitelné.

Velký rozmach technologií využívajících CAD a CAM aplikací umožňuje zkvalitnění a zefektivnění výroby. V dnešní době začíná výroba již v této elektronické podobě a je často ve velmi pokročilé fázi, ještě předtím, než se objedná materiál k výrobě.

Mezi nekonvenční metody obrábění hojně využívané při výrobě forem se řadí elektroerozivní obrábění. Jedná se o elektrotepelný proces, při kterém nedochází k úběru materiálu mechanickou silou a nevznikají klasické třísky jako u konvenčních metod obrábění. Tento proces je zpravidla ekonomicky náročnější, ale své opodstatnění nachází u výroby dílců, kde již není možnost použít konvenčních metod obrábění. Jedná se například o hluboká tenká žebra, ostré vnitřní rohy nebo povrchy dezénované. Jakost povrchu je velmi důležitá, a zatímco po konvenčních metodách obrábění jako frézování zůstávají nevzhledné stopy po nástrojích, plocha obráběná elektroerozivním obráběním je celistvá a jednotná s matným dezénem. U některých vstřikovaných výrobků je přímo požadavek, aby byl povrch dutiny formy vyráběn elektroerozivním obráběním a tudíž se výsledný povrch otiskl i na vstřikovaný výrobek.

Tato diplomová práce se věnuje převážně elektroerozivnímu obrábění a jeho využití při výrobě forem pro vstřikování plastů, konkrétně pro tvarově nejsložitější dílce formy, tvárnici a tvárnici. Částečně je zde popsána a předvedena problematika konvenčních metod obrábění a to hlavně frézování na CNC strojích s podporou CAM systému.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 FORMY PRO VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ

Podíl strojních součástí vyráběných z plastů neustále roste, tento růst je vyvolán jejich schopností nahradit některé nedostatkové a drahé materiály, neboť mají určité mechanické a fyzikální vlastnosti, které lze výhodně využít. Jsou to například odolnost vůči různým chemikáliím, izolační schopnosti, malá hmotnost nebo nízká tepelná vodivost. Mezi další přednosti patří dostupnost surovin, cenové relace, relativně jednoduchá technologie výroby, u které lze díky modernizaci strojů většinou plně automatizovat výrobu. [15]

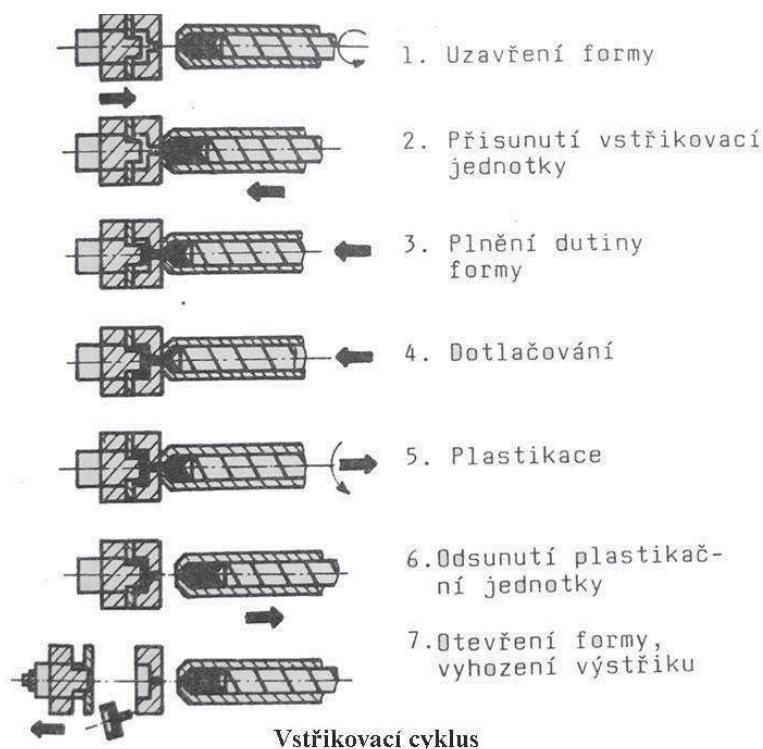
1.1 Vstřikování plastů

Vstřikování plastů je poměrně složitý tepelně-mechanický proces tváření, na kterém se podílí výchozí materiál, ze kterého se vyrábí požadovaná součást, dále výrobní cyklus především se vstřikovacím strojem a ostatním zařízením, umožňující přípravu taveniny a její dopravu za určitých podmínek do formy a v neposlední řadě forma jako nástroj pro vlastní tváření taveniny na součást. Faktory zde uvedené ovlivňují kvalitu výstřiku a jeho užité vlastnosti. [2]

Výroba vstřikováním plastů probíhá nadávkováním a plastikací polymeru ve vstřikovacím stroji a následné jeho dopravě za teploty a tlaku do dutiny formy. Po ochlazení na vyhazovací teplotu je z formy vyjme již hotový výrobek neboli výstřik. [2]

1.1.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus je složen z několika přesně specifikovaných úkonů, které tvoří určitý sled operací. Tento proces je neizotermický, během kterého plast prochází teplotním cyklem. U popisování vstřikovacího cyklu je důležité jednoznačně označit jeho počátek. Jako počátek cyklu se uvádí okamžik, kdy dojde k uzavření formy. Když je forma uzavřena, dojde za určité rychlosti pod předem udaným tlakem ke vstříknutí plastifikované hmoty o požadované teplotě do formy. Hmota zůstává v uzavřené formě pod tlakem, dokud nezačne její ochlazování. Zde nastupuje na řadu dotlak, který skončí při částečném ochlazení plastu uvnitř formy. Když dotlak skončí, plastikační jednotka odjíždí od formy a během odjezdu dochází k plastikaci hmoty potřebné pro další dávku. Po ochlazení výstřiku na vyhazovací teplotu se forma otevře a dojde vyhození výstřiku ven z formy. Po prodlevě, kdy dochází k technologickým úpravám formy, započne opět nový vstřikovací cyklus. [2], [20]



Obr. 1. Vstřikovací cyklus [20]

1.2 Materiály pro vstřikování

Plasty jsou látky složené ze směsi plniva spojeného většinou syntetickou vysokomolekulární pryskyřicí – polymerem a jsou schopné za určitých podmínek získat díky deformaci nový tvar. Polymer je vytvořen řetězcem molekul organických sloučenin – monomerů. Typickým znakem plastů je velikost molekul. Bez výjimky jsou tvořeny makromolekulami, jejichž relativní molekulová hmotnost je 10^3 až 10^7 g.mol⁻¹, zatímco běžné organické sloučeniny mají maximálně 10^2 . Základní rozdělení polymerů je na plasty a elastomery. Plasty se dále ještě dělí na termoplasty a reaktoplasty. [15]

1.2.1 Termoplasty

Termoplasty mají přibližně 80% zastoupení všech používaných plastů. Lze je teplem opakovaně roztavit a po ochlazení převést zpět do tuhého stavu. Jsou tedy opakovaně tavitelné a tváření je možné opakovat. Při zahřívání nastávají pouze změny fyzikální povahy, ale chemická struktura plastu se nemění. Makromolekuly jsou buď lineární, nebo rozvětvené a mohou mít strukturu buď amorfni nebo krystalickou, jež je složena z uspořádaných oblastí, což jsou krystality, obklopených amorfni hmotou. Uspořádanost polymerů není nikdy zcela dokonalá, proto se nazývají tyto látky semikrystalické. Měřítkem je stupeň

krystalinity, který udává relativní podíl krystalických oblastí ve hmotě a může být u téže látky různý podle způsobu zpracování. [15]

1.2.2 Reaktoplasty

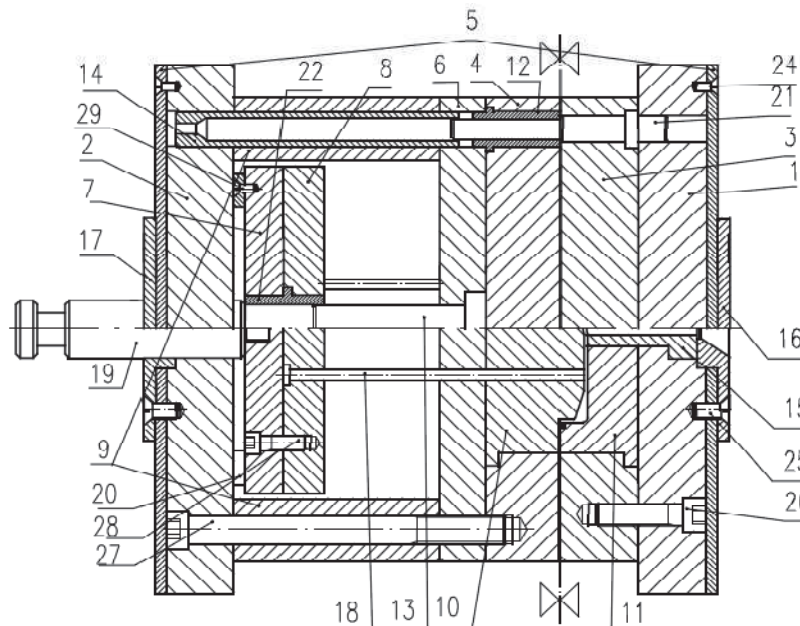
Za působení tepla se stávají nízkomolekulární sloučeniny po omezenou dobu plastické. Polyreakce pokračuje dalším ohřevem a jejím výsledkem je prostorově zesíťovaná amorfni neboli neuspořádaná struktura. Tento děj se nazývá vytvrzování a je nevratný, po vytvrzení již není možné reaktoplasty dále tvarovat, s nepravidelnými prostorovými chemickými vazbami. Průběh vytvrzování lze ovlivňovat katalyzátory. Vytvrzená hmota je netavitelná a nerozpustná. Celý výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu, jelikož jednotlivé úseky makromolekul jsou velmi hustě propojeny. [15]

1.2.3 Elastomery

Jsou to vysokomolekulární polymery, které zachovávají elastické vlastnosti v širokém rozmezí teplot. Vznikají vulkanizací, což je chemická reakce nízkomolekulárních polymerů a přísad. [15]

1.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma dává tavenině po ochlazení výsledný tvar a rozměry výrobku, při zachování požadovaných fyzikálních a mechanických vlastností. Forma je obvykle dvojdielná s tvarovými dutinami v obou částech formy. Do dutiny je plast vstřikován pod tlakem z tavicí komory pomocí vtokové soustavy. Na kvalitu výstřiku má hlavní vliv tlak při vstřikování taveniny a teplota. [2], [15]

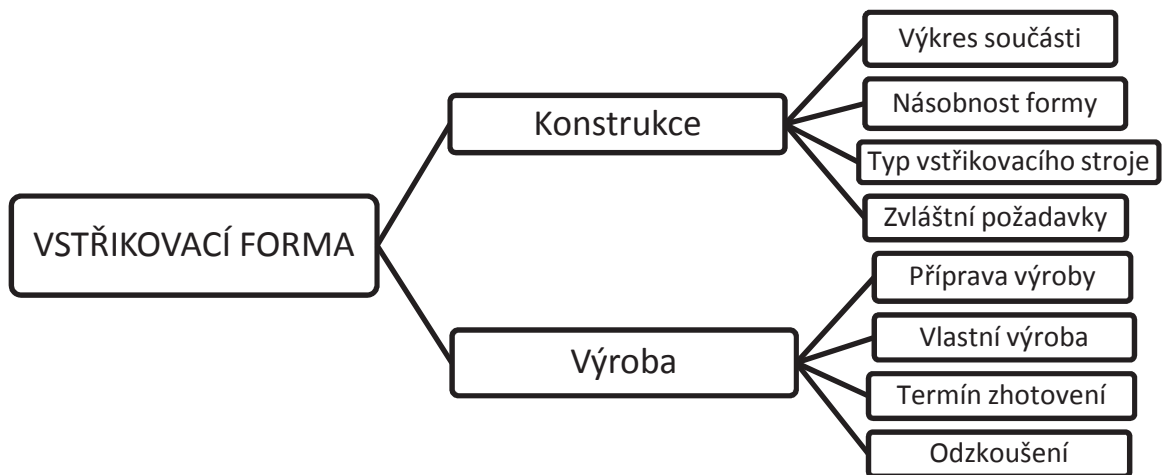


Obr 2. Vstřikovací forma v řezu

1.3.1 Konstrukce formy

Konstrukce formy je závislá na různých faktorech, mezi něž patří otevření vstřikovacího stroje, rozměry upínacích desek, vzájemné uspořádání plastikací a uzavírací jednotky nebo způsoby odstraňování hotových výstřiků z formy a vtokových zbytků. [15]

Pro vyhotovení výkresové dokumentace formy nutné pro její výrobu, je třeba znát celou řadu technických údajů, aby její realizace byla úspěšná. [2]



Obr. 3. Technické údaje potřebné pro konstrukci a výrobu forem. [2]

Mezi velmi důležité rozhodnutí při konstrukci formy patří její násobnost. Násobnost vstřikovací formy se volí především dle požadovaného množství, složitosti, velikosti výstřiku a také dle velikosti stroje, který je k dispozici. Pro malé nebo ověřovací série se volí jednoduché jednonásobné formy, aby byl předpoklad malých nákladů na jejich výrobu. Pro hromadnou výrobu je nutno vypracovat technický a ekonomický rozbor o volbě násobnosti formy v různých možnostech. Při volbě dutiny formy se musí brát zřetel na smrštění polymeru a tuto hodnotu také dutinu zvětšit, k pohodlnějšímu výpočtu nyní slouží pomocné programy, v nichž se dá úspěšně nasimulovat situaci uvnitř dutiny formy.[7]

1.3.2 Vtoková soustava

Řešení vtokové soustavy formy je velmi důležitým aspektem. Složité poměry při vyplňování dutiny formy, zejména otázka změny viskozity taveniny, zúžení profilu průtoku, ochlazování a obtížně stanovitelné odpory při vyplňování formy, nedávají možnost stanovit vtokové poměry matematickým vztahem. Používají se proto hodnoty zjištěné ze zkušeností. [7]

Obecné zásady při řešení vtokových soustav:

- Tvarové dutiny by měly být zaplněny taveninou rovnoměrně
- Vtokové ústí se musí volit tak, aby začištění stop po vtoku bylo co nejjednodušší, napětí ve výstřiku bylo co nejvíce minimalizováno, vyhazování z formy proběhlo co nejjednodušší, snaha zabránit vzniku studených spojů [7]

Vtokové systémy lze rozdělit na studené vtokové systémy (SVS) a vyhřívané vtokové systémy (VVS), z nichž obě skupiny mají své přednosti i nedostatky. [2]

1.3.3 Temperace formy

Stejněměrná a správná teplota tvarových částí formy má podstatný vliv na kvalitu výstřiku a hospodárnost vlastní výroby. Tato skutečnost vyžaduje velmi pečlivé řešení temperačního systému již při konstrukci formy. Jakmile je tavenina vstříknuta do formy, je nutno z výstřiku odvést co nejrychleji a stejněměrně velké množství tepla. U forem pro velkoplošné výstřiky s tenkými stěnami je třeba formu před zahájením provozu ohřát na optimální provozní teplotu, za pomoci temperačního media. Vstřikovací formy se chladí obvykle vodou (možné také olejem), která protéká temperačním systémem. Regulaci zajišťuje nejčastěji ručně ovládaný škrtící ventil, který řídí množství protékající vody v jednotlivých pásmech chlazení formy. Postup chlazení formy probíhá tak, že do nejteplejších

míst ve formě přivádíme temperační medium s nejnižší teplotou, které dále pokračuje do míst vzdálenějších. U forem pro menší výstřiky postačí velmi jednoduchý způsob vedení chladicí kapaliny, vrtanými děrami, jež mají nejčastěji průměr 8 – 12 mm. Pro přívod a odvod temperačního media se používají kovové a polyamidové násadce se závitem. Dlouhé tvárníky nebo jádra je nutno chladit samostatně, například pomocí přepážky nebo mosazné či měděné trubky a zatěsnění pomocí těsnících O kroužků. [7]

1.3.4 Vyhazovací systémy

Při konstrukčním řešení formy se nesmí opomenout spolehlivé vyhození nebo vyjmutí výstřiku z formy. Vstřikovací hmoty se při ochlazování smršťují, a tím vzniká napětí mezi výstřikem a tvárníkem nebo tvarovými vložkami, jádry a podobně. Dobré funkci vyhození nejlépe prospívá podmínka úkosovitosti stěn ve směru vyhazování, nebo také drsnost povrchu. Vyhazovací systém je ovládán buď mechanickým vyrážecem, který je příslušenstvím stroje, nebo samostatným zařízením ve formě. Nejčastěji se používá k vyhazování výstřiků z formy kolíkové vyhazovače, které se umísťují rovnoměrně na ploše nebo na obvodu výstřiku tak, aby nedošlo k zpříčení a následnému poškození výstřiku. Vyhazovače by měly mít rozdílnou tvrdost oproti vodícím plochám, nejméně o 5 HRC. [7]

Příklady druhů vyhazovacích prvků [7]:

- Válcové kolíky – bývají umístěné po okrajích krabicovitých výstřiků
- Tvarové vyhazovače – využívají se pro tenkostěnné výstřiky
- Trubkové vyhazovače – využívají se u výstřiků z válcových jader
- Stírací desky a kroužky – používají se pro menší výstřiky, kde nelze uplatnit válcové nebo tvarové vyhazovače
- Kombinace stírání s vyhazováním – nejprve se uvolní výstřik z vnitřního jádra a poté se setře [7]

1.3.5 Materiály forem

Volba materiálu vstřikovacích forem závisí především na způsobu výroby tvarových dutin. Mezi základní technologie se řadí [15]:

- Odlévání – použití pro formy ze slitin hliníku
- Třískové obrábění – použití pro formy ze slitin mědi a hliníku, oceli
- Obrábění fyzikálními metodami – použití pro formy z oceli

- Vtlačení trnu z kalené oceli, jež má negativní tvar – použití pro formy ze slitin hliníku a mědi, oceli pro tváření za studena s následným tepelným zpracováním
- Rapid tooling – použití pro malosériové formy [15]

Tab. 1. Životnost forem [15]

| Materiál formy | Počet výrobků až (ks) |
|------------------------------------|-----------------------|
| Slitiny hliníku | 10 000 |
| Slitiny mědi | 40 000 |
| Konstrukční oceli nezušlechtěné | 80 000 |
| Konstrukční oceli povrchově kalené | 120 000 |
| Konstrukční oceli zušlechtěné | 150 000 |
| Konstrukční oceli cementované | 250 000 |
| Konstrukční oceli nitridované | 300 000 |
| Nástrojové oceli zušlechtěné | 500 000 |

Používané druhy ocelí k výrobě forem [15]:

- 14 220, 16 420 - k následné cementaci
- 14 340, 15 330, 15 340 - k nitridování
- 12 050, 12 060 - k povrchovému kalení
- 17 024, 17 029, 17 042 - zušlechtěné korozivzdorné (potravinářství)
- 19 083, 19 152, 19 191, 19 312, 19 346-zušlechtěné nástrojové (nejvyšší životnost) [15]

Jelikož jsou dutiny forem silně namáhány, používá se tvrdého chromování povrchu pro zvýšení odolnosti proti otěru abrazivním účinkem plniv, jakými jsou například skleněná vlákna nebo prášky. Pracovní plochy forem, především rozváděcí kanály, je třeba řádně vyleštit. [15]

1.4 Konstrukce výstřiku

Konstrukce výstřiku musí především splňovat vhodnou polohu dělicí roviny a tím je určen i způsob jeho zaformování. K ní se váže i koncepce vyhazování, vtokového systému, odvzdušnění, směr úkosů, přesnost i vzhled a podobně. Při navrhování výrobků se musí zohlednit, že dosažení potřebných rozměrových tolerancí je značně ovlivněno technologií výroby a konstrukcí výstřiku. K optimalizaci tvaru výrobku lze využít i počítačovou simu-

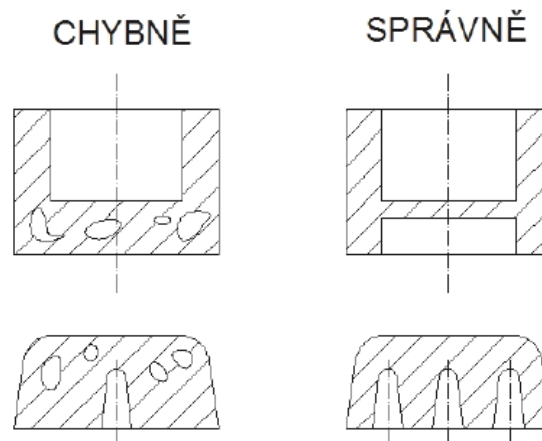
laci celého vstřikovacího procesu pro zvolený druh plastu. Z rozložení průběhu tlaků a teplot při vstřikování doplněné o průběh rychlostí proudění taveniny, průběhu objemových změn při chladnutí a vytvrzování výstřiku je možno provádět konstrukční úpravy výrobků a forem, například kritické průřezy, rozměry a jiné. Mezi další přednosti patří určování technologických podmínek – teploty, časy, tlaky, pracovní cyklus nebo také umístění snímačů pro regulaci procesu. [2], [15]

Vstřikování je nejrozšířenějším způsobem pro zpracování termoplastů. Pro výstřiky z reaktoplastů jsou vhodné dobře tekuté hmoty bez vláknitých plniv. Konstruování je podstatně složitější než u kovových výrobků. Na jakost výrobků mají vliv tyto faktory [2], [15]:

- Smrštění, které nastane při zpracování, uvádí se pro každý plast v daném rozmezí. Smrštěním je ovlivněna hlavně přesnost výstřiku. Záleží tedy na druhu plastu, konstrukci výrobku i na technologii vstřikování.
- Smrštění dodatečné, probíhá delší dobu a je několikanásobně menší než smrštění při ochlazení ve formě.
- Creep neboli tečení vznikne při dlouhodobějším silovém zatížení výrobku, jedná se o plastickou deformaci. U semikrystalických plastů je větší než u amorfních.
- Teplotní roztažnost, která nabývá hodnot přibližně o řád větších, než u kovů. Jedná se ovšem o změnu vratnou.
- Nasákavost, navlhavost, při kterých se mění rozměry dle absorpce vody z okolního prostředí, po vysušení se vrací rozměry na menší hodnoty. [2]

1.4.1 Tloušťky stěn

Tloušťka stěny musí splnit svou závislost s dráhou toku plastu. V úzké dutině se tavenina rychle ochlazuje a tuhne, naopak tlusté stěny se vyznačují dlouhou dobou chlazení. Pokud mají stěny různou tloušťku, nastává problém nestejného tuhnutí taveniny, vzniká vnitřní pnutí a různé povrchové vady jako propadliny a lunkry. Proto by se správná konstrukce tloušťky stěn měla vyznačovat jednotnou tloušťkou a boční stěny nebo žebra, by neměly překročit 0,8 tloušťky hlavní stěny. V případě nemožnosti vyhnout se tlustším stěnám, je vhodné zvolit vylehčení. [2]



Obr. 4. Vylehčení výstřiku. [2]

1.4.2 Žebra

Žebra se rozdělují na dvě skupiny dle funkce, kterou mají plnit na výrobku nebo v dutině formy. Technologická žebra umožňují optimální plnění dutiny formy, brání zborcení stěn nebo odstraňují předpokládaný vznik povrchových vad. Technická žebra zabezpečují pevnost a tuhost součásti. Možná varianta umístění žebra je i z estetického důvodu. [2]

1.4.3 Hrany a zaoblení

Zaoblením se výrazně usnadní tok taveniny v dutině formy, zabrání se koncentraci napětí v místech, kde není zaoblení a sníží se i opotřebení formy, protože ostré přechody vyžadují vyšší vstřikovací tlaky. [2]

1.4.4 Podkoso a úkoso

Sklony stěn výstřiků k dělicí rovině, které slouží k vyjmutí z formy – úkoso, nebo k přidržení ve formě – podkoso. Podkoso které neslouží k technologickým, účelům komplikují konstrukci i funkci formy. Velikost úkosů a podkosů je dána funkcí, kterou mají plnit. Uspořádáním se dělí na vnější a vnitřní. Volbu jejich velikostí ovlivňuje především smrštění, elasticita plastu, povrch stěn formy a automatizace výroby. [2]

Tab. 2. Doporučená velikost úkosů. [2]

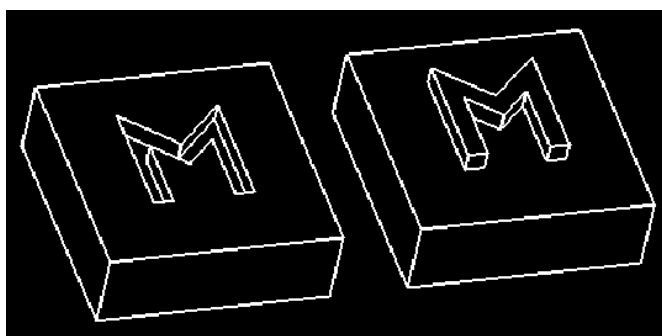
| Úkos pro | Velikost úkosu |
|----------------------|-----------------------------------|
| Vnější plochy | $30' - 2^\circ (1^\circ)$ |
| Vnitřní plochy | $30' - 3^\circ (2^\circ)$ |
| Otvory do hloubky 2d | $30' \div 1^\circ (45')$ |
| Hluboké otvory | $1^\circ \div 10^\circ$ |
| Žebra, nálitky | $1^\circ \div 10^\circ (3^\circ)$ |
| Výstupky | $2^\circ \div 10^\circ$ |

1.4.5 Závity

Závity se vyznačují menší pevností a u jemnějších tvarů i obtížností zaformování. Je proto doporučováno vyrábět na větších průměrech závity s větším stoupáním typu oblého, trapézového a podobných, které jsou pro výrobu vhodnější a jsou také pevnější. Velmi výhodné je vyrábět závity přerušované. Vnější závity se vyrábí ve formách s dělenými čelistmi, kdy je snadné vyhození výstřiku z formy. Vnitřní závity se vyrábí pomocí trnů, které se z výstřiku vyšroubovávají přímo ve formě, nebo jsou vyhozeny i s trnem a vyšroubují se venku z formy. [2]

1.4.6 Značky a popisky

V dutinách forem se zhotovují různé popisky a značky, které jsou poté viditelné na výstřicích, pro zhotovení existuje řada technologií. Vystouplé písmo je výrobně nejjednodušší, ale účelově nejméně vhodné. Zapuštěné písmo je výrobně obtížné, a proto je nejvhodnějším typem vystouplé písmo v zahloubení. [2]



Obr. 5. Typ písma zapuštěného a vystouplého. [2]

1.4.7 Přesnost výstřiku

Přesnost výstřiku udává norma ČSN 64 0006, kdy termoplasty dosahují přesnosti IT16 až IT11, ve výjimečných případech lze dosáhnout hodnoty IT9 (jedná se o jednodušší sou-

části a plasty s menším smrštěním a dobrou tekutostí). Reaktoplasty dosahují přesnosti IT12 až IT10, ve výjimečných případech IT8. [15]

1.4.8 Jakost povrchu

Kromě požadovaných rozměrů je důležitým znakem výstřiku jakost jeho povrchu. Úpravy povrchu se tvoří například dezénováním, barvením a podobně, což nezvyšuje pouze estetický vzhled, ale i účelové využití. Jakost povrchu je obrazem povrchu dutiny formy. Plochy, které se mohou na výstřicích vyskytnout [2]:

- Matné – výrobně nejjednodušší, tedy ekonomicky nejvýhodnější; výhodou je, že zakryjí některé vzhledové nedostatky
- Lesklé – náročné operace opracování dutiny formy; na lesklém povrchu vyniknou některé vady, jako studené spoje, stopy po vtoku a tak dále nebo i vady vzniklé při výrobě formy
- Dezénové – bývají také velmi časté, z různých důvodů, jako zvýraznění některé oblasti, snížení průhlednosti, snadnější manipulace a jiné; také zakrývá různé nedostatky a nepříznivé vzhledové vlastnosti výstřiku; charakter dezénu určuje výrobní technologie, může být vytvořen na libovolném místě výrobku, ale je omezen možností jeho zhotovení ve formě, každá technologie pro výrobu dezénu má vzorník, dle kterého se určí provedení dezénu [2]

1.4.9 Vady výstřiku

Výroba výstřiku vstřikováním je složitý proces, na kterém se podílí řada činitelů, které nejsou vždy v optimální míře. Proto lze na výstřicích sledovat různé vady, které vznikly během procesu. Mezi nejčastější vady patří [2]:

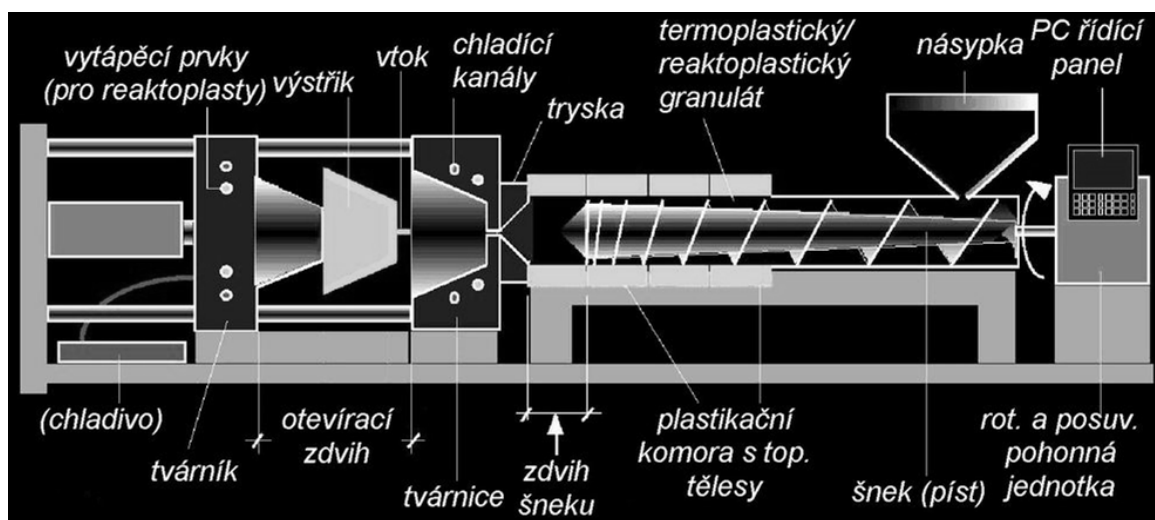
- Deformace – vysoká teplota formy, orientace plniv, nedostatečná doba chlazení, velký podkos
- Křehkost – špatně vysušený materiál, degradace materiálu
- Štípání – nízká teplota formy, špatná rychlost vstřikování, nesnášenlivé materiály
- Propadliny – nízký tlak, vysoká teplota formy, nedostatečné odvzdušnění
- Bubliny – nízký tlak, nízká teplota formy, těkavé složky a plyn ve výstřiku
- Spálená místa – vysoká teplota taveniny, špatné odvzdušnění
- Stříbrné pruhy – vysoká teplota taveniny, zachycené těkavé složky, špatně vysušen materiál

- Přetoky – vysoká teplota taveniny, malá uzavírací síla, vysoký tlak, znečištěný povrch v dělicí rovině [2]

1.5 Vstříkovací stroj

Vstříkovací stroje realizuje vstříkovací cyklus. Vstříkovací stroj se v podstatě skládá ze vstříkovací jednotky a uzavírací jednotky. Tyto dvě části doplňují ovládací okruhy, které jsou hydraulické nebo elektrické. Mezi vstupní informace vstříkovacího stroje patří [10], [15]:

- Vzájemná poloha vstříkovací jednotky a formy
- Automatický cyklus, který vyžaduje snímače tlaků a teplot
- Uzavírací síla a výkon ovlivňují násobnost formy
- Vstříkovací ústrojí, dle potřeby pro termoplasty nebo reaktoplasty
- Použití přídatných zařízení, jako tahače jader nebo jednotky pro oběh temperačního media [15]



Obr. 6. Schéma vstříkovacího stroje. [20]

1.5.1 Vstříkovací jednotka

Úkolem vstříkovací jednotky je připravit a dopravit požadované množství roztaveného plastu s předepsanými technologickými parametry do formy. Množství dopravované taveniny musí být menší, než je kapacita vstříkovací jednotky při jednom zdvihu. Vstříkovací jednotka pracuje tak, že pohybem šneku je dopravován zpracováváný plast z násypky do tavného válce, materiál je posouván šnekem přes vstupní, přechodové a výstupní pásmo. Zde se postupně plastikuje a hromadí před šnekem, který je odlačován do zadní polohy.

Tepelná energie je dodávána pomocí topení, část vznikne také disipací. Tavná komora je zakončena vyhřívanou tryskou, která tvoří spojení mezi vstřikovací jednotkou a formou. Přesné dosednutí trysky na formu zaručuje kulové zakončení trysky do sedla vtokové vložky formy. Souosost je podmínkou jejich správné funkce. [2]

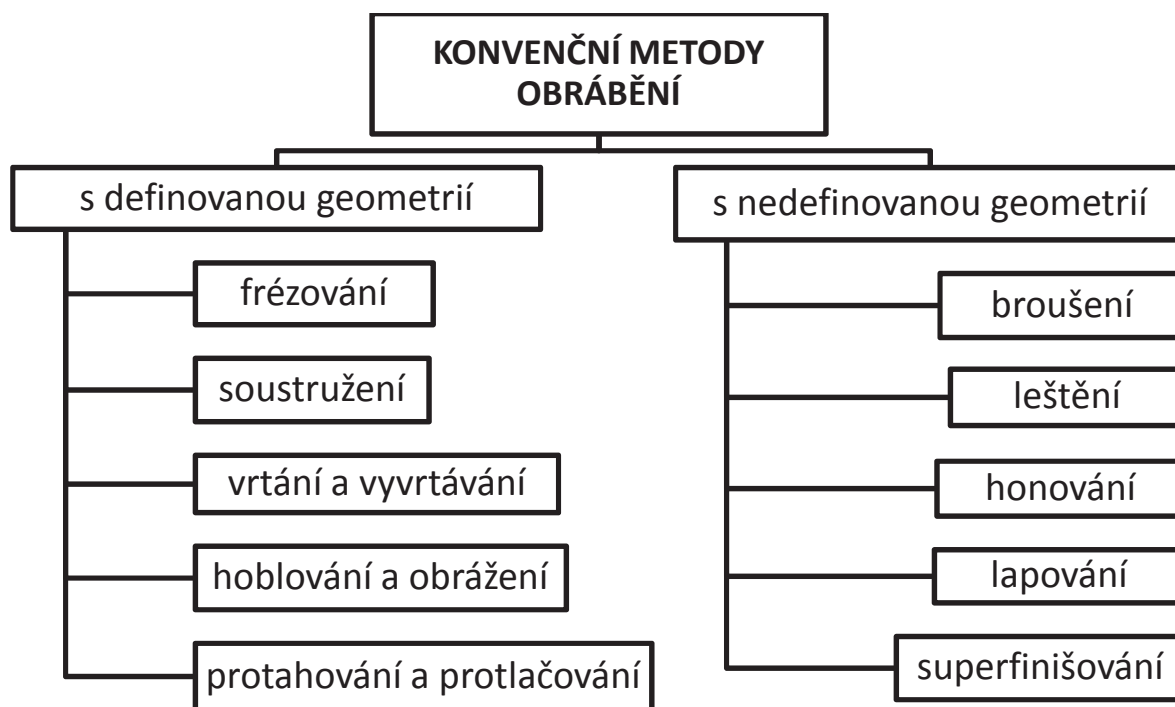
1.5.2 Uzavírací jednotka

Zajišťuje ovládání formy, její dokonalé uzavírání a otevírání i případné vyprázdnění. Velikost uzavíracího tlaku je stavitelná a je přímo závislá na velikosti vstřikovacího tlaku a ploše dutiny a vtoků v dělicí rovině. Mezi hlavní části uzavírací jednotky patří opěrná deska pevná, upínací desky, vodící sloupky a uzavírací mechanismus. Uzavírací systémy bývají hydraulické nebo hydraulicko-mechanické a jsou ukazatelem kvality uzavírací jednotky. [2], [10]

2 KONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Konvenční metody obrábění lze definovat jako sled technologických operací, při kterém se mění polotovar na konečný výrobek požadovaného tvaru a rozměrů. Materiál je odstraňován ve formě třísek. Mezi tyto metody patří řada technologií, které se provádějí at' už na klasických konvenčních strojích s lidskou obsluhou, mezi něž patří frézky, soustruhy, brusky a vrtačky nebo postupem času častější využívání doplňkové výroby pomocí CNC obráběcích center. Konvenční metody obrábění lze rozdělit na dvě skupiny, a sice na obrábění s definovanou geometrií nástroje a obrábění s nedefinovanou geometrií nástroje. [5]

2.1 Rozdělení konvenčních metod



Obr. 7. Rozdělení konvenčních metod. [5]

2.1.1 Metody s definovanou geometrií nástroje

Metody s definovanou geometrií nástroje patří stále mezi nejvyužívanější metody obrábění. Nástroje mají jednoznačně určené roviny hřbetu, čela a také základovou rovinu. Těmito nástroji se obrábí polotovary lité i tvářené a při úběru se odebírá cca 90% celkového přídatku na součást. [5]

Frézování

Technologií frézování je možno vyrobit i tvarově složitější součásti a neplatí zde omezení pouze na rotační součásti jako u soustružení. Hlavní řezný pohyb vykonává otáčející se nástroj, jež se nazývá fréza. Posuvový pohyb vykonává obrobek a je zpravidla kolmý na hlavní řezný pohyb. U číslicově řízených frézek se nástroj i obrobek mohou plynule měnit a vytvářet tím i velmi složité tvary. Z hlediska základního rozdělení, rozdělujeme frézování na čelní a válcové. Válcové frézování lze dále dělit na sousledné a nesousledné frézování, kdy rozhoduje, zda se fréza otáčí ve směru posuvu součásti nebo proti ní. [5]

Stroje k frézování se nazývají frézky a řadí se dle těchto druhů – konzolové, rovinné, stolové a číslicově řízené frézky. [5]

Soustružení

Technologií soustružení se vytváří válcové plochy jak vnější tak i vnitřní, jsou vytvářeny zpravidla jednobřítým nástrojem, jež se nazývá soustružnický nůž. Touto technologií lze vyrábět také kuželové, rotační plochy obecného tvaru, vyráběné kopírovacími nástroji, čelní rovinné plochy nebo závity jak vnější tak vnitřní. [5]

Hlavním pohybem u soustružení je rotační pohyb obrobku. Nástroj vykonává pohyb přímočarý a je to pohyb posuvový, řezný pohyb je realizován po šroubovici při obrábění válcové plochy. [5]

Stroj k vykonávání technologie obrábění se nazývá soustruh, existuje řada provedení a druhů těchto strojů, mezi něž patří – hrotový universální, svislý, revolverový a v poslední době také soustruhy poloautomatické a automatické číslicově řízené. [5]

Vrtání a vyvrtávání

Technologie vrtání je používána pro vytváření děr. Při vrtání vykonává hlavní řezný pohyb vrták rotací kolem své osy, posuvový pohyb vykonává také nástroj a to ve směru své osy. Technologie vyvrtávání se využívá při rozšiřování již předvrtaných děr. Hlavní pohyb vykonává opět nástroj a to vrtací hlava nebo vrtací tyč rotací kolem své osy a vedlejší pohyb vykonává nástroj nebo obrobek přímočaře v ose rotace nástroje. Vyvrtáváním lze dosáhnout vysoké přesnosti a dobré jakosti obráběného povrchu. [5]

Hoblování a obrážení

Nástroje pro tuto technologii jsou hoblovací a obrážecí nože, jsou jednobřité a využívají se k výrobě dlouhých rovinných ploch, nebo méně častěji je lze použít i k výrobě drá-

žek a rotačních ploch. U hoblování vykonává hlavní řezný přímočarý vratný pohyb obrobek. Vedlejší posuvový pohyb vykonává nástroj a je přerušovaný, vždy po dokonání přímočarého pohybu obrobku. U obrážení je situace opačná a hlavní řezný přímočarý pohyb vykonává nástroj, zatímco obrobek je stacionární. Vedlejší posuvový pohyb je přímočarý a je také vykonáván přerušovaně po dokončení vratného pohybu nástroje. [5]

Protahování a protlačování

Technologie protahování je realizovaná přímým vícebřitým nástrojem, neboli protahovacím trnem, který je tažen podél obrobku. Břity nebo zuby jsou výškově odstupňovány, aby každý zub vzal zhruba stejnou třísku. Protahování je používáno k výrobě rovinných, válcových, drážkovaných a vnitřních i vnějších tvarových ploch. Protlačování je založeno na stejném principu, liší se pouze tím, že protlačovací trn není tažen, ale je tlačěn. [5]

2.1.2 Metody s nedefinovanou geometrií nástroje

Metody s nedefinovanou geometrií nástroje nemají přesně určené úhly ani roviny nástroje – nejsou definovány. Tyto metody obrábění se nejčastěji používají jako dokončovací operace, kdy nástrojem bývají například brusné kotouče nebo volná brusiva. [9]

Broušení

Mezi nejznámější metody obrábění s nedefinovanou geometrií nástroje patří broušení. Materiál se odebírá brousícími zrný, která tvoří jako celek brousící kotouč a je odváděn ve formě jemných třísek. Vzhledem k vzniku plastických deformací a velkého tření je běžné, že se část třísky zahřeje a roztaví na kapičky. Brousící zrna mají nepravidelný geometrický tvar a nepravidelné poloměry zaoblení, vyznačují se vysokou tvrdostí a odolností vůči teplotě. Brousící kotouč vykonává hlavní řezný pohyb, který je rotační. Vedlejší posuvový pohyb mohou vykonávat jak obrobek, tak brousící kotouč, záleží na konstrukci brusky. Broušení je vedeno jako dokončovací operace, při které se dají obrábět plochy rovinné, válcové i kuželové. [9]

Leštění

Technologie leštění je používána jako dokončovací operace, kdy je kladen důraz na lesklost výsledného povrchu, na přesnost jsou kladeny menší nároky. Úběr materiálu je u leštění minimální, nástroje jsou brusiva, která jsou připevněna na textilní podklad jako plátna, pásy nebo kotouče nebo brusiva, jež jsou volně rozptýlena v pastě nebo kapalině a nanášejí se na textilní pásy nebo kotouče. [9]

Honování

Technologie honování je používána pro jemné dokončování nečastěji vnitřních válcových ploch. Nástrojem je honovací hlava, která má po obvodu brousící kameny a vykonává zároveň pohyb rotační a přímočarý vratný. Brousící kameny jsou přitlačovány k honované válcové ploše určitým tlakem. [9]

Lapování

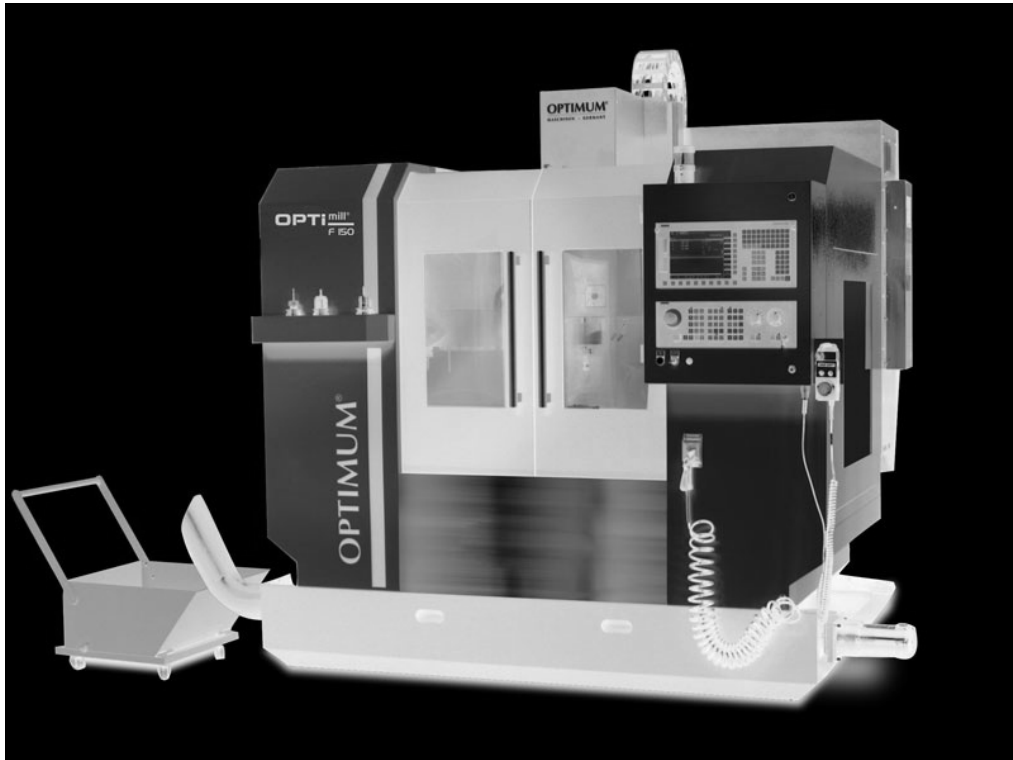
Lapováním je možno dosáhnout velmi vysoké kvality jak přesnosti rozměrů, tak geometrického tvaru a povrchu s velmi malou drsností. Lapování má široké spektrum použití a využívá se pro dokončování rovinných, válcových i tvarových vnějších a vnitřních ploch. K úběru materiálu dochází pomocí volného brusiva, které je přivedeno mezi pohybující se lapovací nástroj a obrobek. [9]

Superfinašování

U dokončovací operace superfinašování jsou odstraňovány vrcholky nerovností z obráběného povrchu. Nástroj pro tuto technologii se nazývá superfinašovací kámen, ve kterém jsou obsažena velmi jemná brousící zrna vyráběná z umělého korundu s keramickou nebo bakelitovou vazbou. Při superfinašování vysoce legovaných ocelí je používán jako materiál brusných zrn kubický nitrid bóru v keramické vazbě. Proces superfinašování je realizován kmitavým pohybem superfinašovacího kamene, malými řeznými rychlostmi a malým tlakem na obráběnou plochu. [5]

2.2 CNC frézování a programování

Číslicově řízené stroje (CNC) mají své činnosti řízeny automatickým zadáváním povelů v číselné podobě z počítačového programu. Veškeré obrábění na číslicově řízeném stroji má podobný sled činností jako obrábění na konvenčním stroji. Mezi obdobné činnosti lze zařadit ustavení součásti do vhodné polohy a upnutí, přichystání správného nástroje a upnutí do vřetena, spouštění hlavního řezného pohybu, který odděluje třísku, a podobně. Tyto činnosti se automaticky opakují s různými nástroji, jinými řeznými podmínkami nebo v jiných polohách obrobků. [14]



Obr. 8. CNC frézka. [21]

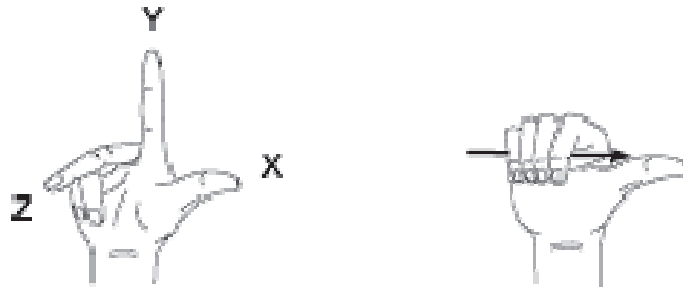
V současné době jsou číslicově řízené stroje natolik automatizované, že většina činností, které musí vykonávat u konvenčních strojů lidská obsluha, je řízena automaticky pomocí počítačových programů, jako například výměna nástroje, změna řezných podmínek nebo pohyby nástroje a obrobku. Mezi výhody používání CNC strojů patří [14]:

- Automatizace – minimalizování činností, které musí vykonat obsluha stroje, což vede k zefektivnění výroby, jako stálost cyklu nebo snížení počtu chyb
- Přesnost výrobků – závislost na kvalitě určeného programu, opakovatelná přesnost operací
- Pružnost – snadná přizpůsobivost novému výrobku, změna programu a nástrojů s upínači [14]

Řídicí systém obráběcích CNC strojů je jejich základním stavebním kamenem, zpracovává data o pohybu a rychlosti nástrojů a obrobku, spouštění a zastavování přídatných funkcí a jiné informace. [14]

Pohybové mechanismy CNC obráběcích strojů mohou konat i více pohybů v různých osách, pohyby mohou být přímé i kruhové. Pohon těchto pohybových mechanismů je zajišťován řízeným servopohonem, jež má za úkol pohyb po dané dráze, danou rychlostí a do určené polohy. [14]

Popis pohybů stroje se definuje v systému souřadnic dle konstrukce stroje. Nejčastěji využívaný je kartézský systém souřadnic. Při jeho rozeznávání se řídíme pravidlem pravé ruky, kdy kladný směr otáčení je ve směru hodinových ručiček. [14]



Obr. 9. Pravidlo pravé ruky. [22]

2.2.1 CAM systémy

V dnešní době je již samozřejmostí pronikání výpočetní techniky i do technologie obrábění. Snaha co nejvíce minimalizovat stereotypní činnosti, zrychlit výpočty, vytvářet databáze výrobků a technologií, využívání výpočetní techniky přímo vybízí. Je možno se s ní setkat v řadě oblastí jako konstrukce, pevnostních výpočtů, tvorbě výrobních postupů, plánování a řízení výroby a optimalizaci celého výrobního procesu nebo také řízení jakosti. [14]

CAM neboli počítačem podporovaná výroba má za úkol přípravu dat a programů pro řízení číslicově řízených strojů pro automatickou výrobu součástí. Systém CAM plyně navazuje na systém CAD, který je využíván v konstrukci. CAM zpracovává geometrické a jiné informace, které byly vytvořeny v CAD. Celý systém CAM představuje automatizované operativní řízení výroby na dílenské úrovni a zahrnuje i automatický sběr dat o skutečném stavu výrobního procesu a číslicově řízené výrobní systémy. [16]

Programy, které spadají pod systém CAM, umožňují simulovat sled technologických operací při vlastní výrobě součástí. Simulují práci jednotlivých nástrojů nejen u technologie frézování, ale samozřejmě i jiných, jako soustružení, vrtání, obrábění laserem, elektroerozivní obrábění nebo obrábění vodním paprskem. Když je programátor přesvědčen o správnosti všech svých nadefinovaných operací a sledu práce jednotlivých nástrojů, tedy bezpečného chodu výroby součástí, je za pomoci postprocesoru vygenerován program pro řízení CNC strojů. [14]

3 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění mají svůj základ v elektrických, chemických a fyzikálních jevech. U mechanických metod obrábění je materiál odebírán z obrobku ve formě třísek, u metod nekonvenčních je materiál ubírán většinou účinkem elektrického proudu, působením chemických, elektrochemických, tepelných nebo jiných procesů, kdy je možná i jejich kombinace. Nekonvenční metody úspěšně doplňují a v některých případech i plně nahrazují metody konvenční. Obrobitelnost materiálu u těchto nekonvenčních metod nezávisí na jeho mechanických vlastnostech, neboli pevnosti, tvrdosti a houževnatosti, jako u klasického třískového obrábění. [12], [14]

Mezi důvody, proč se stále častěji zařazují nekonvenční metody obrábění do výrobních procesů, jsou tyto [14]:

- Častější využívání těžkoobrobitelných materiálů – jako kalené oceli a žárupevné a žáruvzdorné materiály, litiny, keramické materiály, slinuté materiály a kompozity.
- Komplexní opracování nepravidelných tvarů – jak vnějších, tak vnitřních.
- Větší nároky na tvarovou složitost a přesnost – platí hlavně pro nástrojáře, formy a zápustky.
- Miniaturizace – neustále menší a přesnější součástky využívané především v lékařském odvětví.
- Automatizace provozů – využívání CAD/CAM systémů. [14]

Důležitou předností nekonvenčních technologií je oblast opotřebení nástroje. Nástroj je brán z pohledu geometrického tělesa a jeho opotřebení po elektrických, chemických a tepelných procesech je mnohem menší, než u klasických metod obrábění. Pokud nástroj není brán z pohledu geometrického tělesa, nastává situace, že se nástroj vůbec nedostává do kontaktu, což znamená, že úběr materiálu je realizován pouze energií jinou než mechanickou. [1], [5], [11]

3.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Tab. 3. Rozdělení nekonvenčních metod obrábění dle energetického zdroje. [1], [5], [11]

| | | |
|--|------------------------------|------------|
| MECHANICKÉ PROCESY | Obrábění ultrazvukem | <i>USM</i> |
| | Obrábění abrazivním paprskem | <i>AJM</i> |
| | Obrábění vodním paprskem | <i>WJM</i> |
| CHEMICKÉ PROCESY | Chemické obrábění | <i>CM</i> |
| | Fotochemické obrábění | <i>PCM</i> |
| ELEKTROCHEMICKÉ nebo ELEKTRICKÉ PROCESY | Elektrochemické obrábění | <i>ECM</i> |
| | Elektrochemické broušení | <i>ECG</i> |
| ELEKTROTEPELNÉ nebo TEPELNÉ PROCESY | Elektroerozivní obrábění | <i>EDM</i> |
| | Obrábění laserem | <i>LBM</i> |
| | Obrábění paprskem elektronů | <i>EBM</i> |
| | Obrábění paprskem iontů | <i>IBM</i> |
| | Obrábění paprskem plazmy | <i>PAM</i> |

3.1.1 Mechanické procesy

Obrábění ultrazvukem

Tento proces obrábění využívá ultrazvukových vln s frekvencí okolo 20 kHz a úběr materiálu je realizován nárazovým účinkem rozkmitaného brusiva. Princip opracování je založen na brusném účinku suspenze kapaliny, což může být voda, líh, petrolej nebo strojní olej, a jemného brusiva, které cirkuluje mezi obrobkem a nástrojem. Tento jev vytváří požadovaný tvar obrobku a zároveň odplavuje třísky. Využívá se při výrobě plyných nerovnoměrných profilů do tvrdých a křehkých materiálů. Mezi nevýhody této metody patří malý úběr materiálu a vysoké náklady. [1], [5], [11]

Obrábění abrazivním paprskem

U této metody je připraven v zásobníku brusný prášek, které se postupně mísí s plynem, což bývá nejčastěji vzduch a tato směs je dopravována směrem k dýze, kterou opouští

až při rychlosti $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Využívá se při čištění povrchů a oddělování velmi malých částic u obrobků z křehkých materiálů. Mezi nevýhody patří pomalý úběr materiálu a nízký výkon zařízení. [1], [5], [11]

Obrábění vodním paprskem

Jako řezný nástroj je zde využíván vysokotlaký paprsek vody, který vychází z dýzy pod tlakem okolo 400 MPa. Účinnost řezání se zvyšuje příměsí jemných brusných částic do proudu vody. Využívá se zejména k řezání těžkoobrobitelných materiálů, jako keramiky a kompozitních materiálů. Rozsah použití je do hloubky 25 mm. Mezi výhody patří vysoká rychlost řezání, schopnost řezat i tvarově složité plochy a šetrnost k životnímu prostředí, naopak nevýhodou je vysoká hlučnost. [1], [5], [11]

3.1.2 Chemické procesy

Chemické obrábění

Principem chemického obrábění je odleptávání založené na chemické reakci mezi obrobkem a reaktivním prostředím, které je složeno z kyselin nebo zásad. Na místa, která nemají být odleptána, se nanáší maska, což je chemicky odolná látka nebo speciální povlak jako guma nebo plast. Způsob nanášení masky je nátěrem nebo nástříkem a tloušťka vrstvy masky se pohybuje mezi 0,2 až 0,4 mm. Mezi nevýhody se řadí malý rozsah použitelnosti, pouze do hloubky 12 mm, a odbornost obsluhy. Výhodou jsou nízké náklady na zařízení. [1], [5], [11]

Fotochemické obrábění

Tato technologie využívá poznatků fotografické techniky, kdy se využívá chemického leptání tvarových otvorů do velmi tenkých materiálů nebo do fólií. Díky chemickému působení, které způsobuje ubírání materiálu, je využití této metody vhodné takřka pro všechny kovy tvrdé, křehké i nevodivé. [1], [5], [11]

3.1.3 Elektrochemické nebo elektrické procesy

Elektrochemické obrábění

Základem technologie elektrochemického obrábění je elektrolýza. Úběr materiálu je dosahován elektrochemickým rozpouštěním anodicky polarizovaného obrobku. Obrobek je anoda a nástroj katoda, jehož tvar je kopírován na obráběnou plochu. Jak anoda, tak katoda jsou ponořeny do tekutiny, které se nazývá elektrolyt, ten protéká v mezeře mezi elektro-

dami a je zapojen do obvodu jednosměrného napětí. Pokud by došlo k porovnání s chemickými metodami, jsou metody elektrochemického obrábění mnohem účinnější, mají větší úběr a dosahuje se jimi vyšší přesnosti rozměrů i tvarů. Pozitivem také je, že nedochází k velkému opotřebení nástroje. Používá se pro obrábění složitých tvarů, profilů a otvorů, kde se využije velký úběr materiálu, ovšem obráběné materiály musí být vodivé. Mezi nevýhody se řadí vysoké náklady na zařízení, vysoká energetická náročnost a požadavek vstupních technologických zkoušek pro určení vhodných parametrů procesu. [1], [5], [11]

Elektrochemické broušení

Elektrochemické broušení je odnoží elektrochemického obrábění, má tedy principiálně stejný základ v elektrolýze. Elektrolyt je zde přiváděn přímo do prostoru mezi obrobek a brusný kotouč. Většina materiálu je odstraňována elektrolyticky, ale malá část je odstraňována i mechanicky pomocí brusných zrn. Mezi velké výhody ve srovnání s konvenčním broušením patří 5x až 10x větší úběr materiálu, čímž klesnou náklady na broušení a navíc je u této metody dosahováno také lepší drsnosti, které se pohybuje mezi 0,012 až 0,25 μm . Ovšem v poslední době je elektrochemické broušení vytlačováno broušením z extrémně tvrdých materiálů, jako je diamant. [1], [5], [11]

3.1.4 Elektrotepelné nebo tepelné procesy

Elektroerozivní obrábění

Technologie elektroerozivního obrábění vodivých materiálů je založena na využití tepelné energie, na kterou se přemění elektrický výboj vznikající mezi katodou a anodou. Pro tuto metodu se tedy využívají vodivé a tvrdé materiály. Nevýhodou jsou vysoké náklady a malá životnost nástrojové elektrody, navíc nelze použít při změně tvaru obráběné plochy a musí se vyrobit nový nástroj. Po této technologii má povrchová vrstva obráběné plochy vyšší tvrdost a je redukována mez únavy. Více je tato technologie popsána v kapitole 3.2 *Elektroerozivní obrábění (EDM)*. [1], [5], [11]

Obrábění laserem

Technologie obrábění laserem představuje alternativu ke klasickým druhům obrábění, jako řezání, soustružení, vrtání, mikroobrábění a tvarové opracovávání ploch. Má velmi širokou škálu uplatnění pro všechny druhy materiálů, nedoporučuje se pouze pro velmi tenké obrobky a pro hodně malé úběry materiálu. Princip fungování laseru je možné defi-

novat dle pojmů z kvantové fyziky. Název laser je zkratka začínajících písmen z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Klasické světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry, zatímco zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů a toto laserové světlo je monochromatické, koherentní a má malou divergenci. Mezi nevýhody této technologie se řadí tepelně ovlivněné okolí místa, které je obráběno, řez je nerovnoměrný a velká citlivost na nastavení ohniskové vzdálenosti od místa řezu. [1], [5], [11]

Obrábění paprskem elektronů

Proces obrábění elektronovým paprskem probíhá ve vakuu, kde je využita kinetická energie urychlených elektronů, která se po srážce s obrobkem přemění na energii tepelnou, která roztaví a odpaří materiál v místě dopadu. Katoda, jež je zdrojem elektronů, je obvykle rozžhavený wolframový drát. Paprsky elektronů jsou malého průměru a mají vysokou hustotu energie a volné elektrony se svou rychlostí blíží rychlosti světla. Použití této metody je pro vrtání otvorů a tvarování mikro rozměrů. Mezi nevýhody se řadí vysoké náklady na zařízení, nízká produktivita, tepelná ovlivnitelnost okolí místa dopadu paprsku a rozměry omezená použitelnost. [1], [5], [11]

Obrábění paprskem iontů

Metoda obrábění paprskem iontů také vyžaduje vakuum a je vhodné pro vytváření mikro otvorů a velmi jemné opracování povrchů. Pomocí urychleného napětí nabité atomy ze zdroje iontů doslova bombardují povrch obrobku. Princip rozprašování je přenos hybnosti z iontu plynu na částici materiálu. Kinetická energie těchto iontů při rozprašování překračuje energii vazby atomů a molekul v obrobku, což vyvolá jejich vypuzení z povrchu. Dopadající argonové ionty se dostanou do hloubky několika nanometrů. Nevýhodou je stejně jako u předešlé metody vysoká nákladovost a omezené použití kvůli rozměrům vakuové komory, naopak zde nehrozí teplotní ovlivnitelnost místa dopadu paprsku. [1], [5], [11]

Obrábění paprskem plazmy

Tato metoda obrábění je vhodná pro všechny typy kovových materiálů, kde je potřeba vysoká rychlost úběru. Plazma je elektricky vodivý stav plynu, který se na zemi může vyskytovat jen výjimečně, jedná se o plyny jako argon, helium, oxid uhličitý, i jejich případné kombinace. Může vzniknout ionizací plynů při vysokých teplotách až nad 20000 °C nebo elektrickým výbojem mezi elektrodami. Nástroj je katoda a obrobek anoda a spolu v kombinaci tvoří oblouk. Plazmový plyn je ionizovaný a ohřátý na vysokou teplotu. Po styku

plazmy s povrchem obrobku může nastat řada jevů, jako tavení, odtékání, rozprašování, odstříkávání nebo sublimace. Tyto jevy se podle svého charakteru využívají při dalších odvozených technologiích jako svařování, řezání, tavení nebo povlakování. Nevýhody jsou vysoké náklady jak provozní, tak na samotné zařízení a tepelná ovlivnitelnost okolí místa obrábění. [1], [5], [11]

3.2 Elektroerozivní obrábění (EDM)

Elektroerozivní obrábění, jehož zkratka EDM vychází z anglického Electrical Discharge Machining se v této době pokládá za velmi dobře zavedenou operaci nekonvenčního obrábění. Elektroerozivní obrábění je velmi žádáno řadou projektantů a výrobních inženýrů. Nástrojárny nahrazují klasické metody obrábění právě EDM a využívají jej jako doplněk ke stávajícím brusům, frézám a soustruhům, jelikož vyniká při obrábění tvrdých a těžce obrobitelných materiálů, navíc tento nekontaktní obráběcí proces umožňuje vytváření křehkých a tenkostěnných dílů. [11], [19]

3.2.1 Historie elektroerozivního obrábění

Prvopočátky užívání elektroeroze ve strojírenských podnicích se datují mezi období dvou světových válek. Tato metoda byla využívána jako levnější alternativa ke klasickým metodám úběru tvrdého materiálu obráběcích nástrojů, jako například zalomených vrtáků a závitníků z drahých obráběných dílů. Tyto první elektrojiskrové nástroje měly malou účinnost a obtížně se s nimi pracovalo. V tomto čase bylo ovšem objeveno a později i zavedeno vibrování elektrody, což přineslo zlepšení efektivity úběru materiálu. [19]

Ještě více se povedlo tuto metodu obrábění zdokonalit dvěma sovětským vědcům Lazarenkovým dvěma vylepšeními. První bylo umožnění důsledné a spolehlivé kontroly doby pulzu a zjištění, že určitá vzdálenost mezi elektrodou a obrobkem přináší rychlejší řez než jiná. Druhým vylepšením bylo přidání jednoduchého řídicího obvodu, který automaticky hledal a udržoval jiskrovou mezeru. Díky těmto dvěma inovacím se elektroerozivní obrábění zařadilo mezi plnohodnotný nástroj ve strojírenství, jež je schopen dosahovat přesných a spolehlivých výsledků. [19]

V 50. letech minulého století roste vývoj napájecího zařízení. Byly rychle vyvíjeny polovodičové obvody, které řídí nejen dobu trvání jiskry, ale také délku mezery, velikost proudu a způsob předávání pulzu do elektrody. [19]

V závislosti na druhu elektrického výboje, jiskry nebo oblouku, od parametrů obrábění a zdrojů impulzního toku existuje několik druhů elektroerozivního obrábění. V 70. letech bylo zavedeno dělení elektroerozivního obrábění na [11]:

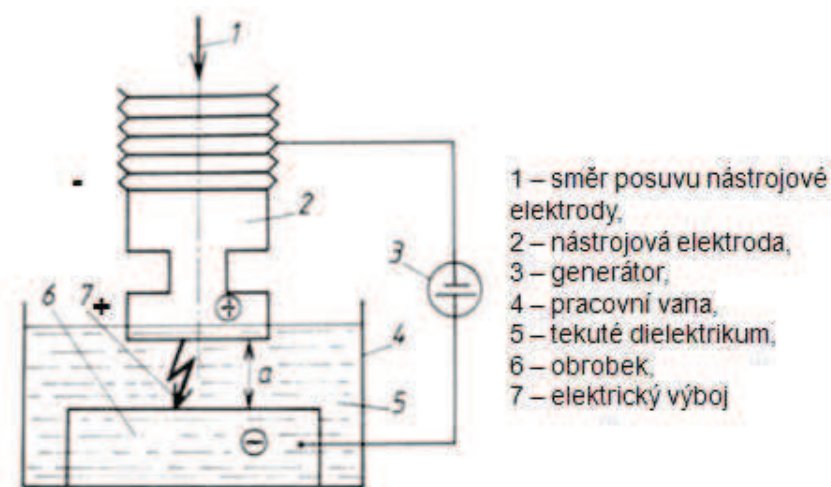
- Elektrojiskrové
- Elektroimpulzní
- Elektrokontaktní
- Anodomechanické

V současnosti se EDM nerozlišuje dle výše uvedeného dělení, ale je kvalifikováno dle technologických možností [11]:

- Hloubení tvarové (EDM – Electrical Discharge Machining)
- Drátové řezání (WEDM – Wire Electrical Discharge Machining)
- Broušení (EDG – Electrical Discharge Grinding)

3.2.2 Princip EDM

Elektroerozivní obrábění, lze jej také nazývat elektrojiskrové, je technologický proces, u kterého dochází k úběru materiálu elektricky, za přispění rychle se opakujících periodických impulzů jiskrového výboje za přítomnosti dielektrika. Materiál je ubírán ve formě malých kuliček tavením a odpařováním. Nečistoty z mezery, mezi nástrojem a obrobkem, odvádí dielektrikum. Obráběný materiál musí být elektricky vodivý a tvoří jednu elektrodu, nejčastěji anodu, druhá elektroda – katoda je nástrojová tvarová a je také z vodivého materiálu, jsou umístěny blízko sebe, ale nejsou v kontaktu a obě jsou ponořeny v kapalném dielektriku. [1], [5], [11]



Obr. 10. Schéma elektroerozivního obrábění. [14]

Vznik elektrického výboje mezi dvěma elektrodami ponořenými v dielektriku je zapříčiněn jednosměrným napětím, které je přivedeno od obvodu s odporem a kapacitou kondenzátoru. Výboj je vytvářen v krátkých impulzech, právě když jsou elektrody v určité vzdálenosti od sebe. Vzdálenost potřebná k vytvoření výboje se nachází v rozmezí 0,01 – 0,04 mm a v ideálním případě každý impuls vyvolá jiskrový výboj. Výsledkem výboje je krátkodobá koncentrace elektrické a mechanické energie elektronů na anodě, vznik vysoké teploty v bezprostřední blízkosti výboje, což vede k natavení a odpaření materiálu z anody, ale také z katody. Tento natavený kov je vymršťen do dielektrika. V místě výboje vznikne kráter, který je charakterizován průměrem a hloubkou. [1], [5], [11]

Mezi charakteristické parametry EDM patří [11]:

- Obráběcí stroj – tuhost, stabilita, kapacita přítoku dielektrika, řídicí systém a stupeň automatizace
- Dielektrická kapalina – chemické a fyzikální vlastnosti, intenzita a způsob proudění, pracovní vzdálenost mezi elektrodami
- Vznik výboje – výsledný tvar výboje, energie impulsu a frekvence, trvání výboje
- Nástrojová elektroda – chemické a fyzikální vlastnosti, tvar a rozměry,
- Materiál obrobku – chemické a fyzikální vlastnosti, výsledný tvar a rozměry [11]

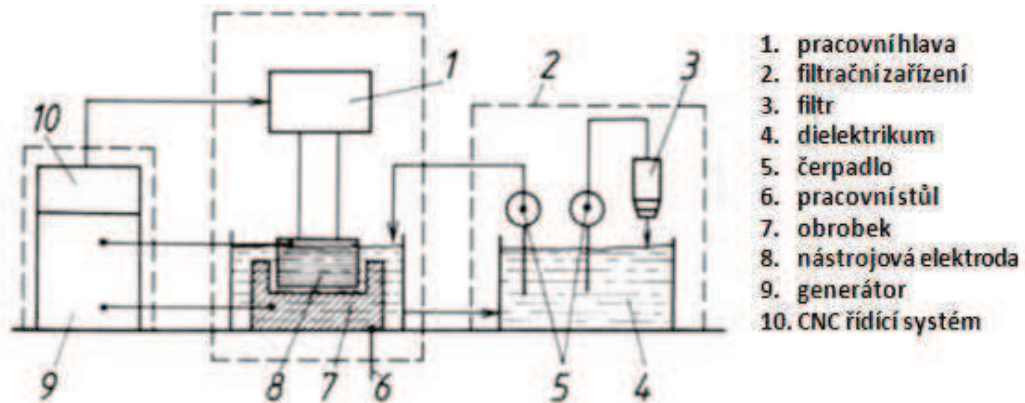
Technické a ekonomické ukazatele EDM procesu [11]:

- Čas obrábění
- Intenzita úběru materiálu
- Opotřebení nástrojové elektrody
- Vlastnosti povrchové vrstvy po procesu [11]

3.2.3 Obráběcí stroje pro EDM

Stroje pro EDM jsou složeny z rámu, pracovního stolu pro upínání obrobků, suportu s nástrojem, nádrže s dielektrickou kapalinou, příslušným chladicím a čerpacím systémem a z generátoru na tvoření elektrických impulsů. Rám stroje musí mít dostatečnou geometrickou přesnost, tuhost a stabilitu, přestože v procesu nepůsobí mechanické síly a zatížení. V rámu stroje jsou uloženy pracovní suport s nástrojem, pracovní stůl na upínání obrobku a manipulaci s ním a nádrž na dielektrikum. Zásobník dielektrické kapaliny, spolu s čerpadlem, potrubím, čistícími filtry a chladicím zařízením, bývá nejčastěji umístěn v základech stroje. Mezi nejdůležitější části stroje patří generátor elektrických impulsů, který stanovuje

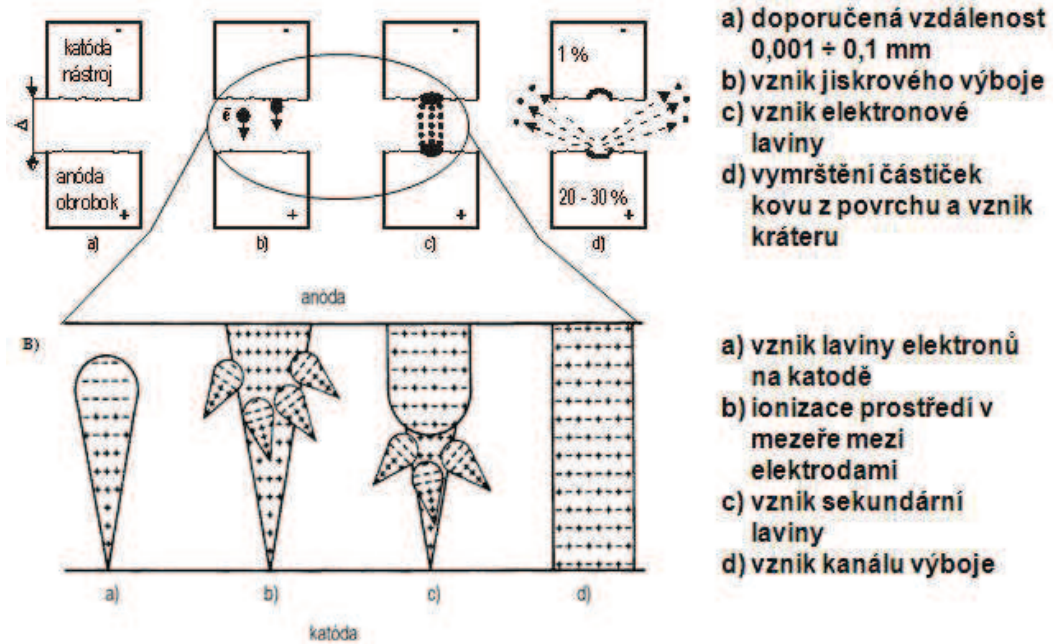
hlavní technologické a kvalitativní parametry elektroerozivního obrábění. Vibrační hlavice, která se pohybuje nahoru a dolů s mimořádnou přesností a je řízena servomechanismem, patří mezi základní části stroje. [11]



Obr. 11. Schéma stroje pro elektroerozivní obrábění. [14]

3.2.4 Mechanismus úběru materiálu

Cílem procesu je dosáhnout opakovanými výboji maximálního úběru na obrobku a minimálního opotřebení na nástrojové elektrodě. Základním vysvětlením úběru materiálu je popsání vzniku výboje mezi elektrodami a jeho tepelné a elektrické účinky na povrch materiálu. Ve vzdálenosti Δ , která nabývá obvykle hodnot 0,001 až 0,1 mm, dochází vlivem pulzujícího elektrického pole k výboji. Na nástrojové elektrodě vzniká lavina elektronů, které jsou urychlované směrem k obrobku. Záporně nabitě elektrony naráží na neutrální atomy dielektrika a vyvolávají ionizaci. Při opakovaném procesu se zvyšuje intenzita výboje a vzniká sekundární lavina elektronů. V konečné fázi spojí katodu a anodu kanálem výboje, v němž odevzdávají elektrony a kladně nabitě ionty svoji kinetickou energii ve formě tepla částicím anody a katody. Teplota v kanále se pohybuje v rozmezí 8000 až 12000 °C. Důsledkem této teploty a následného odpařování dielektrika narůstá tlak v plazmovém kanále až na 2000 MPa, což omezuje odpařování kovu. Po přerušení impulzu poklesne náhle i tlak a dochází k vymršťování rozžhavených částic kovu z povrchu a na povrchu vznikne kráter. [1], [5], [11]



Obr. 12. Mechanismus vzniku výboje. [11]

3.2.5 Materiály nástrojových elektrod

Nástrojové elektrody jsou velice důležitou součástí procesu EDM. Z hlediska technického určují přesnost rozměrů, jakost obrobene plochy nebo výkon obrábění, nezanedbatelné je také hledisko ekonomické. Řešení nástrojové elektrody je pro každý případ obrábění samostatné. Je tedy důležité velmi pečlivě volit materiál, způsob výroby, způsob upnutí, uložení, identifikaci a další faktory. Materiály pro nástrojové elektrody musí splňovat řadu podmínek, mezi něž patří dobrá elektrická a tepelná vodivost, vysoký bod tání a varu, odolnost proti elektrické erozi, vyhovující mechanickou pevnost, dobrou obrobiteľnost, stálost tvarů a malou tepelnou roztažnost. Materiály splňující tyto podmínky lze rozdělit na tři skupiny [14]:

- Kovové – elektrolytická měď, slitina wolframu a mědi, slitina wolframu a stříbra, ocel, slitina chromu a mědi, mosaz
- Nekovové – grafit
- Kombinované – kompozice grafitu a mědi [14]

Volba materiálu nástrojové elektrody závisí na materiálu obrobku, použitého stroje a relativního objemového opotřebení nástrojové elektrody. Úbytek materiálu elektrody závisí na elektrických parametrech výboje, polaritě generátoru a fyzikálních vlastnostech materiálu elektrody. [14]

3.2.6 Dielektrická kapalina

Elektrojiskrový výboj mezi elektrodami probíhá v kapalném pracovním prostředí, které se nazývá dielektrikum. Dielektrikum plní tyto funkce [11], [14]:

- Je to izolátor mezi elektrodami
- Odvádí teplo z pracovního prostředí
- Ohraničuje místo výboje
- Odstraňuje odebraný materiál z místa výboje
- Zabraňuje usazení odebraného materiálu na nástrojové elektrodě [14]

Mezi vlastnosti dielektrika patří [14]:

- Dostatečný elektrický odpor
- Vhodná viskozita a dobrá smáčivost
- Přijatelný bod vzplanutí, který by neměl být nižší než 60 °C
- Hygienická a ekologická nezávadnost
- Nízké pořizovací náklady [14]

Jako dielektrikum jsou využívány strojní olej, transformátorový olej, petrolej, destilovaná voda nebo deionizovaná voda. Dielektrikum je z pracovního prostředí odvedeno do zařízení pro přívod, chlazení a čištění dielektrika. [14]

Termín pro přívod dielektrika mezi elektrody je nazýván vyplachování a rozděluje se na více druhů, mezi které patří vyplachování vnější, vnitřní tlakové, vyplachování odsáváním, pulzní nebo kombinované. [11], [14]

3.2.7 Procesní charakteristiky a využití EDM

Výsledek obrábění je ovlivněn regulací operačních parametrů každé technologie. Rozsah charakteristik, udávaný firmami zabývajícími se elektroerozivním obráběním, se proto může lišit a často je jen orientační. [11]

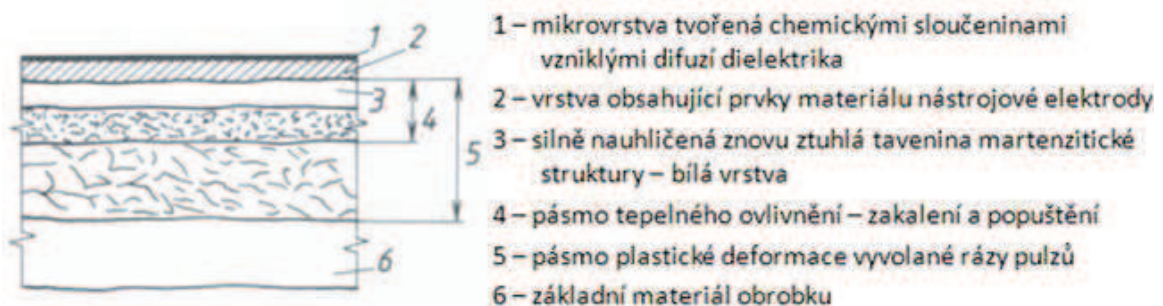
- Napětí proudového zdroje se pohybuje v rozsahu 60 až 250V.
- Vzdálenost mezi elektrodami 0,01 až 0,8 mm závisí na generátoru.
- Průměrná hodnota proudu výboje kolem 300 A a proudová hustota do 10^8 A.cm⁻².
- Čas nabíjení 10^{-2} až 10^{-5} s.
- Kuželovitost stěn otvorů 0,005 až 0,51 mm.
- Drsnost povrchu Rz – hrubování 12,5 μm, dokončování 0,2 až 6,3 μm a vysocepřesné obrábění 0,05 až 0,1 μm. [11]

Elektroerozivního obrábění nachází v praxi velmi široké uplatnění a to [11]:

- Zhotovení otvorů různých tvarů do kalených materiálů i slinutých karbidů.
- Otvory do vstřikovacích dýz, plynových hořáků, jemné lékařské přístroje.
- Odstraňování zalomených nástrojů.
- Tvorba znaků a písmen.
- Obrábění materiálů vysoké pevnosti.
- Mikroděrování.
- Elektrojiskrové hloubení zápusťek, lisovacích forem a dutin forem pro vstřikování plastů
- Výroba úzkých drážek nebo žeber
- Ostření a lapování nástrojů [11]

3.2.8 Kvalita výsledného povrchu

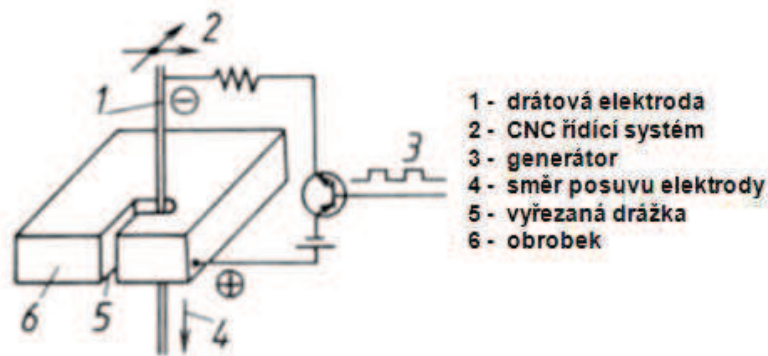
Po elektroerozivním obrábění má povrch náhodný izotropní profil, který je tvořen charakteristickými krátery, které mají nejčastěji hloubku 2,5 μm . Rozměry kráterů jsou ovlivněny dielektrikem a materiálem nástrojové elektrody. Povrch má matný vzhled. Důsledkem tepelného působení vzniká na povrchu tahové napětí, jež ovlivňuje funkční vlastnosti obrobku. Pokud je potřeba dosáhnout lepšího povrchu, například Ra 0,2 μm , využívá se elektroerozivního leštění. [11]



Obr. 13. Složení povrchu opracované vrstvy. [14]

3.2.9 Elektroerozivní drátové řezání

U této technologie platí všechny zákonitosti elektrické eroze. Je možno vyrábět tvarově přímkové plochy. Nástrojová elektroda je drát z mědi, mosazi, molybdenu, wolframu a jeho tloušťka je 0,03 až 0,3 mm, výjimečně až 0,7 mm. Jeho vlastnosti jsou dostatečná pevnost, úzká tolerance rozměru průměru a vysoká tvarová přesnost. [1], [5], [11]



Obr. 14. Schéma řezání drátovou elektrodou. [14]

3.2.10 Elektroerozivní broušení

U technologie broušení je využíváno pomalu rotující vodivé kolo, které je udržováno ve vzdálenosti obrobku tak, aby byl zapojen elektrický oblouk. Nástroj i obrobek musí být elektricky vodivý. Materiál je možno odebrat i z křehkých, tenkostěnných a těžkoobrobitelných materiálů pomocí eroze vyvolané jiskrou. Dielektrická kapalina odvádí pryč odebraný materiál a ochlazuje nástroj i obrobek. [1], [5], [11]

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Dle zadání této diplomové práce a vypracování části teoretické vyplývají pro praktickou část tyto úkoly:

- 1) Vypracovat postup při výrobě formy (návrh nástrojových elektrod, příprava jejich výroby v CAM programu a samotná výroba nástrojové elektrody).
- 2) Provést experimentální elektroerozivní obrábění daných entit a popsat postup procesu obrábění.
- 3) Porovnat elektroerozivní obrábění a frézování na číslicově řízených strojích (ekonomický rozbor).

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Praktická část diplomové práce se převážně věnuje nekonvenčnímu obrábění a jeho využití při výrobě forem pro vstřikování plastů, konkrétně elektroerozivnímu obrábění. Práce se této problematice věnuje již od počátku procesu. Věnuje se jak konstrukční přípravě, neboli převzetí 3D modelů, tak technologické přípravě, které je věnováno více prostoru.

Do technologické přípravy patří celkový návrh výroby daných dílů, jako je například tvorba nástrojových elektrod pro EDM. Byly zvoleny dva díly ze vstřikovací formy, které bývají na výrobu nejsložitější. Jedná se o tvárník a tvárnici, které jsou si na první pohled velmi podobné, ovšem je u nich nepatrný rozdíl, který je pro výrobu velmi důležitý. Tento rozdíl je ve vyztužovacích žebrech.

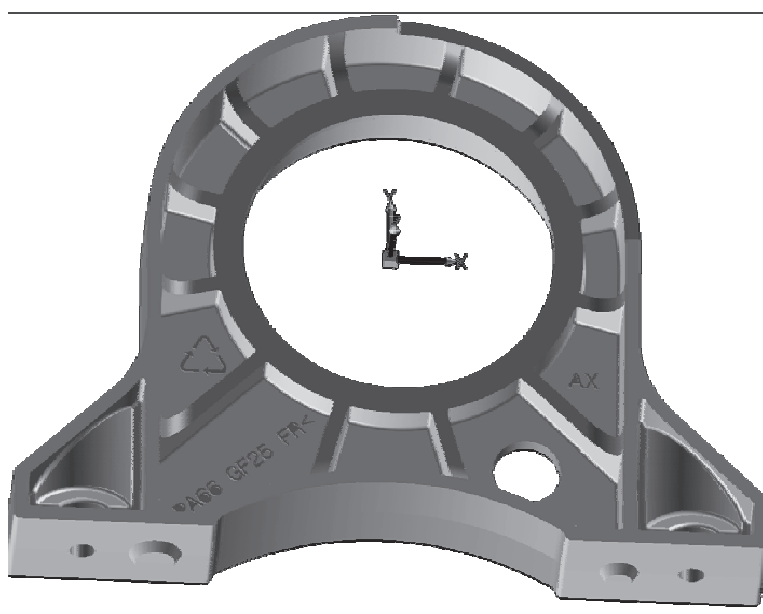
Na závěr bude provedeno zhodnocení výroby žeber mezi EDM a frézováním. Varianta frézování bude v CAM softwaru naprogramována a poté přesně demonstrována na tvárníku na 3-osém frézovacím centru, včetně časů i nástrojů a celkového ekonomického zhodnocení.

6 KONSTRUKČNÍ PŘÍPRAVA

Na začátku celého procesu výroby je nejdříve konstrukční a poté v blízké návaznosti technologická příprava. Z modelu vstřikovaného výrobku a informací dle materiálu je v konstrukci nakreslena forma, která již má v sobě zakomponovány všechny náležitosti. Konstruktor nesmí opomenout smrštění vstřikovaného výrobku, eliminaci problému při vstřikovacím procesu jako jsou studené spoje, spálená místa atd.

6.1 Model vstřikovaného dílu

Vstřikovaný výrobek, pro který bude forma zhotovena, se nazývá Lagerbock a bude sloužit jako podstavec pro ložiska. Výrobek je z materiálu PA66 GF25 FR. Jedná se o semikrystalický polymer. Jedná se o Polyamid, který má 66 uhlíkových atomů ve výchozím monomeru, má 25% podíl skleněných vláken a má retardér hoření. Skleněná vlákna zvyšují u materiálu mechanické vlastnosti. Součást bude využívána v elektrotechnickém průmyslu, proto musí být zabráněno vznícení retardérem hoření. Největší rozměry vstřikovaného dílu jsou přibližně 130 mm x 100 mm x 25 mm.

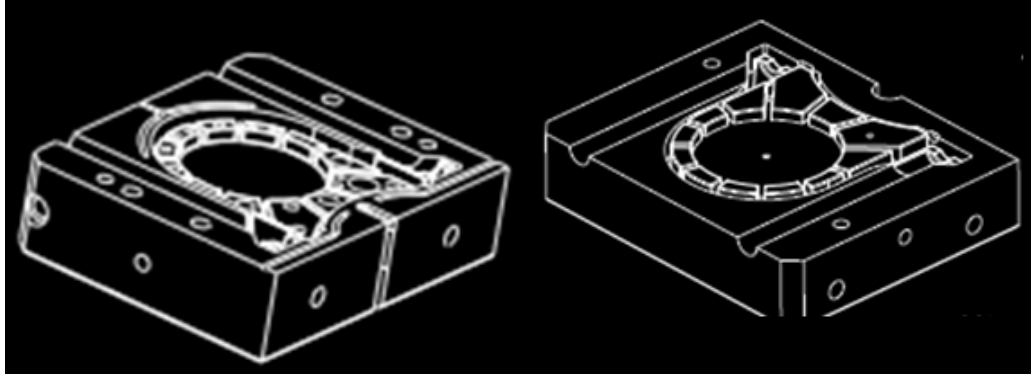


Obr. 15. Model vstřikovaného výrobku.

6.2 Modely tvárníku a tvárnice

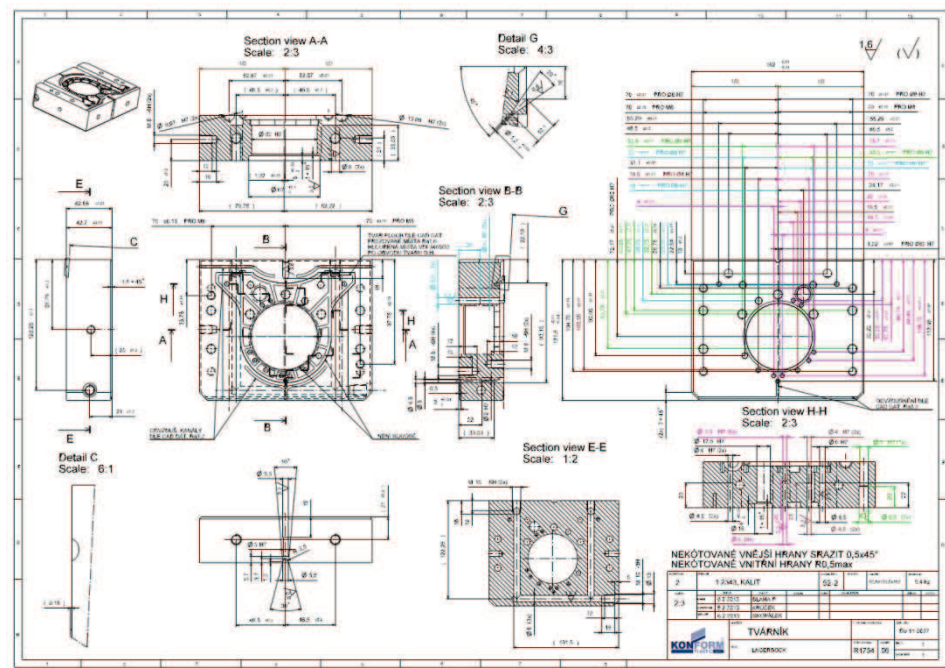
K výrobě a využití jednotlivých metod obrábění byly zvoleny tvárník a tvárnice. Tyto díly bývají zpravidla ve vstřikovací formě tvarově, a tudíž i na výrobu, nejsložitější. Tvárník i tvárnice musí mít dutinu formy, která tvoří budoucí výstřik, zvětšenu o hodnotu smrš-

tění daného materiálu. Jedná se o materiál s přidanými skleněnými vlákny, což znamená, že materiál má jiné smrštění ve směru toku, než ve směru kolmém na tok. Je potřeba s touto skutečností počítat a zakomponovat ji již při návrhu dílů.



Obr. 16. Modely tvárníku a tvárnice.

Pro lepší orientaci o rozměrech je vložen v Obr. 17. výkres tvárníků zaslán konstruktérem firmy Konform - Plastic, na kterém proběhne detailněji i srovnání výroby žeber konvenčním i nekonvenčním obráběním. Tvárnice se bude vyrábět obdobně. Tvárník i tvárnice se budou vyrábět z materiálu 1.2343, odpovídající materiálu dle ČSN 19 552. Jedná se o nástrojovou ocel vhodnou pro práce za tepla. Je velmi často využívána pro výrobu forem, z důvodu její odolnosti vůči vyšším teplotám a odolnosti proti namáhání. Tato ocel je složena s příměsí legur, jakými jsou chrom, molybden, křemík a vanad, je vhodná ke kalení a má dobrou prokalitelnost.



Obr. 17. Výkres tvárníku (převzat z Konform Plastic).

7 TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA

Technologická příprava následuje při převzetí výkresové dokumentace a 3D modelů dílů formy. Z ekonomického hlediska je velice důležité správně rozhodnout, jak se bude daný díl formy vyrábět, aby byly splněny všechny požadavky, jako přesnost nebo jakost povrchu.

V této práci je velmi často využíván program SurfCAM, který patří mezi nejrozšířenější CAM systémy v České republice. Představuje pokročilý systém pro řízení CNC technologií. Mezi stroje, pro které je tento software využíván, patří dvou až pětiosé frézky, soustružnická centra, drátořezy, vyvrtávačky atd. Mezi hlavní výhody softwaru patří zpracované hrubovací i dokončovací operace včetně zbytkového obrábění, verifikace dráhy nástroje pro ověření skutečného obrábění, import řady různých formátů nebo nezávislost na jiném systému.

7.1 Stanovení hrubého technologického postupu

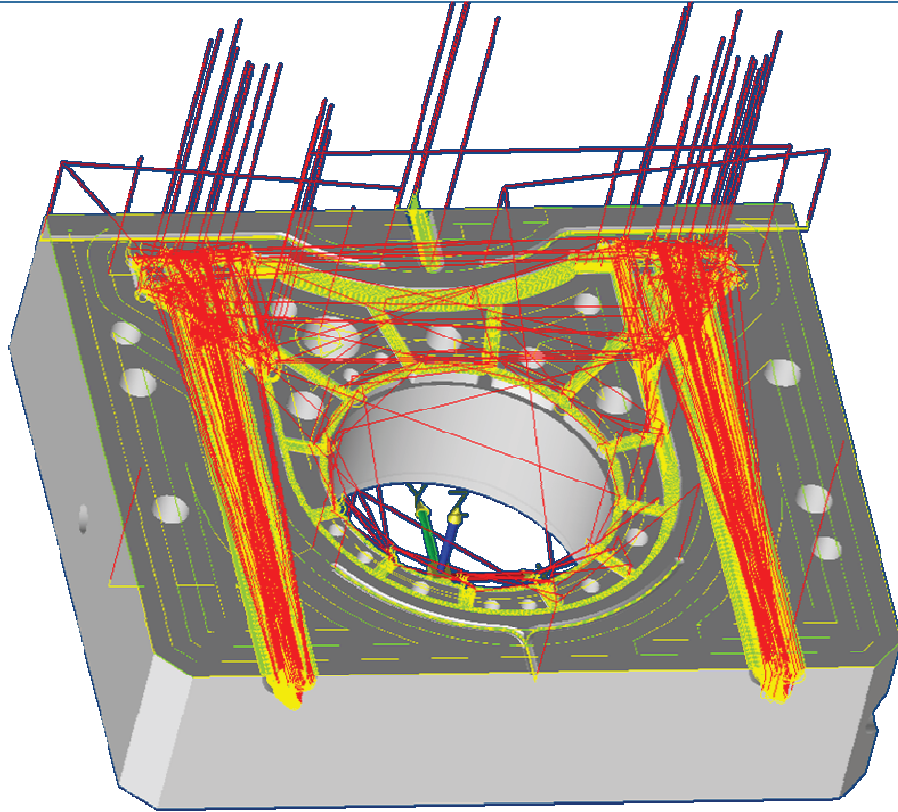
Na začátku je potřeba díl správně zhodnotit a rozhodnout, jak součást co nejefektivněji vyrobit, aby splňovala všechna kritéria, a výroba byla co nejméně nákladná a proběhla v co možná nejrychlejším čase. Hrubý technologický postup výroby tvárníku i tvárnice je obsažen v následujících bodech:

- a) Frézování největších přídavek a zúhlování na kvádr.
- b) Vyvrtání děr, zhotovení závitů.
- c) CNC frézování - hrubování tvaru s ponecháním přídavek.
- d) Tepelné zpracování – kalení.
- e) Broušení.
- f) CNC frézování – dokončování všech tvarů a děr dle rozměrů.
- g) Elektroerozivní obrábění – dokončení tvarů frézováním nevyrobitelných.

7.2 Programování pro CNC frézování

Tvarové CNC frézování má dráhy přesně určeny dle vygenerovaného programu z CAM systému SurfCAM. Generování je vytvořeno přes postprocesor. Ve verzi softwaru SurfCAM 3.0, se připravovaly programy pro CNC frézování tvárníku a tvárnice, ale také CNC frézování elektrod, které sloužily jako nástroje pro elektroerozivní obrábění.

Nejdříve byl zhotoven program pro hrubování. Po hrubování má již tvárník i tvárnice jasné tvarové kontury. Obrábění proběhlo s přídavkem 1 mm, kvůli tepelnému zpracování a opracování všech ploch po něm. Jedná se o rovinné plochy, které jsou broušeny, tak i tvarové, na které bude zhotoven program a proběhne dokončovací CNC frézování.

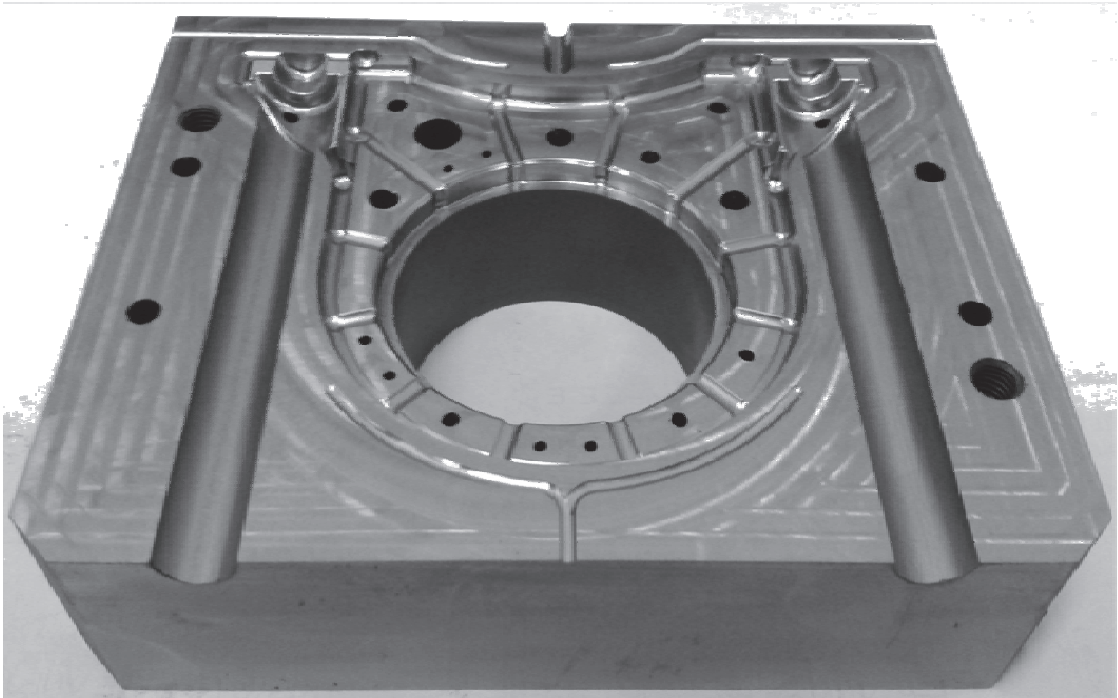


Obr. 18 Dráhy nástrojů při frézování tvárníku.

Na obrázku lze vidět tvárník a jednotlivé dráhy nástrojů, které SurfCAM přes postprocessor přetvoří na program, který je přenesen přes síť do CNC frézovacího centra.

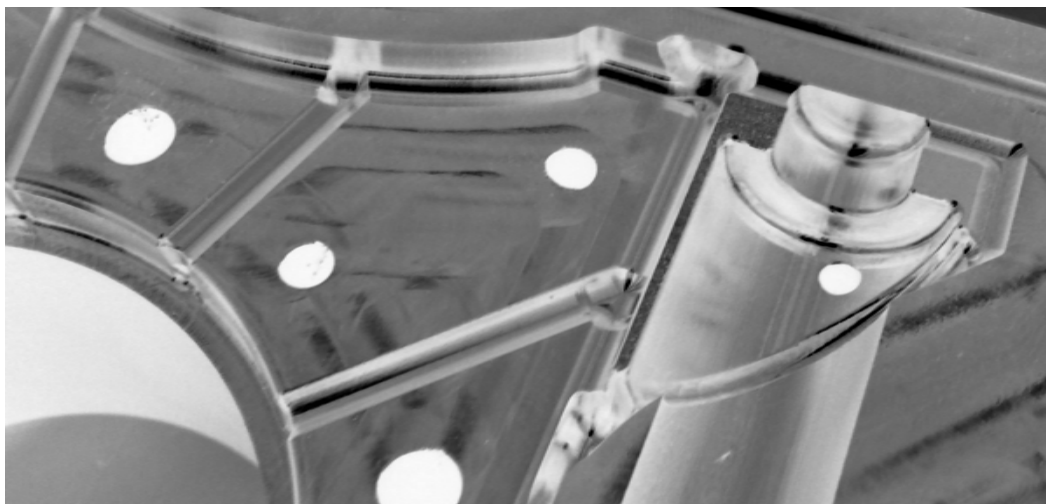
Po hrubování byly oba kusy převezeny do kalírny, kde byly zakaleny na předepsanou tvrdost 52 HRC. Po kalírně následovalo broušení všech rovinných ploch a dokončovací CNC frézování, po němž jsou hotovy dané rozměry s tolerancemi. Neobrobena zůstaly pouze žebra a vtoky. Vtok slouží k přivedení taveniny do dutiny vstříkovací formy při samotném procesu vstříkávání. Vtoky, které se na tomto tvárníku nachází, nelze na 3-osém frézovacím centru, které bylo při diplomové práci využíváno, zhotovit a u žeber bylo rozhodnuto pro elektroerozivní obrábění. Po EDM bude mít povrch žeber na výsledném vstříkovaném výrobku jemný dezén. Možností byla i varianta vyrábět žebra frézováním. Tato možnost bude nasimulována ke konečnému porovnání v programu SurfCAM. Na obrázku

lze vidět tvárník po dokončovacím CNC frézování. V této podobě je připraven k elektroerozivnímu obrábění.



Obr. 19. Tvárník po dokončovacím frézování.

Na detailním obrázku *Obr. 20.* si lze lépe prohlédnout kontury žeber, které se budou vyrábět elektroerozivním obráběním. Tyto kontury vytvořil nástroj, který měl záměrně větší průměr, než je šířka žeber, a jeho úkolem bylo vytvořit na horní straně žeber zaoblení.



Obr. 20. Detail tvárníku po dokončovacím frézování.

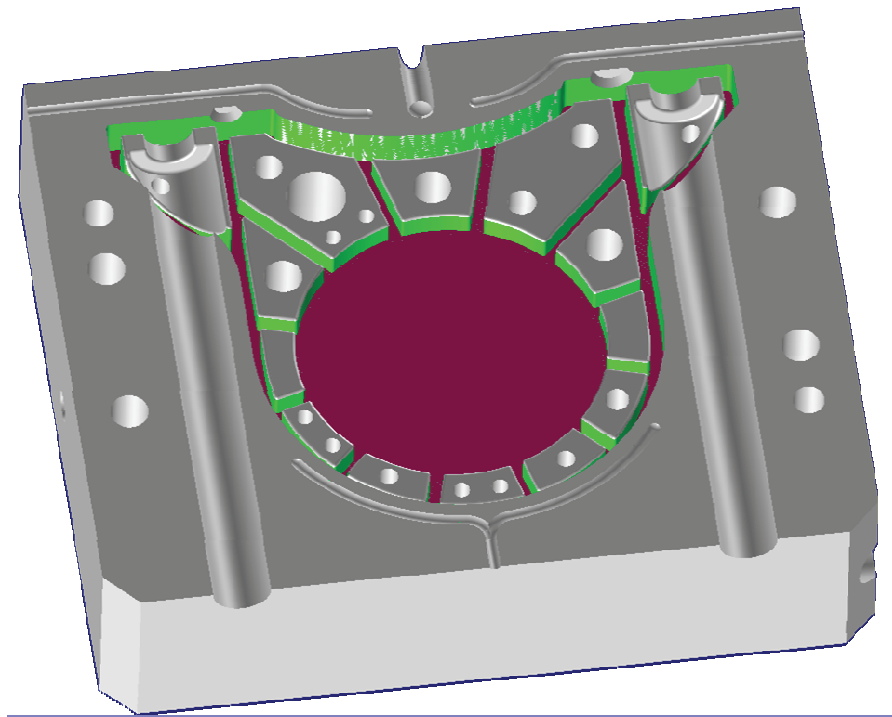
7.3 Příprava pro elektroerozivní obrábění

K přípravě pro EDM je důležité rozvrhnutí, co se bude vyrábět pomocí EDM. Musí se rozdělit elektrody, protože většinou není možné všechny obráběné plochy pomocí EDM umístit na jednu nástrojovou elektrodu. Tvorba modelů nástrojových elektrod a vytvoření programu pro jejich frézování, určení elektrojiskrové mezery, volba grafitu atd.

7.3.1 Modelování nástrojových elektrod

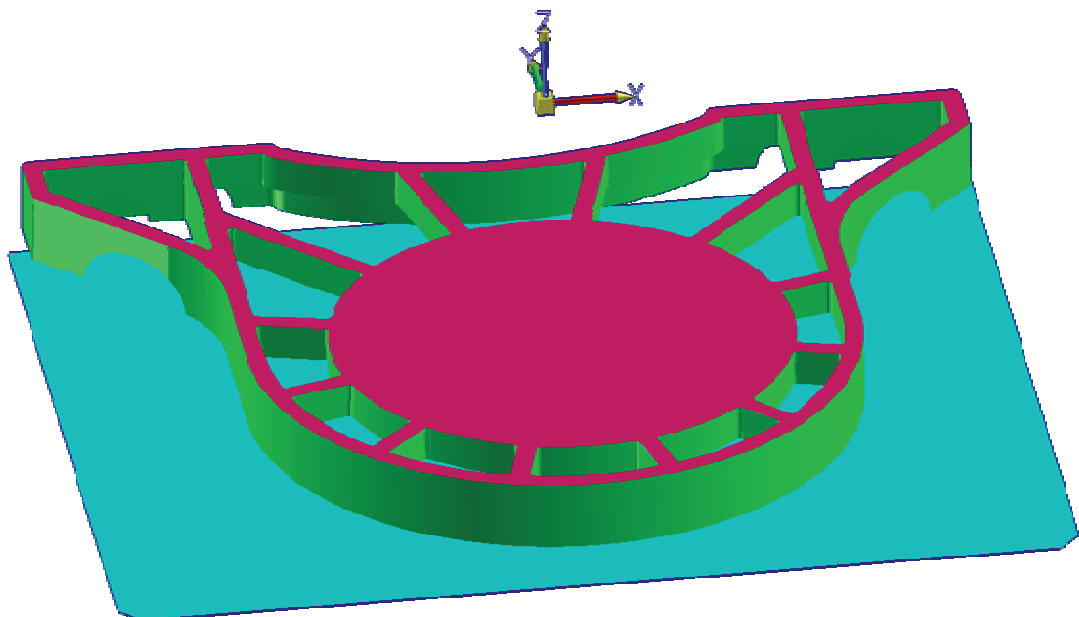
Tak jako k frézování, tak i k modelování nástrojových elektrod byl opět použit Surf-CAM. Nástrojová elektroda je negativem plochy obráběné elektroerozivním obráběním. Proto tvary frézováním nevyrobitelné se v negativu stávají pro frézování snadně vyrobitelné. Tento případ je velmi častý u hranatých zaoblení, kdy je nutné vytvořit ostré vnitřní hrany, což válcovou frézou není možné. V negativu je to ovšem obrobení kvádrů, tedy z technologického hlediska frézování věc snadná. Obdobný jev je možné sledovat u žeber, kdy nastává problém, že jsou žebra příliš hluboká a málo široká. Výroba takových žeber by vyžadovala použití fréz malých průměrů do příliš velkých hloubek. Vzhledem ke tvrdosti materiálu po kalení by se velmi pravděpodobně lámaly. Žebra na tvárníku i tvárnici nejsou příliš hluboká. Na tvárnici jsou různě zaoblená, mají různé hloubkové přechody a v těchto přechodech je nutné zachovat ostré hrany, nebylo tedy pochyb o použití elektroerozivního obrábění. Situace u tvárníku je odlišná, jelikož žebra mají hloubku ve všech místech stejnou. Frézování bylo možné realizovat, ale vzhledem k dezeniu na žebrech na tvárnici bylo rozhodnuto pro zachování stejného povrchu po EDM. Frézování žeber na tvárníku bude nasimulováno v SurfCAMu ke konečnému porovnání.

Na obrázku *Obr. 21.* je barevně odlišen model elektrody pro žebra na tvárníku. Zeleně jsou vybarveny svislé stěny. Svislé stěny mají malý odformovací úhel, pro snadnější vyjmutí výstřiku z formy. Fialově jsou zbarveny plochy, jež leží v jedné rovině osy Z.



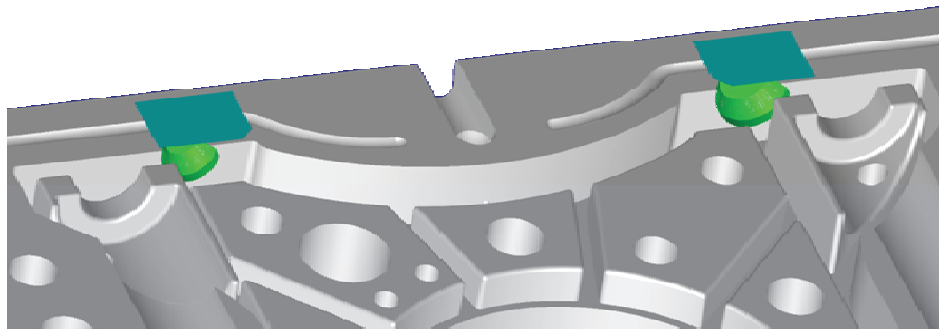
Obr. 21. Návrh modelu nástrojové elektrody pro žebra tvárničku.

Konečný model nástrojové elektrody pro žebra je zobrazen na *Obr. 22*. Modrá plocha pod nástrojovou elektrodou značí 5 mm vysoký rámeček, od kterého se vychází při najíždění elektrody těsně před elektroerozivním obráběním. Tento rámeček je běžně zaveden a dělá se u každé elektrody.



Obr. 22. Model nástrojové elektrody pro žebra tvárničku.

Kromě žeber bylo potřeba vytvořit ještě dva různé zácvaky. Požadavek pro výrobu byla nutnost ostrých hran. Zácvaky budou využívány jako ustavovací body v měřicím přípravku pro měření výstřiku. Bylo rozhodnuto pro umístění zácvaků na samostatnou elektrodu, aby nebyly kombinovány se žebry. Zácvaky byly vytvořeny jako nástrojová elektroda sdružená. Jedná se o dva kusy grafitu na jedné destičce. Hlavní důvod je úspora grafitu.



Obr. 23. Model nástrojové elektrody pro zácvaky v tvárníku.

7.3.2 Volba grafitu pro elektrody

Volba materiálu elektrody se řadí mezi důležitá rozhodnutí, která ovlivňují celou řadu faktorů při procesu elektroerozivního obrábění. Obecně se dá říci, že se zvažuje pět hlavních atributů a na jejich základě se poté zvolí správný druh grafitu. Mezi tyto atributy se řadí:

- 1) Úběr materiálu – grafit je účinnější než kovové elektrody, ovšem je důležité zvolit i správný druh grafitu. Úběr je uváděn v $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.
- 2) Odolnost proti opotřebení – dělí se na více druhů, z nichž nejdůležitější a nejzranitelnější je hranové opotřebení, pokud je minimalizováno, je celkové opotřebení elektrody velmi malé.
- 3) Jakost povrchu – zde je velmi důležité samotné nastavení procesu, ale i volba grafitu v něm hraje významnou roli.
- 4) Obrobitelnost – grafit je obecně velmi lehce obrobitelný, ovšem je třeba zvolit takový grafit, který má i svou pevnost, aby odolal případnému poškození a opotřebení z procesu hloubení.
- 5) Cena materiálu – ekonomické hledisko je již samozřejmostí u jakéhokoli procesu a volba grafitu není výjimkou. Zdánlivě levný grafit může celý proces EDM výrazně zdražit, na druhou stranu je zbytečné používat extra jemné grafity pro hrubovací operace.

Byl zvolen grafit EDM 160 od firmy POCO Graphite. Jedná se o izotropický grafit, který má jemná zrna. Je kladně hodnocen z hlediska skvělého poměru ceny k výkonu. Úběr kovu při použití tohoto typu grafitu je velký a má dobrou odolnost proti opotřebení, výhodou je také přijatelný povrch po hloubení. Tvrdost tohoto grafitu je 68 shore. Dosažitelný povrch po opracování je 27/24 VDI.

7.3.3 Příprava elektrody

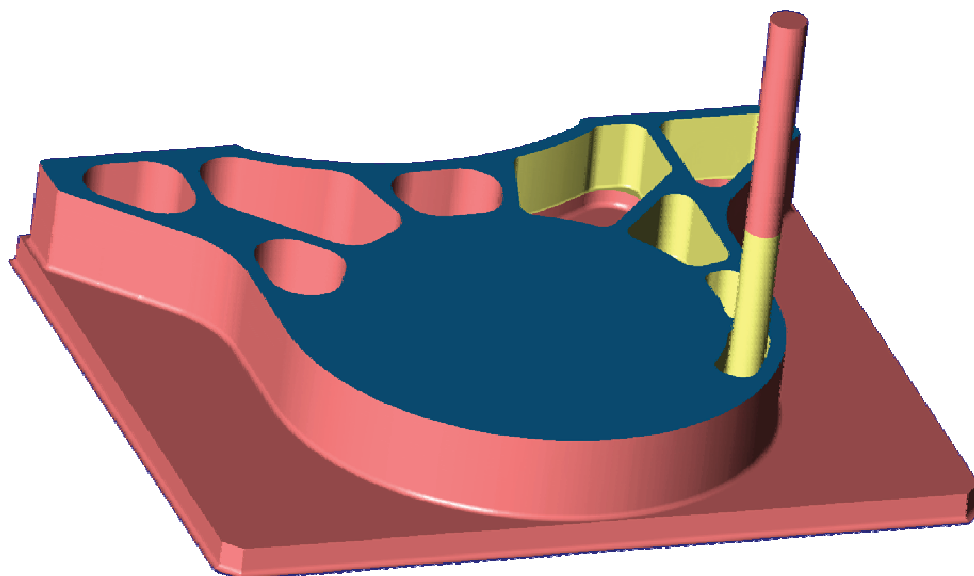
Polotovar nástrojové elektrody kvádr z grafitu, je připevněn ke kovové broušené destičce pomocí sekundového lepidla Cyberbond 2004. Broušená destička je osazena dora-zy a ustavujícími zářezy, které slouží k pneumatickému upínání na elektroerozivní hloubicí stroj. Lepidlo má velmi dobré elektricky vodivé vlastnosti. Tato podmínka musí být splněna, protože proud při EDM prochází skrz destičku k nástrojové elektrodě.



Obr. 24. Lepidlo pro připevnění grafitu.

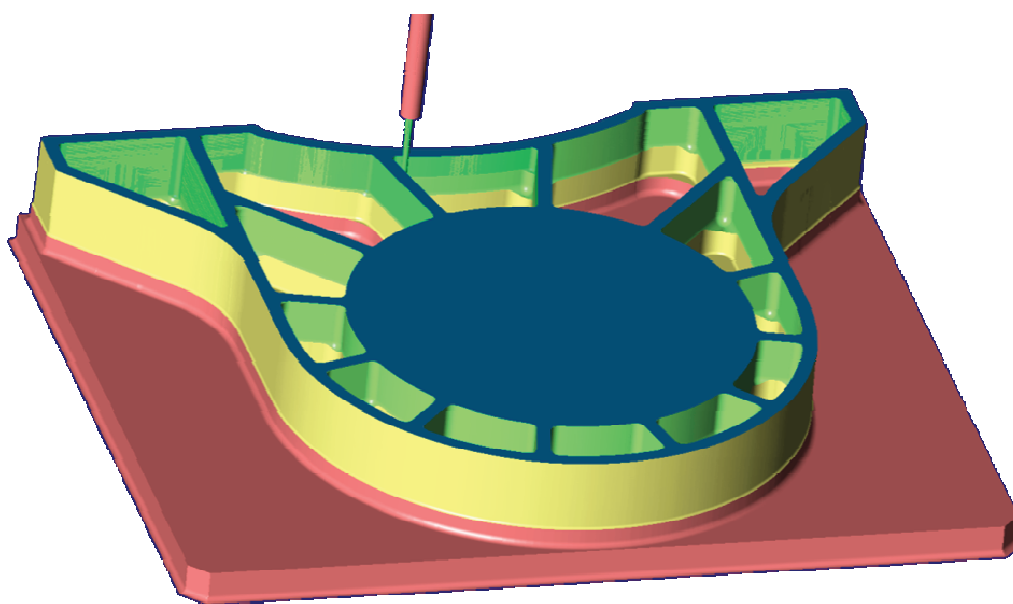
7.3.4 Frézování nástrojových elektrod

Na verifikaci v SurfCAMu lze zřetelně sledovat pohyby nástrojů při obrábění a lze tak velmi úspěšně eliminovat případné chyby v programování drah nástrojů a celkovém procesu obrábění. Na obrázku Obr. 25. je zobrazen nástroj průměru 6 mm s rohovým rádiusem 0,5 mm, který právě vyjíždí kapsy po hrubování nástrojem průměru 12 mm s rohovým rádiusem 1 mm.



Obr. 25. Verifikace frézování elektrody pro žebra, nástroj 6 r 0,5.

Na obrázku *Obr. 26.* lze vidět poslední nástroj průměru 1 mm s rohovým rádiusem 0,5 mm, který již pouze dokončuje vnitřní rohy.



Obr. 26. Verifikace frézování elektrody pro žebra, nástroj 1 r 0,5.

K frézování byl vytvořen záznam. Tento záznam slouží k vybírání správných programů, nástrojů a jsou v něm i jiné důležité informace. Záznam se využívá při frézování elektrod a následně je použit i při elektroerozivním obrábění.

Tab. 4. Záznam o elektrodách k frézování a pro EDM.

| POPIS PROGRAMU NC | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------|---------|-------|------|---------------------------|--------|-----|-------------------|----------|-----|----------|------|--------|----------|
| VYPRACOVAL: Pavlát | | | | | ČÍSLO VÝKRESU: R 1734 - 6 | | | | | | | | | |
| DATUM: 8.2.2013 | | | | | Tvárník | | | | | | | | | |
| Označení | PGM | Nástroj | Přid. | Krok | Polotovary | | | Rozměr Grafitu | Posunutí | | Poznámka | Kusů | Hotovo | osa Z |
| | | | | | Rozměry X Y | +Z | -Z | | X | Y | | | | |
| E61 | 1734611 | 12r1 | -0,2 | 0,8 | 67*53 | -33,03 | -53 | 134x106x20 | 0 | -2 | (-48) | 2 | | 20 |
| | 1734612 | 6r0,5 | -0,2 | 0,2 | | | | | | | | | | 12 |
| | 1734613 | 3r1,5 | -0,2 | 0,1 | | | | | | | | | | 12 |
| | 1734614 | 1r0,5 | -0,2 | 0,06 | | | | | | | | | | 11 |
| E62 | 1734621 | 12r1 | -0,2 | 0,8 | 47*5 | -37,63 | -53 | SDRUŽENÁ | 0 | -53 | (-48) | 2 | | 16 |
| | 1734622 | 4r2 | -0,2 | 0,09 | | | | | | | | | | 8 |

Pro lepší orientaci v záznamu jsou přidány vysvětlivky k některým důležitým údajům, u kterých není zřejmé, co znamenají dle zkratek:

- Označení – název elektrody
- PGM – název programu, který je vytvořen pro určitý nástroj
- Přid. – nazýváno také podmíra, nebo elektrojiskrová mezera, v tomto případě 0,2 mm na stěnu elektrody, celkově tedy 0,4 mm na celkový rozměr. V tomto případě není podmíra ve všech místech stejná. Je vytvořena programováním nástroje, který má průměr 11,6 mm, ale obrábí se průměrem 12 mm, což v konečném výsledku vytvoří na svislé stěně podmíru 0,2 mm, ale na vodorovné 0 mm. Existuje také varianta podmíry ve všech místech elektrody stejná, kdy se přetváří model místo nástrojů.
- Krok – úběr materiálu
- + Z – nejvyšší bod na elektrodě
- - Z – nejnižší bod na elektrodě, je to ofrézovaný rámeček pod elektrodou
- Poznámka – udává jak vysoký je ofrézovaný rámeček (v tomto případě 53 mm – 48 mm = 5 mm)
- Posunutí – střed rámečku pod elektrodou vzhledem k nulovému bodu obrobku pro elektroerozivní obrábění
- Osa Z – vyložení nástroje

Pro představu lze vidět na *Obr. 27.* částečný výřez programu, jelikož programy mívají běžně desetitisíce řádků, není možné zde vložit celý program. Na řádce číslo 1 je patrná změna v nástroji a vytvoření podmíry elektrody. Nástroj průměru 12 mm je přepsán na hodnotu 11,6 mm, což znamená podmíru 0,2 mm na stěnu. Tato hodnota se zadává také u elektroerozivního obrábění.

```

0 BEGIN PGM 1734611 MM
1 ; T14 FREZA CTVRTKOVA - PRUM 11.6/ ROHOVY RADIUS 1.
2 ; -- DEFINICE POSUVU PRO NASTROJ
3 FN 0: Q1 = 1300. ; ZAPICHOVACI POSUV
4 FN 0: Q2 = 1350. ; PRACOVNI POSUV
5 FN 0: Q3 = 20000 ; PLYNULY RYCHLOPOSUV
6 TOOL CALL 14 Z 56000
7 L Z-8. R0 FMAX M3
8 L X+53.88 Y+44.917 FMAX M13
9 L Z-30.53 FMAX
10 FQ1
11 L Z-33.83
12 Q22 = Q2*1.
13 FQ22
14 L X+48.831
15 L Y+39.356
16 L X+54.39 Y+44.915
17 L X+53.88 Y+44.917
18 L Y+44.899
19 FQ1
20 L Z-34.63
21 FQ22
22 L X+48.85
23 L Y+39.399
24 L X+54.346 Y+44.897

```

Obr. 27. Výřez z programu pro frézování elektrod.

Frézování elektrod proběhlo na stroji MAS MCV 500, jehož rozměry upínacího stolu jsou 800 mm x 500 mm. Rozsah otáček vřetena 20 min^{-1} až 6000 min^{-1} . Rychloposuv $16000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Posuv $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ až $5000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 28. Frézovací centrum MAS MCV 500.

Nástroje, jež byly použity k frézování elektrody E61 pro žebra, lze vidět na Obr. 29. Jedná se zleva o plátek pro frézu průměru 12 mm s rádiusem 1 mm, dále plátek pro frézu průměr 6 mm s rádiusem na hrotu 0,5 mm. Dvě kulové frézy, průměr 3 mm s rádiusem 1.5 mm a poslední průměr 1 mm s rádiusem 0,5 mm. Všechny nástroje jsou určeny výhradně pro obrábění grafitu a mají diamantový povlak.



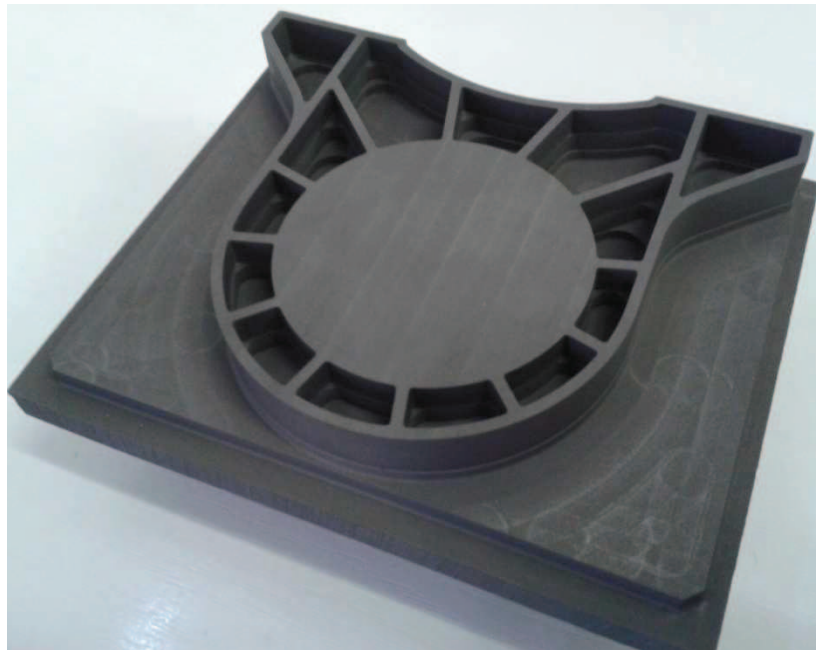
Obr. 29. Nástroje pro frézování elektrody pro žebra.

Pro elektrodu E62 tvořící zácvaky, byly použity nástroje, zleva plátková fréza 12r1, stejně jako u předchozí elektrody. A kulová fréza průměr 4 mm s rádiusem 2 mm.



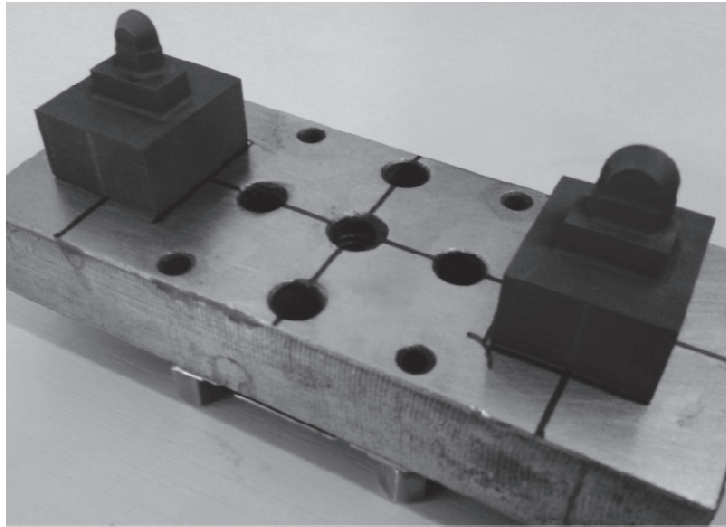
Obr. 30. Nástroje pro frézování elektrody pro zácvaky.

Dokončené elektrody po frézování, které jsou připraveny k hloubení žeber a zácvaků, lze vidět na následujících obrázcích.



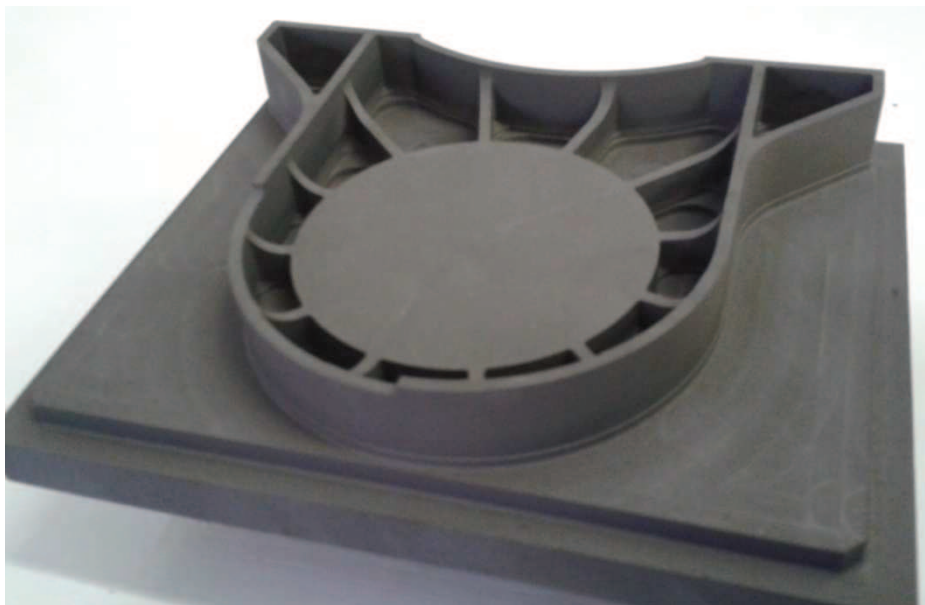
Obr. 31. Nástrojová elektroda k výrobě žeber na tvárníku.

U elektrody pro zácvaky lze pozorovat také destičku, na níž je grafit nalepen a která slouží k upnutí do stroje pro elektroerozivní obrábění.



Obr. 32. Elektroda k výrobě zácviku na tvárnici.

Pro srovnání je vložen Obr. 33. s elektrodou pro žebra na tvárnici, na níž lze zřetelně pozorovat hloubkové a tvarové přechody v žebrech.



Obr. 33. Nástrojová elektroda k výrobě žeber na tvárnici.

8 ELEKTROEROZIVNÍ OBRÁBĚNÍ

Každý cyklus elektroerozivního obrábění se skládá z doby aktivace pulzu, nazývané on-time, a z doby deaktivace pulzu, nazývaná off-time. Jednotkou těchto dob je mikrosekunda. Veškeré obrábění probíhá v době, kdy je pulz aktivován, proto je velice důležité znát trvání těchto pulzů a jejich frekvenci. [19]

Mezi úběrem kovu a energií dodanou do mezery v době kdy je pulz aktivován, existuje přímá úměra. Na tuto energii má vliv vrcholová hodnota proudu a délka doby pulzu. Přičemž zásadou je, že čím delší je pulz, tím více materiálu obrobku se odebere. Kráter vzniklý delším působením pulzu je širší a hlubší, než kráter způsobený kratším působením pulzu. Z toho tedy plyne hrubší povrch po opracování těchto delších pulzů. [19]

Pokud se jedná o vliv doby působení pulzu u elektrody, může nastat negativní jev, že elektroda začne mít nulové opotřebenění a při delším pokračování doby pulzu se elektroda začne dokonce zvětšovat v důsledku pokovení, tento jev je také nazýván jako připékání elektrody. [19]

Doba mezery, neboli času kdy pulz není aktivní (off-time), má vliv na rychlost a stabilitu řezu. Čím kratší je mezera, tím rychlejší je obrábění. Pokud je ale mezera příliš krátká, nedojde k dostatečnému odplavení roztaveného materiálu obrobku proudem dielektrika a nedojde k deionizaci dielektrika. To má za následek, že následující jiskra je nestabilní. Nestabilní podmínky způsobí chaotické cykly, čímž se řez zpomalí více, než by tomu bylo u dlouhých a stabilních dob deaktivace. [19]

Energie jiskry je dána velikostí proudu v ampérech, napětím a trváním pulzu. Během každého pulzu naroste protékající proud až na předem stanovenou hodnotu, která se nazývá vrcholová hodnota proudu. Předtím než začne průtok proudu, narůstá napětí na otevřené mezeře tak dlouho, než se vytvoří ionizační cesta v dielektriku. Jakmile začne proud protékat, napětí klesne a stabilizuje se na hladině platné pro pracovní mezeru. Přednastavené napětí určuje šířku jiskrové mezery, která je dána přední hranou elektrody a obrobkem. Obecně čím je hodnota napětí vyšší, tím se zvětší i mezera alepší se proplachovací podmínky a stabilizuje řez, ovšem při používání grafitových elektrod, se s rostoucím napětím zvyšuje i opotřebenění elektrody. [19]

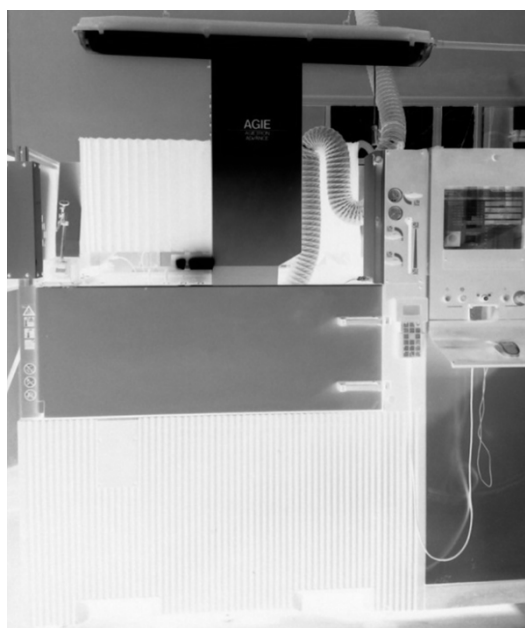
Pokud se jedná o polaritu u grafitových elektrod, platí, že kladná elektroda má menší opotřebení a záporná elektroda vyšší rychlost obrábění. Je tedy na zvážení, jaká polarita elektrody je pro daný okamžik vhodná. [19]

8.1 Obráběcí stroj

Elektroerozivní obrábění bylo realizováno na stroji AGIETRON Advance. Z technických dat o stroji byly vybrány tyto informace:

- Maximální rozměry obrobku 1100 mm x 750 mm x 370 mm.
- Maximální pojezdné dráhy stroje v osách X = 700 mm, Y = 500 mm a Z = 350 mm
- Min. a max. vzdálenost stůl – pinola = 165 mm / 515 mm
- Max. váha obrobku 1818 kg
- Max. váha jedné elektrody 20 kg
- Celkový počet elektrod v zásobníku 15 (6 vlevo a 9 vzadu)
- Pohon X/Y/Z – DC-Servomotor
- Max. pracovní proud 63 A
- Množství dielektrika 833 l
- Počet přípojek pro vyplachování 3
- Tlak vzduchu 7 bar
- Min. spotřeba vzduchu $0,56 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Na následující fotografii, je zobrazen popisovaný stroj pro elektroerozivní obrábění.



Obr. 34. Stroj pro EDM Agietron Advance.

8.2 Upnutí a vyrovnání obrobku

Jako první u procesu EDM je důležité pevně upnout obrobky a správně je vyrovnat, aby stroj zjistil jejich přesnou polohu. Jedná se o dvojnásobnou formu a tvárníky nejsou příliš velké, bylo rozhodnuto upnout obou kusy vedle sebe. Elektrody jsou vyrobeny dvakrát. První se použije jako hrubovací k odebrání co největšího množství materiálu. Po tomto procesu je již elektroda opotřebovaná, proto se použije druhá, která obrobí ostré hrany a vytvoří výsledný požadovaný povrch. V tomto pořadí obrobí oba tvárníky.

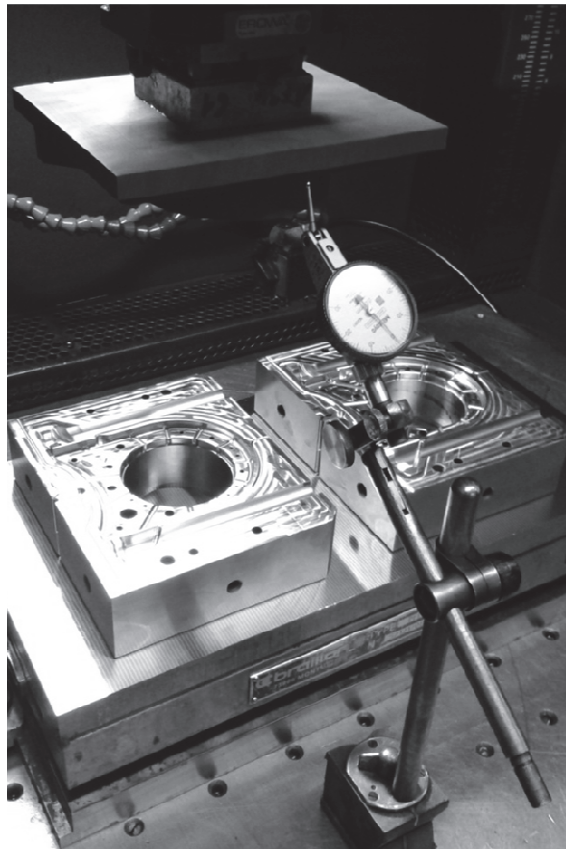
Tvárníky jsou upnuty pomocí magnetického pole. Magnetka je připevněna k upínacímu stolu pomocí šroubů. U velkých obrobků použití této malé magnetky nepřichází v úvahu, a proto se upíná pomocí šroubů a upínek přímo na upínací stůl. S pomocí sondy, která je vyobrazena na *Obr. 35*, zjistí obráběcí stroj přesnou polohu obou tvárníků. Vzhledem k nulovému bodu tvárníků, který se nachází v ose Z dole na magnetce a v osách X a Y, které jsou středěny na střed dílce, bude stroj dopravovat elektrody na předem určené místo. Místo je uvedeno v záznamu jako posunutí.



Obr. 35. Vyrovnání tvárníků před EDM.

8.3 Najíždění elektrod

Elektrody je také nutné správně najet, vyrovnat a uvést hodnoty posunutí vůči nulovému bodu obrobku. Jako první je nutné zkontrolovat a případně eliminovat vyosení elektrody, které mohlo nastat při frézování. Kontrola probíhá za použití číselníkového úchylkoměru, kdy se přejíždí rovná strana 5 mm vysokého frézovaného rámečku, který se nachází pod elektrodou. Případná odchylka se eliminuje vepsáním hodnoty vyosení v nastavení pracovních bodů pro danou elektrodu.



Obr. 36. Najíždění elektrod před EDM.

K druhému bodu najetí patří výšková hodnota, nacházející se v ose Z. Určuje se také dle rámečku a také je zde využíván záznam k frézování elektrod a elektroerozivnímu obrábění. Zde bylo využito Johansonových měrek. Je přednastavena určitá hodnota v ose Z, které se rámeček elektrody jemně dotkne a tato hodnota se poté přepíše ve stroji v pracovních bodech pro sjezd na hodnotu v ose Z. Nesmí být opomenuto odečtení hodnoty přednastavené na Johansonových měrkách.



Obr. 37. Najíždění elektrod v ose Z před EDM.

8.4 Nastavení obráběcího stroje

Při ustavování a najíždění, ať už samotného obrobku nebo nástrojových elektrod, je na monitoru obráběcího stroje zobrazeno pět variant různých způsobu najíždění.

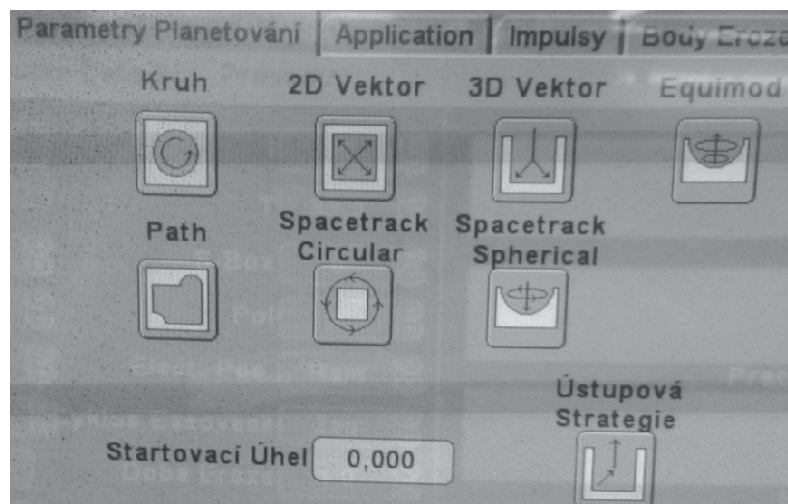


Obr. 38. Pracovní prostor pro výběr vystředění dílce nebo elektrod.

- 1) Polohování os – využití pro automatický pojezd v osách X, Y, Z a C (rotační osa).
- 2) Dotyk – povrch obrobku je vyhledán pomocí elektrody do okamžiku dotyku mezi obrobkem a elektrodou, výsledná hodnota se zapíše v určité ose.
- 3) Vnitřní středění – používá se při najíždění pomocí přesných děr v osách X a Y.
- 4) Vnější středění – funkce nalezne střed obrobku automaticky v ose X nebo v ose Y nebo v osách X i Y.
- 5) Vyhledávání rohu – automatické vyhledávání rohu dílce.

Například pro vyosení elektrody byla použita funkce „polohování os“, kdy se příslušné rotační ose C zapíše hodnota, o nižž je elektroda vůči obrobku vyosená. Pro najíždění elektrod v ose byla použita funkce „dotyk“.

Mezi další důležité nastavení patří parametry planetování, jehož pracovní plochu lze vidět na *Obr. 39*. Na výběr je z několika možností. Planetování se dá nejnázve charakterizovat jako dokončovací proces elektroerozivního obrábění. Ve zvoleném modelu nejdříve elektroda sjíždí v ose Z směrem dolů. Toto sjíždění není plynulé a elektroda vždy v nastavených intervalech „povyskočí“ neboli vykoná mezeru zvanou off-time. V této době se neobrábí, ale je zde velmi důležitý prostor pro výplach roztaveného kovu dielektrickou kapalinou. Když je elektroda cca 0,5 mm nad konečnou hodnotou osy Z, začíná planetování. Elektroda sjede v hloubce už pouze o malou hodnotu a následuje rozhlubování do stran, dle zvoleného způsobu. Tento jev se střídá, až je hodnota v osách Z, X i Y dosažena.



Obr. 39. Pracovní prostor pro výběr planetování.

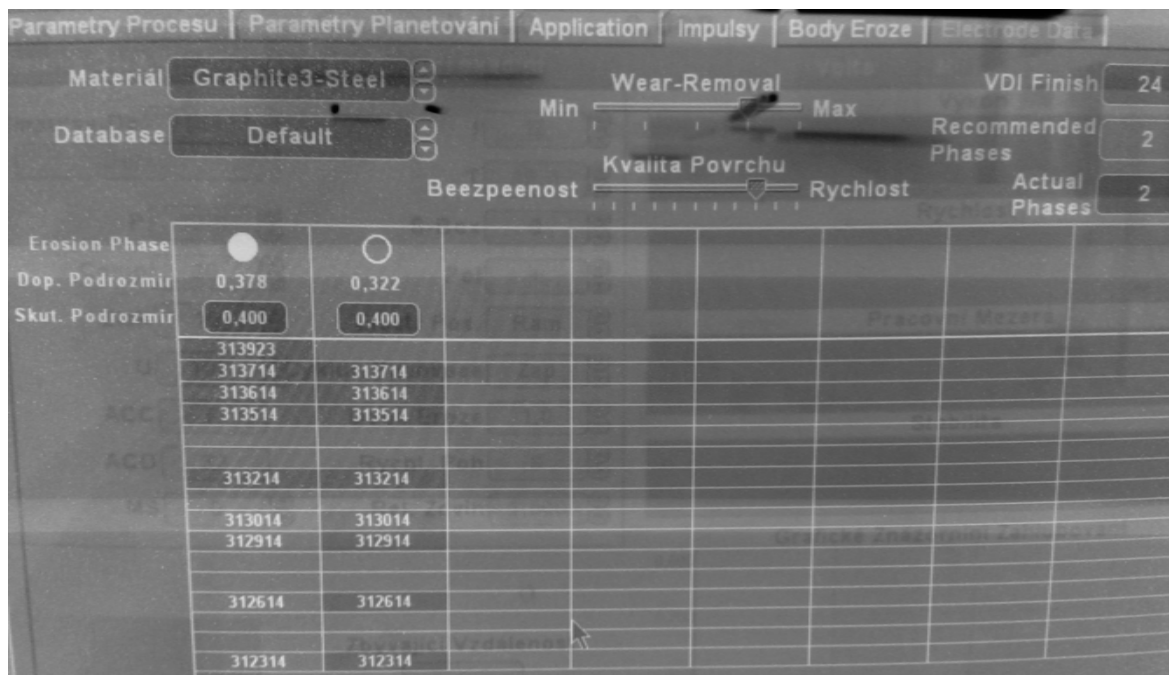
Pro obrábění tvárníku i tvárnice byla zvolena metoda planetování kruh. Je to velmi často využívaný způsob. Pokud nenastanou ve výrobě nějaká specifika, je téměř vždy použita metoda kruhu. Při kruhovém planetárním pohybu se geometrie elektrody rovnoměrně rozšiřuje v rovinách X a Y.

Pro doplnění jsou uvedena krátká vysvětlení k dalším způsobům planetárních pohybů, mezi něž patří:

- 2D vektor – pohyb ve směru rovinného vektoru, využívá se pro obrábění přesných ostrých rohů, které mají danou geometrii.

- 3D vektor – pohyb ve směru prostorového vektoru, 3D vektor najíždí elektrodou pod úhlem 45° svisle do obrobku.
- Equimod – planetární pohyb připomínající kolébku, je velmi účinný pro oblé tvary, nevýhodou je použití pouze pro podmíru ve všech místech stejnou.

Pracovní plochu s nejvíce volenými hodnotami lze sledovat na *Obr. 40.*, který je zachycen již v momentě, kdy všechny hodnoty byly již nastaveny.



Obr. 40. Zadávání parametrů potřebných k EDM.

Nastavené parametry, hodnoty a vysvětlivky k nim:

- Materiál – elektrody/obrobku – grafit/ocel.
- VDI Finish – konečný povrch obráběné plochy, u EDM je jakost plochy značena VDI, vysvětlení a přepočet hodnoty na Ra bude v pozdější kapitole rozebrán.
- Erosion Phase – plný kruh = hrubování, prázdný kruh = dokončování.
- Doporučený podrozměr – hodnota dána strojem.
- Skutečný podrozměr – hodnota zvolená tvůrcem elektrody, celkový podrozměr na elektrodu, nikoliv jen na stranu, jak je udána v záznamu pro frézování a EDM

Na *Obr. 41.* je zřetelně vidět celý program pro jednu elektrodu. Důvodem rozdělení erozí pro jednu elektrodu na pět částí je, že každý planetární pohyb se zapíše jako jedna eroze. Velmi často je erozí i více. Dále je možno si všimnout informací o výměně elektrod, najíždění pracovních pozic nebo přejezd nad druhý obrobek.

| Krok Programu | |
|---------------|---------------------------|
| 1 | |
| 2 | Začátek AEP Kroku |
| 3 | Výměna Elektrody 1 |
| 4 | Použit Obrobek 1 |
| 5 | Polohování na Prac. Bod 1 |
| 6 | Eroze 1 |
| 7 | Eroze 2 |
| 8 | Eroze 3 |
| 9 | Eroze 4 |
| 10 | Eroze 5 |
| 11 | Použit Obrobek 2 |
| 12 | Polohování na Prac. Bod 1 |
| 13 | Eroze 1 |
| 14 | Eroze 2 |
| 15 | Eroze 3 |
| 16 | Eroze 4 |
| 17 | Eroze 5 |
| 18 | Výměna Elektrody 2 |
| 19 | Polohování na Prac. Bod 1 |
| 20 | Eroze 6 |

Obr. 41. Program procesu EDM.

Na závěr byla provedena vizuální kontrola, zda mají obě elektrody správné najížděcí hodnoty. Je to puštěný proces nanečisto. Na Obr. 42. je vyobrazena elektroda pro žebra v těsné blízkosti nad tvárníkem, od této hodnoty už elektroda nesjíždí v ose Z rychloposuvem, je to takzvaná startovací pozice elektrody.



Obr. 42. Kontrola zadaných souřadnic, elektroda pro žebra.

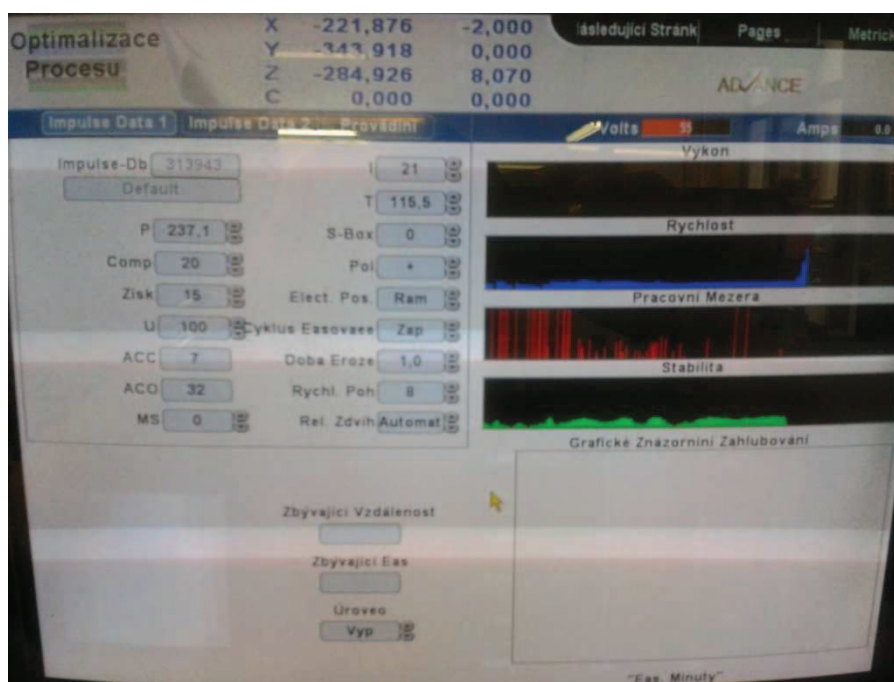
Na Obr. 43. je vyobrazena elektroda pro zácvky, která se také nachází ve startovací pozici těsně nad tvárníkem. Na boku kovové destičky, na níž je grafit přilepen, je uvedená hodnota vyosení.



Obr. 43. Kontrola zadaných souřadnic, elektroda pro zácvky.

8.5 Proces obrábění

Během procesu elektroerozivního obrábění je na monitoru stroje zobrazena pracovní plocha optimalizace procesu. Zaznamenává průběh procesu erodování a je možný případný zásah do jeho postupu.

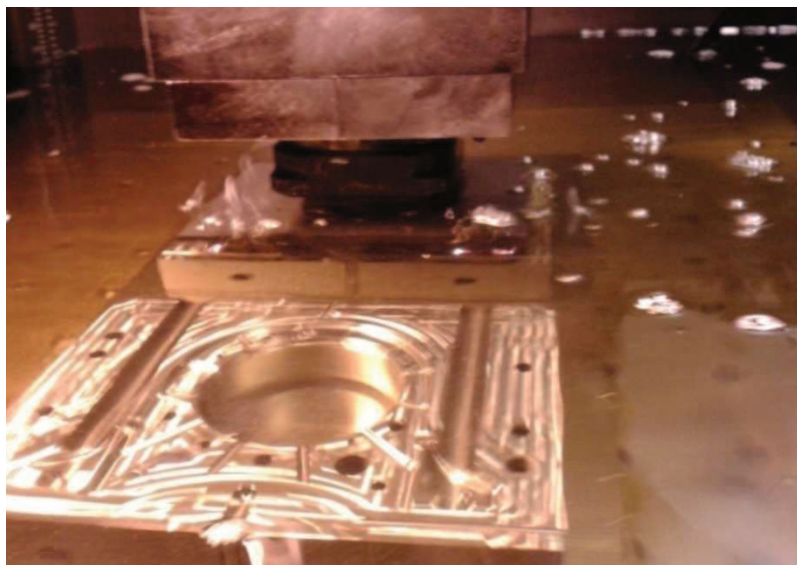


Obr. 44. Pracovní plocha během EDM.

Vysvětlivky k nejdůležitějším údajům a grafům:

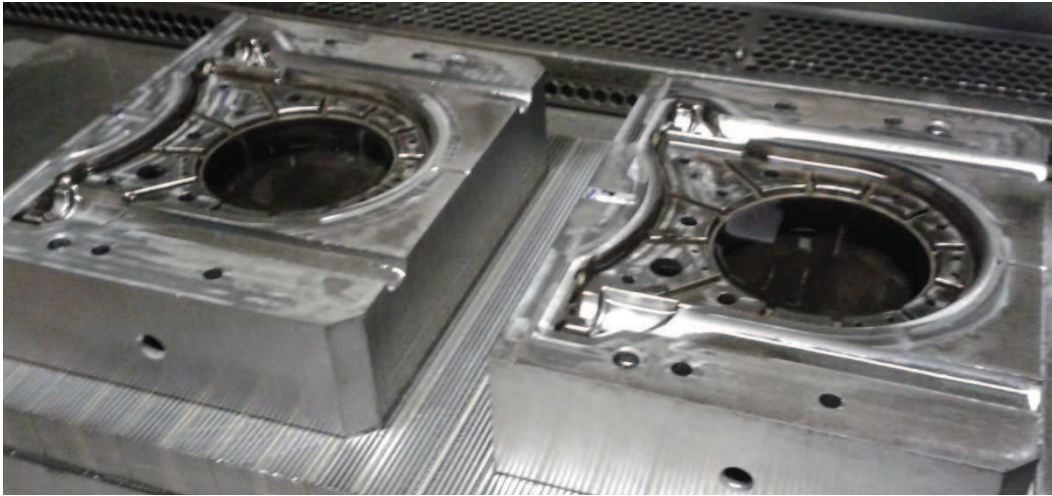
- Souřadnice X, Y, Z a C – levý sloupec je pozice stroje a pravý sloupec pozice obrobku
- Výkon – graficky znázorňuje výkon výboje mezi obrobkem a elektrodou, je udán v procentech
- Rychlost – grafické znázornění vektoru rychlosti pohybu
- Pracovní mezera – ukazuje její zúžení nebo znečištění vyjiskřovací mezery
- Stabilita – frekvence a amplituda pohybu osy Z
- Grafické znázornění zahlubování – závislost vzdálenosti na čase
- I – špičkový proud v ampérech
- T – on-time
- P – off-time
- Pol – polarita
- U – napětí ve voltech

Během obrábění jsou oba tvárníky plně ponořeny v dielektriku. Výška hladiny je volitelná a pro různé výškové profily obrobků se mění. Cílem je, aby všechna obráběná místa byla zalita dielektrikem, ale zároveň upínací hlava pro elektrody nebyla ponořena příliš v dielektriku. Na *Obr. 45.* si lze prohlédnout obrábění žeber na tvárníku. Na první pohled jsou patrné bubliny, jež se tvoří na hladině. Jsou to výpary, které vznikají při tavení kovu vlivem výbojů. Při detailnějším prozkoumání si lze všimnout i jisker, což je výboj mezi elektrodou a obrobkem.



Obr. 45. Tvárníky obráběné v dielektriku.

Po obrábění a vypuštění dielektrika lze pozorovat obrobky znečištěné od směsi rozpuštěného kovu a grafitu, které byly opotřebovány, nebo obrobeny během EDM.



Obr. 46. Tvárníky těsně po EDM.

Na hrubovací elektrodě je zřejmé značné opotřebení obzvláště v oblasti ostrých hran žeber.

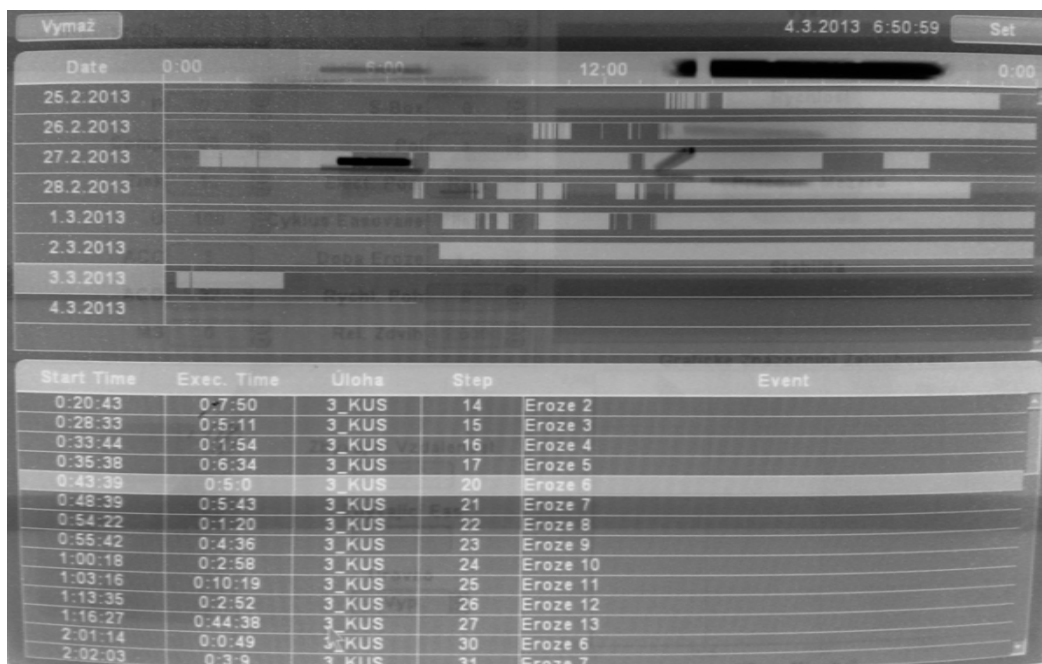


Obr. 47. Opotřebovaná elektroda pro žebra.

Na závěr je potřeba zjistit, jak dlouho trvalo elektroerozivní obrábění těchto žeber a zácvaků na obou kusech tvárníků. Je potřeba zdůraznit, že obrábění probíhalo přes noc, bez dohledu jakékoli pověřené osoby, která je způsobilá se zařízením pracovat, proto byly voleny opatrnější parametry. Takovéto parametry především s ohledem na špičkový proud, který by mohl způsobit pokovování elektrody a tedy její „připékání“. V místě připečení by

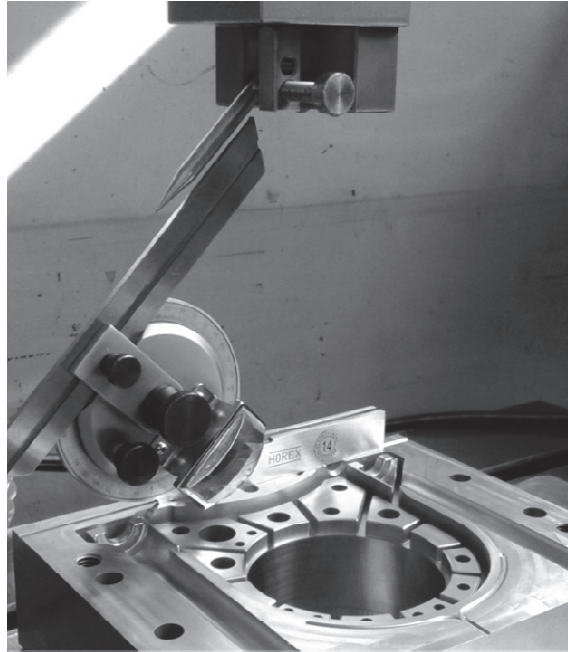
mohl vzniknout obrovský kráter. Jako oprava by připadalo v úvahu vyfrézování zasaženého místa a následné navařování a nové obrábění.

Na *Obr. 48*. lze pozorovat časové rozdělení dle dnů, kdy stroj pracuje. Dle různých programů lze zjistit, kolik která eroze zabrala času. Celkový čas obrábění byl 16 hodin, musí se ovšem počítat se dvěma kusy tvárníku a hloubením zácvaků. Na jednom tvárníku zabralo 7 hodin vyrobít žebra elektroerozivním způsobem. Čas narostl opatrnějšími parametry a navíc se volil konečný povrch lepší kvality. Čím lepšího povrchu je dosahováno, tím se prodlužuje i doba obrábění.



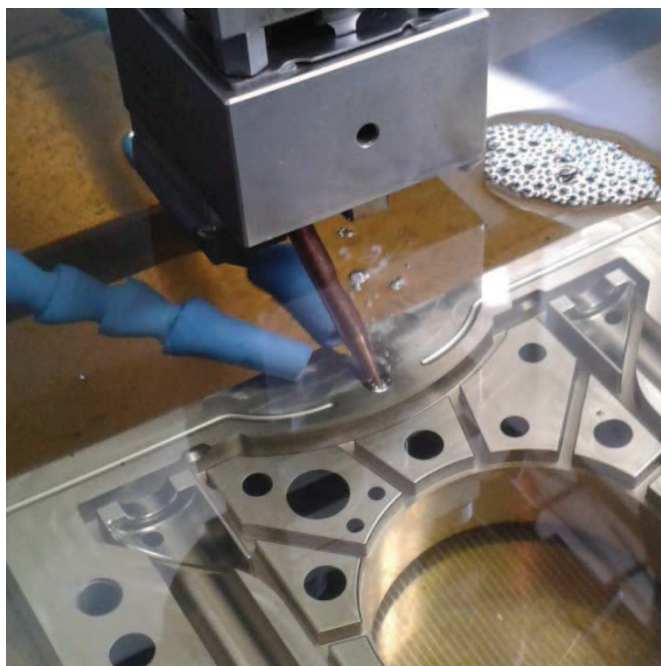
Obr. 48. Grafický časový záznam EDM.

Na tvárníku se pomocí EDM zhotovoval kuželový otvor pro vtok taveniny. V místě ústí do dutiny má tento vtok průměr 1 mm a kužel, který má vrcholový úhel 10° , je spuštěn do dutiny pod úhlem 60° .



Obr. 49. Najíždění elektrody pro vtok.

Elektroda pro vtok byla zhotovena na soustruhu a jako materiál elektrody byla použita měď. Elektroda sjíždí pod požadovaným úhlem ze zadané souřadnice v nejvyšším bodu osy do nejnižšího bodu osy, tyto hodnoty jsou udány v osách X, Y a Z. Na *obr. 50*. lze vidět průběh obrábění. Modré trubice slouží jako výplach. Je to dielektrikum hnáno pod proudem do místa obrábění a usnadňuje proces, protože rychleji vyplavuje ven odebraný materiál.



Obr. 50. Elektroerozivní obrábění vtoku na tvárníku.

8.6 Povrch po opracování

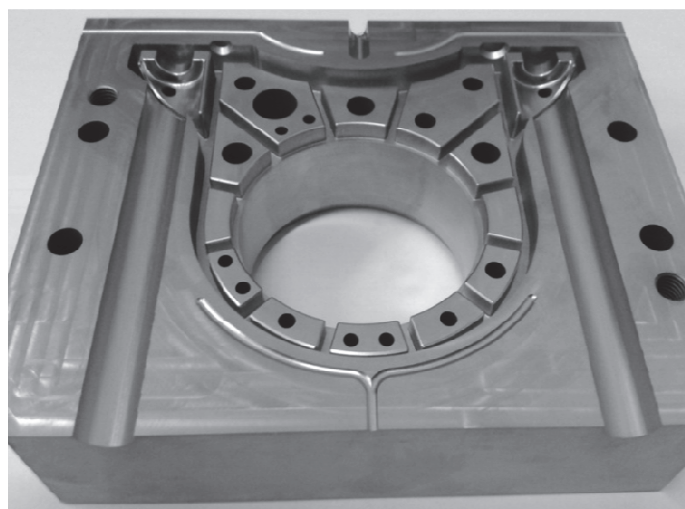
U procesu elektroerozivního obrábění se zadává jako hodnota jakosti povrchu VDI. Pro snadnější práci a představu, co daná hodnota VDI představuje za povrch, existuje etalon. Etalon má z jedné strany uvedenou hodnotu VDI a pod ní je reálný povrch s uvedenou hodnotou VDI, lze tedy porovnat opticky i hmatem, jak bude výsledný povrch po EDM vypadat při zadané hodnotě. Z druhé strany je přepočítání VDI směrem k známějším hodnotám Ra a Rz. V dnešní době již ale bývá obvyklé uvádění ve výkresech v Ra pro frézovaná místa a VDI pro místa vyráběná EDM.



| | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 38 | 39 | 42 | 45 |
|--------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Klasse | 15 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 | 33 | 36 | 38 | 39 | 42 | 45 |
| Ra | 0,56 | 0,80 | 1,12 | 1,60 | 2,24 | 3,14 | 4,50 | 6,30 | 8,50 | 9,00 | 12,5 | 18,0 |
| Rz | 2,78 | 3,77 | 7,14 | 9,93 | 14,80 | 15,78 | 21,60 | 29,10 | 33 | 45 | 61 | 90 |

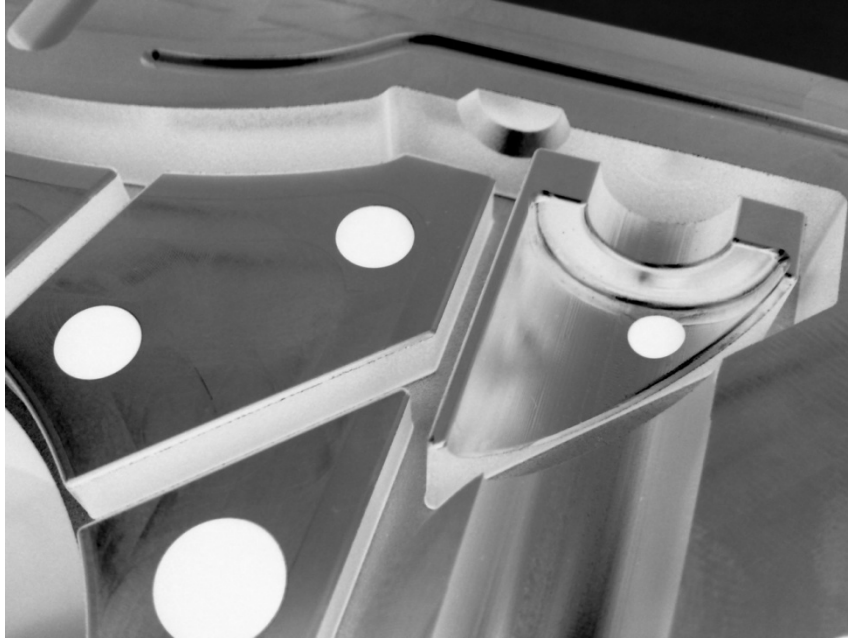
Obr. 51. Etalon pro drsnost povrchu.

Pro obrábění žeber a zácvaků, tedy částí, které jsou na vstříkovaném díle viditelné, byla nastavena hodnota VDI 24. Tvárník, který má již vyhloubeny všechny tvarové části a je očištěn, je zobrazen na následujícím obrázku.



Obr. 52. Dokončený tvárník po EDM.

V detailním záběru je možno alespoň částečně porovnat jakost povrchu žeber a zácva-ků. Lze se přesvědčit, že hodnota VDI 24, která byla před procesem nastavena, byla nako-nec i dodržena.



Obr. 53. Detail na žebra tvárníku zhotovená EDM.

9 REÁLNÝ VSTŘIKOVANÝ VÝROBEK

Po celkovém složení a slícování byla forma předána ke zkoušce. Po této zkoušce jsou pořízeny následující fotografie již reálného výstřiku. Celý výstřik je vyfocen ze strany tvárníku, tedy oblasti hloubených žeber, jejichž výroba byla detailně rozebrána. Přestože byl dosažený povrch po elektroerozivním obrábění vyhovující, je u žeber časté ruční doleštění. Hlavní efekt této činnosti je snadnější vyhazování výstřiku z formy a tedy i zamezení poškrábání nebo dokonce vzpříčení vstřikovaného výrobku.



Obr. 54. Reálný vstřikovaný výrobek.

Na detailnější fotografii je vstřikovaný výrobek zachycen ze strany tvárnice, kde jsou žebra klenutější. Po podrobném prozkoumání je patrné, že vrchní strana žeber na výstřiku nemá úplné ostré hrany. Tato skutečnost může být způsobena příliš opotřebovanou elektrodou. V tomto případě se ale o tento problém nejedná, jelikož elektrody byly použity dvě a v pořadí druhá neopotřebovaná elektroda odebírala již minimum materiálu. Dokončovací elektroda tvořila výsledný povrch a právě tyto ostré hrany. U tohoto výstřiku jsou oblejší hrany způsobeny polymerem, který má jako plnivo skelná vlákna a je u něj vždy problém s dotékáním do ostrých koutů. Tento výstřik ale nemá vyslovený požadavek na ostrost hran, proto je vyhovující.



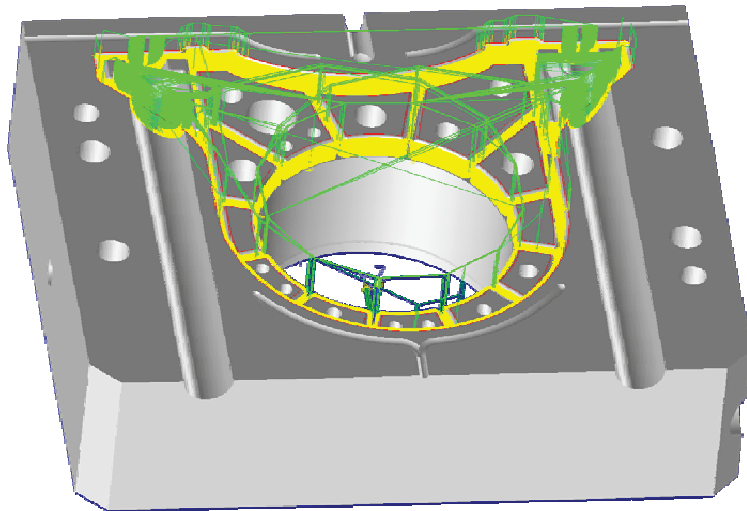
Obr. 55. Detail na žebra reálného vstříkovaného výrobku.

10 NÁVRH FRÉZOVÁNÍ ŽEBER NA TVÁRNÍKU

Pro srovnání byl v programu SurfCAM vytvořen program pro frézování žeber na tvárníku, jelikož tato možnost připadala v úvahu a bylo možno vyrábět žebra touto metodou konvenčního obrábění. Tento proces ovšem nebyl fyzicky uskutečněn, ale SurfCAM dokáže nasimulovat celý proces tak, aby se dal zjistit čas obrábění frézováním.

Žebra jsou relativně tenká, proto se musela obrábět nástrojem s malým průměrem, aby se dostal do mezery pro žebra. Největší možný nástroj je válcová fréza průměru 2 mm bez rohového rádiusu, jelikož hrany žeber na dně tvárníku mají být ostré. Hloubka žeber je 9,7 mm. Vycházelo se ze situace, která byla k dispozici. Stroj s maximálním počtem otáček 8000 min^{-1} . Pro nástroje tak malého průměru není tak nízký počet otáček zrovna vhodný a bylo tedy nutné snížit i posuvy, aby byl tento nedostatek eliminován.

Řezné podmínky byly voleny také s ohledem na požadovanou drsnost dle výkresu, která má odpovídat hodnotě $Ra 1,6$.



Obr. 56. Návrh zhotovení žeber frézováním.

11 SROVNÁNÍ FRÉZOVÁNÍ A ELEKTROEROZIVNÍHO OBRÁBĚNÍ

Pokud je možnost posouzení obou druhů výroby dopředu a vše dopodrobna rozplánovat, není problémem zvolit optimální řešení. Ve výrobním procesu i časová délka rozhodování jsou peníze a tento čas může ohrozit i termín zakázky. Proto je důležité mít na pozici rozhodující o výrobě odborníka, který dokáže výrobu naplánovat tak, aby byla co nejefektivnější a v dnešní době hlavně nejekonomičtější.

11.1 Zhodnocení dle jakosti povrchu

Porovnání z hlediska jakosti povrchu je složitější, protože povrchy po EDM i frézování mají zcela jiný charakter. Podmínka dle výkresové dokumentace udávala hodnotu pro frézování Ra 1,6 a VDI u EDM bylo nastaveno na hodnotu 24, což odpovídá Ra 1,6. Z tohoto hlediska je tedy drsnost povrchu u obou typů obrábění totožná a byla splněna. Záleží na požadavku na jakost povrchu pro vstřikovaný díl. Povrch po EDM je vzhledově vyvážený, zatímco u frézovaných tvarů lze na výstřicích pozorovat stopy po frézování, které nejsou vždy žádoucí.

11.2 Ekonomické zhodnocení

Ekonomické zhodnocení je zohledněno pro oba kusy tvárníků, tedy výrobu dvou žeb. Na čas technologa a cenu grafitu tato dvojitá výroba nemá vliv, protože pro technologickou přípravu byl program vytvořen pouze jednou. To že je použit dvakrát, už nemá na cenu technologa vliv. Taktéž cena grafitu zůstává stejná, jelikož je potřeba jak elektrody hrubovací, tak i dokončovací. Cena by vzrostla až pokud by se vyráběly tři a více tvárníků – bylo by potřeba více dokončovacích elektrod.

11.2.1 Žebra vyrobená elektroerozivním obráběním

| | | | | |
|------------------------------|---|----------------------------------|---|----------|
| Čas technologa: | 4 hod. | $4 * 940 \text{ Kč.hod}^{-1}$ | = | 3760 Kč |
| Cena grafitu: | $0,46 \text{ dm}^3 * 2 = 0,92 \text{ dm}^3$ | $0,92 * 1200 \text{ Kč.dm}^{-3}$ | = | 1104 Kč |
| Čas výroby elektrody na CNC: | 12 hod. | $12 * 880 \text{ Kč.hod}^{-1}$ | = | 10560 Kč |
| Čas výroby EDM: | 14 hod. | $14 * 840 \text{ Kč.hod}^{-1}$ | = | 11760 Kč |
| CELKOVÉ NÁKLADY: | | | = | 27184 Kč |

pozn. cena za nástroje u frézování je započítána v nákladech za hodinu u CNC

11.2.2 Žebra vyrobená frézováním

| | | | | |
|-----------------------------|---------|--------------------------------|---|----------|
| Čas technologa: | 3 hod. | $3 * 940 \text{ Kč.hod}^{-1}$ | = | 2820 Kč |
| Čas frézování žeber na CNC: | 12 hod. | $12 * 880 \text{ Kč.hod}^{-1}$ | = | 10560 Kč |
| CELKOVÉ NÁKLADY: | | | = | 13380 Kč |

pozn. cena za nástroje u frézování je započítána v nákladech za hodinu u CNC

11.3 Celkové zhodnocení

Z výsledků ekonomického zhodnocení se potvrdil předpoklad, že elektroerozivní obrábění je finančně náročnější druh obrábění. Pro výrobu žeber na dvou kusech tvárníků vyšly náklady pro výrobu elektroerozivním obráběním cca dvakrát vyšší než pro výroby frézováním.

Na obhajobu EDM je ovšem důležité zdůraznit fakt, že žebra na tvárnících použitých v této práci byla hluboká pouze do 10 mm, navíc ve všech místech stejná, nebyla různě klenutá, jako například u tvárnic, jejich šířka byla větší než 2 mm. Proto se možnost frézování žeber přímo vybízela.

Jak je ale z praxe zřejmé, takto výhodná žebra pro frézování se objevují málokdy, obzvláště pokud se jedná o formy pro vstřikování plastů, které vyrábí výrobky pro automobilový průmysl. Naopak jsou velmi častá žebra tloušťky 1 mm do hloubky kolem 60 mm, která navíc mají různý výškový profil. V tomto případě výroba těchto žeber frézováním nepřichází v úvahu.

Přestože ve srovnání vyšlo EDM jako nákladnější alternativa, je právě tato varianta nejvhodnější. Z tohoto důvodu nevyrobitelnosti konvenčními metodami se velmi často přistupuje k elektroerozivnímu obrábění, pro které obrábění takových žeber není problém.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se dělí na dvě části, na teoretickou a praktickou. V teoretické části byly popsány vstříkovací formy a druhy obrábění, které se při výrobě forem používají, a to konvenční a nekonvenční. Část věnována vstříkovacím formám popisuje plasty vhodné pro vstříkování, konstrukční řešení forem nebo náležitosti vstříkovaných výrobků. U konvenčních metod byl kladen důraz na technologii frézování na CNC obráběcích strojích a také technickou podporu frézování programem SurfCAM. Při popisu nekonvenčních metod byl kladen důraz na elektroerozivní obrábění s náležitostmi, které k němu patří.

Praktická část řeší postup výroby tvarově nejsložitějších dílů formy, tvárníku a tvárnice. Je zde předveden postup výroby od dodání 3D modelů dílu z konstrukce přes technologickou přípravu, která řeší problém, které partie se budou vyrábět frézováním, a které elektroerozivním obráběním. Tvorba programu pro frézování byla realizována v programu SurfCAM. Modelování a následné obrábění nástrojových elektrod pro elektroerozivní obrábění bylo také vytvořeno v SurfCAMu. Byl zdokumentován kompletní proces EDM daných entit tvarových dílů. Pro srovnání byl nasimulován proces frézování entit, které byly reálně vyráběny elektroerozivním obráběním. Závěr praktické části se věnuje srovnání konvenčních (frézování) a nekonvenčních (EDM) metod obrábění. Bylo provedeno ekonomické zhodnocení, které dle očekávání vyšlo pozitivněji pro frézování než pro EDM, ovšem je důležité podotknout, že v případě výroby tvárníku i tvárnice se nejednalo o složitá žebra a frézování bylo možnou variantou. Mnohem častější jsou případy, kdy jsou žebra nevyrobitelná frézováním a je proto nutné využít EDM.

Závěrem je možno konstatovat, že nelze jednoznačně určit, který typ metody obrábění je nejvhodnější. Vždy se musí vycházet z dané situace a různorodosti tvarových dílů formy, jelikož každá vstříkovací forma je originálem. Technologie výroby, která lze uplatnit u jednoho typu formy, se u jiné formy jeví jako nepřijatelná. V poslední době je také důležitá otázka ekonomičnosti výroby, jako jednoho z nejvýraznějších aspektů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění. 1.vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT. 1989, Č.P. 6523
- [2] BOBČÍK, L. Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů. Díl 1. 2. vyd. Brno: Uniplast, 1999. 134 s. ISBN 4200100697537.
- [3] BOBČÍK, L. Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů. Díl 2. 1. vyd. Brno: Uniplast, 1999
- [4] DYM, J. B. Injection molds and molding. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers 2001. 395 p. ISBN 0-442-21785-4
- [5] KOČMAN, K., PROKOP, J.: Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: CERM, ISBN 80-214-3068-0
- [6] KOČMAN, K.: Speciální technologie. Obrábění. 3. vyd. Brno: Nakladatelství CERM, 2004. 227 s. ISBN 80-214-2562-8
- [7] KULHÁNEK, J. a kol.: Formy pro tváření plastických hmot. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966. 224s.
- [8] LUKOVICS, I.: Konstrukční materiály a technologie, Brno: VUT Brno, ISBN 80-214-0399-3
- [9] MÁDL, J. a kol.: Technologie obrábění a montáže, 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, 2004, 207 s., ISBN 80-7044-616-1
- [10] MAŇAS, M., HELŠTÝN J.: Výrobní stroje a zařízení: Gumárenské a plastikářské stroje II. Brno: VUT Brno, 1990. 199 s.
- [11] MAŇKOVÁ, I.: Progresívne technologie. Vienaľa Košice, 2000, ISBN 80-7099-430-4
- [12] MIKOVEC, M.: Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí. 1. vyd., Praha: Nakladatelství technické literatury, 1982, 200 s.
- [13] MORÁVEK, R.: Nekonvenční metody obrábění. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9
- [14] ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V.: Strojírenská technologie 3. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. 221 s. ISBN 80-7183-336-3
- [15] ŘASA, J., HANĚK, V., KAFKA, J.: Strojírenská technologie 4. 1. vyd. Praha: Scientia, 2003. 505 s. ISBN 80-7183-284-7

- [16] SADÍLEK, M.: CAM systémy v obrábění I. 2. vyd. Ostrava: VŠB Ostrava, 2010. 143 s. ISBN 978-80-248-2278-5
- [17] ŠTULPA, M.: CNC: Obráběcí stroje a jejich programování. 1.vyd. Praha: BEN – technické nakladatelství, 2008. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7
- [18] VLACH, B.: Technologie obrábění a montáží. 1.vyd. Praha: SNTL. 1990, L13-C3-V-31/28936
- [19] TEDOK, spol. s.r.o., Zkušenosti s aplikacemi POCO grafitů, 11/2002
- [20] Vstřikování plastů. Technická univerzita Liberec, [online]. [cit. 5.2.2013] Dostupné z <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm>
- [21] CNC frézky. První hanácká BOW [online]. [cit. 5.2.2013] Dostupné z <<http://www.bow.cz/produkt/3511210-cnc-frezka-opti-f150-tc>>
- [22] Uživatelský souřadnicový systém. Autodesk [online]. [cit. 5.2.2013] Dostupné z <<http://exchange.autodesk.com/autocad/csy/online-help/ACD/2012/CSY/pages/WS1a919382645f5ff-56c0cd8012a8003217ae4.htm>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-------------------|--|
| °C | stupeň Celsia, jednotka teploty |
| A | ampér, jednotka proudu |
| CAD | Computer Aided Design, počítačem podpořený návrh |
| CAM | Computer Aided Manufacturing, počítačem podporovaná výroba |
| CNC | Computer Numerical Control, počítačem řízené stroje |
| ČSN | Česká státní norma |
| EDM | Electrical Discharge Machining, elektroerozivní obrábění |
| FR | retardér hoření |
| GF | skleněná vlákna |
| HRC | tvrdost dle Rockwella |
| IT | jakost povrchu |
| kg | kilogram, jednotka hmotnosti |
| kHz | jednotka frekvence |
| m.s ⁻¹ | jednotka rychlosti |
| mm | jednotka délky |
| MPa | jednotka tlaku |
| PA | polyamid |
| Ra | drsnost povrchu |
| Rz | drsnost povrchu |
| SVS | studené vtokové systémy |
| V | volt, jednotka napětí |
| VDI | drsnost povrchu u elektroerozivního obrábění |
| VVS | vyhřívané vtokové systémy |
| Δ | delta, vzdálenost |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 1. Vstřikovací cyklus [20]</i> | 13 |
| <i>Obr. 2. Vstřikovací forma v řezu</i> | 15 |
| <i>Obr. 3. Technické údaje potřebné pro konstrukci a výrobu forem. [2]</i> | 15 |
| <i>Obr. 4. Vylehčení výstřiku. [2]</i> | 20 |
| <i>Obr. 5. Typ písma zapuštěného a vystouplého. [2]</i> | 21 |
| <i>Obr. 6. Schéma vstřikovacího stroje. [20]</i> | 23 |
| <i>Obr. 7. Rozdělení konvenčních metod. [5]</i> | 25 |
| <i>Obr. 8. CNC frézka. [21]</i> | 29 |
| <i>Obr. 9. Pravidlo pravé ruky. [22]</i> | 30 |
| <i>Obr. 10. Schéma elektroerozivního obrábění. [14]</i> | 37 |
| <i>Obr. 11. Schéma stroje pro elektroerozivní obrábění. [14]</i> | 39 |
| <i>Obr. 12. Mechanismus vzniku výboje. [11]</i> | 40 |
| <i>Obr. 13. Složení povrchu opracované vrstvy. [14]</i> | 42 |
| <i>Obr. 14. Schéma řezání drátovou elektrodou. [14]</i> | 43 |
| <i>Obr. 15. Model vstřikovaného výrobku.</i> | 47 |
| <i>Obr. 16. Modely tvárníku a tvárnice</i> | 48 |
| <i>Obr. 17. Výkres tvárníku (převzat z Konform Plastic).</i> | 48 |
| <i>Obr. 18. Dráhy nástrojů při frézování tvárníku</i> | 50 |
| <i>Obr. 19. Tvárník po dokončovacím frézování</i> | 51 |
| <i>Obr. 20. Detail tvárníku po dokončovacím frézování</i> | 51 |
| <i>Obr. 21. Návrh modelu nástrojové elektrody pro žebra tvárníku</i> | 53 |
| <i>Obr. 22. Model nástrojové elektrody pro žebra tvárníku.</i> | 53 |
| <i>Obr. 23. Model nástrojové elektrody pro zácvaky v tvárníku</i> | 54 |
| <i>Obr. 24. Lepidlo pro připevnění grafitu.</i> | 55 |
| <i>Obr. 25. Verifikace frézování elektrody pro žebra, nástroj 6 r 0,5.</i> | 56 |
| <i>Obr. 26. Verifikace frézování elektrody pro žebra, nástroj 1 r 0,5.</i> | 56 |
| <i>Obr. 27. Výřez z programu pro frézování elektrod</i> | 58 |
| <i>Obr. 28. Frézovací centrum MAS MCV 500</i> | 58 |
| <i>Obr. 29. Nástroje pro frézování elektrody pro žebra.</i> | 59 |
| <i>Obr. 30. Nástroje pro frézování elektrody pro zácvaky</i> | 59 |
| <i>Obr. 31. Nástrojová elektroda k výrobě žebber na tvárníku.</i> | 59 |
| <i>Obr. 32. Elektroda k výrobě zácviku na tvárníku.</i> | 60 |

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 33. Nástrojová elektroda k výrobě žeber na tvárnici.</i> | 60 |
| <i>Obr. 34. Stroj pro EDM Agietron Advance.</i> | 62 |
| <i>Obr. 35. Vyrovnání tvárníků před EDM.</i> | 63 |
| <i>Obr. 36. Najíždění elektrod před EDM.</i> | 64 |
| <i>Obr. 37. Najíždění elektrod v ose Z před EDM.</i> | 65 |
| <i>Obr. 38. Pracovní prostor pro výběr vystředění dílce nebo elektrod.</i> | 65 |
| <i>Obr. 39. Pracovní prostor pro výběr planetování.</i> | 66 |
| <i>Obr. 40. Zadávání parametrů potřebných k EDM.</i> | 67 |
| <i>Obr. 41. Program procesu EDM.</i> | 68 |
| <i>Obr. 42. Kontrola zadaných souřadnic, elektroda pro žebra.</i> | 68 |
| <i>Obr. 43. Kontrola zadaných souřadnic, elektroda pro zácvaky.</i> | 69 |
| <i>Obr. 44. Pracovní plocha během EDM.</i> | 69 |
| <i>Obr. 45. Tvárniky obráběné v dielektriku.</i> | 70 |
| <i>Obr. 46. Tvárniky těsně po EDM.</i> | 71 |
| <i>Obr. 47. Opotřebovaná elektroda pro žebra.</i> | 71 |
| <i>Obr. 48. Grafický časový záznam EDM.</i> | 72 |
| <i>Obr. 49. Najíždění elektrody pro vtok.</i> | 73 |
| <i>Obr. 50. Elektroerozivní obrábění vtoku na tvárníku.</i> | 73 |
| <i>Obr. 51. Etalon pro drsnost povrchu.</i> | 74 |
| <i>Obr. 52. Dokončený tvárník po EDM.</i> | 74 |
| <i>Obr. 53. Detail na žebra tvárníku zhotovená EDM.</i> | 75 |
| <i>Obr. 54. Reálný vstříkovaný výrobek.</i> | 76 |
| <i>Obr. 55. Detail na žebra reálného vstříkovaného výrobku.</i> | 77 |
| <i>Obr. 56. Návrh zhotovení žeber frézováním.</i> | 78 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| <i>Tab. 1. Životnost forem [15]</i> | 18 |
| <i>Tab. 2. Doporučená velikost úkosů. [2]</i> | 21 |
| <i>Tab. 3. Rozdělení nekonvenčních metod obrábění dle energetického zdroje. [1], [5], [11]</i> | 32 |
| <i>Tab. 4. Záznam o elektrodách k frézování a pro EDM.</i> | 57 |