

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Programování NC strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tvorba technologie obrábění vstřikovací formy s využitím CAD/CAM
systému CATIA V5

Autor: **Milan HECHT**

Vedoucí práce: **Ing. Jan HNÁTÍK, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan HECHT**
Osobní číslo: **S11B0167K**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **Programování NC strojů**
Název tématu: **Tvorba technologie obrábění vstříkovací formy s využitím CAD/CAM systému Catia V5**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
 2. Rozbor současného stavu
 3. CAD/CAM systémy
 4. Tvorba technologických variant
 5. Porovnání technologických variant
 6. Závěr
-

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

JANDEČKA, K. Využití moderních CAD/CAM systémů při programování NC strojů. Plzeň : ZČU, 1996

JANDEČKA, K., ČESÁNEK, J., KOŽMÍN, P. Programování NC strojů. Plzeň : ZČU, 2000

RAJCHART, P., SOVA, F., ČESÁNEK, J., VYŠATA, J. Geometrické modelování a obrábění tvarově složitých součástí. Plzeň : ZČU, Grant GR 215, 1994

SOVA, F. Automatizace výrobních procesů I. Plzeň : VŠSE, 1986

VLACH, B. Technologie obrábění na číslicově řízených strojích. Praha : SNTL, 1978

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Hnátík, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Čapek**
PeHToo a.s.

Datum zadání bakalářské práce: **9. prosince 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **29. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Ing. Jan Rehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Hnátíkovi, Ph.D. za jeho maximální vstřícnost, připomínky a čas věnovaný mé bakalářské práci. Dále bych chtěl jmenovitě poděkovat konzultantům Ing. Martinu Čapkovi a Ing. Martinu Výškrabkovi za jejich cenné rady a předané zkušenosti z oblasti CAM programování. Dále bych také rád poděkoval ostatním zaměstnancům z fy. PeHToo, a.s. a bezesporu mé přítelkyni Veronice Fenclové a mé rodině za jejich morální podporu.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | | |
|----------------------|--|-----------------------|---------------------------------|--|
| AUTOR | Příjmení Hecht | Jméno Milan | | |
| STUDIJNÍ OBOR | B2341 „Programování NC strojů“ | | | |
| VEDOUCÍ PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Hnátík, Ph.D | Jméno Jan | | |
| PRACOVIŠTĚ | ZČU - FST - KTO | | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte | |
| NÁZEV PRÁCE | Tvorba technologie obrábění vstřikovací formy s využitím CAD/CAM systému Catia V5 | | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KTO | ROK ODEVZD. | 2012 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 39 | TEXTOVÁ ČÁST | 28 | GRAFICKÁ ČÁST | 11 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|---|---|
| <p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p> | <p>Cílem bakalářské práce je tvorba dvou variantních technologií obrábění dílce vstřikovací formy v zadaném CAD/CAM systému CATIA V5. Tyto technologie budou porovnány a nejvhodnější vybrána. V teoretické části je obecně shrnuta terminologie týkající se vstřikovacích forem. Dále jsou zde obecně popsány technologie a strategie obrábění používané k výrobě tvarových ploch vstřikovacích forem.</p> |
| <p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p> | <p style="text-align: center;">CAD/CAM , CATIA V5, vstřikování, plasty, frézovací strategie, technologie obrábění</p> |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | | |
|--------------------------|--|-----------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Hecht | Name Milan | |
| FIELD OF STUDY | B2341 „Programming od NC Machines“ | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hnátík, Ph.D | Name Jan | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KTO | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Creation of machining technology of injection molds with using CAD/CAM system Catia V5 | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KTO | SUBMITTED IN | 2012 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 39 | TEXT PART | 28 | GRAPHICAL PART | 11 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The aim of my bachelor thesis is the creation of two technology of machining injection form in CAD/CAM system Catia V5. These technologies will be compared and the best one will be chosen. In the part of theory there is in general summarized terminology about injection form. There will be also described the technologies and strategies of machining which are used to production of shaped area of injection molds. |
| KEY WORDS | CAD/CAM, CATIA V5, CNC, injection, plastics, milling strategy, machining technology |

Obsah

| | |
|---|---------------|
| 1 Úvod | - 1 - |
| 2 Rozbor současného stavu | - 2 - |
| 2.1 Představení firmy PeHToo, a.s. | - 2 - |
| 2.1.1 Nástrojárna PeHToo, a.s. | - 2 - |
| 2.2 Vstřikování plastů | - 3 - |
| 2.2.1 Proces vstřikování | - 3 - |
| 2.3 Vstřikovací forma | - 4 - |
| 2.4 Metody obrábění při výrobě forem | - 5 - |
| 2.5 Konvenční metody | - 5 - |
| 2.5.1 Frézování a strategie obrábění tvarových ploch | - 6 - |
| 2.5.2 Víceosé frézování | - 8 - |
| 2.5.3 Mikrofrézování | - 9 - |
| 2.6 Nekonvenční metody | - 10 - |
| 2.6.1 Elektroerozivní obrábění (EDM) | - 10 - |
| 2.7 Programování NC strojů | - 12 - |
| 3 CAD/CAM systémy | - 12 - |
| 3.1 Obecný popis CAD/CAM systémů | - 12 - |
| 3.2 Struktura CAD/CAM systémů | - 13 - |
| 3.3 Rozdělení CAD/CAM systémů | - 14 - |
| 3.4 CATIA V5 | - 15 - |
| 4 Tvorba technologických variant | - 16 - |
| 4.1 Popis součásti a zvolení strojů a nástrojů | - 16 - |
| 4.1.1 Charakteristika součásti | - 16 - |
| 4.1.2 Volba nástrojů | - 16 - |
| 4.1.3 Stanovení řezných podmínek | - 17 - |
| 4.1.4 Volba polotovaru | - 17 - |
| 4.1.5 Volba strojů | - 17 - |
| 4.2 Obecný postup tvorby technologie v NC modulu CATIA V5 | - 18 - |
| 4.2.1 Ukázka nastavení cyklu v prostředí NC modulu CATIA | - 19 - |
| 4.3 Technologická varianta č. 1 | - 20 - |
| 4.3.1 Obrábění tvaru před kalením | - 21 - |
| 4.3.2 Obrábění tvaru po kalení | - 22 - |
| 4.3.3 Výroba elektrod | - 25 - |
| 4.3.4 Dokončovací obrábění tvaru elektrodami | - 28 - |
| 4.4 Technologická varianta č.2 | - 29 - |
| 4.4.1 Obrábění tvaru po kalení | - 29 - |
| 5 Porovnání technologických variant | - 33 - |
| 5.1 Varianta č. 1 | - 34 - |
| 5.1.1 Výroba elektrod | - 34 - |
| 5.1.2 Frézování po kalení | - 35 - |
| 5.1.3 Elektroerozivní hloubení | - 35 - |
| 5.1.4 Náklady na nástroje první varianty | - 36 - |
| 5.2 Varianta č. 2 | - 36 - |
| 5.2.1 Frézování po kalení | - 36 - |

| | | |
|----------|--|---------------|
| 5.2.2 | Náklady na nástroje druhé varianty | - 37 - |
| 5.3 | Technicko-ekonomické hodnocení | - 37 - |
| 6 | Závěr | - 39 - |
| | Seznam obrázků | - 41 - |
| | Seznam tabulek..... | - 42 - |
| | Přílohy | - 43 - |

Přehled použitých zkratk a symbolů

ŘS - řídicí systém

NC (Numerical Control) - číslicové řízení

CNC (Computer Numerical Control) - počítačové číslicové řízení

DNC (Direct Numerical Control) - přímé číslicové řízení

EDM (Electrical Discharge Machining) - obrábění elektrickým výbojem

HSC (High Speed Cuting) - vysokorychlostní obrábění

CAD (Computer Aided Design) - počítačem podporované navrhování

CAM (Computer Aided Manufacturing) - počítačem podporovaná výroba

3D (Three Dimensional)- tří dimenzionální (prostorový)

PLM (Product Lifecycle Management) - systém správy a řízení veškeré dokumentace výrobku, po dobu jeho životnosti

TPV - Technologická příprava výroby

CL data (Cutting Location Data) - data koncových poloh pohybu nástroje

APT data - forma CL dat podobná APT

ISO (International Organisation for Standartization)-mezinárodní organizace pro standardy

2D - dvou dimenzionální (rovinný)

3D - třídímenzionální (prostorový)

STEP (Standard for the Exchange of Product model data) - normalizovaný formát pro přenos dat

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) - formát pro přenos dat

PHT - zkratka firmy PeHToo, a.s.

v_c [m/min] řezná rychlost

n [min^{-1}] otáčky

f_z [mm] posuv na zub

v_f [mm/min] posuv za minutu

a_p [mm] axiální přísuv - hloubka úběru materiálu

D [mm] průměr nástroje

1 Úvod

Vstřikování plastů v současné době představuje jednu z nejrozšířenějších metod zpracování plastů. Stejně jako každá technologie, i vstřikování sebou přináší jisté výhody a nevýhody. Mezi přednosti patří široká využitelnost této technologie, při které lze zpracovat většinu druhů plastů. Finální výrobky se vyznačují vysokou kvalitou, přesností a jejich zhotovení trvá krátkou dobu. Využití tedy tato technologie nachází především v sériové výrobě. Nevýhodu ovšem představují vysoké investiční náklady na výrobu nástroje - vstřikovací formy. Proces výroby nástroje je zdoluhavý a náročný, proto je nutné zvolit z hlediska ekonomických aspektů vhodnou technologii výroby.

Jak již bylo řečeno, nedílnou součástí procesu výroby plastových produktů pomocí vstřikování plastů představuje i výroba vstřikovací formy. Cílem této bakalářské práce je proto tvorba technologie obrábění tvarové části vstřikovací formy (čelisti), resp. vypracování dvou variantních technologií a jejich následné srovnání a zhodnocení. K jejich tvorbě je použit CAD/CAM systém CATIA V5 R20, jež využívá i firma PeHToo a.s, v rámci které byla tato bakalářská práce zpracovávána, a jež poskytla důležité podklady a informace potřebné pro vypracování této práce.

Práce je rozdělena do 4 hlavních kapitol. První kapitola se zabývá teoretickým vymezením termínů vztahujících se k problematice vstřikování. Dále přibližuje metody obrábění při výrobě forem, a to jak konvenční (frézování), tak nekonvenční (elektroerozivní obrábění). Další kapitola se věnuje CAD/CAM systémům, jejich členěním a struktuře, přičemž zvýšená pozornost je zaměřena na CAD/CAM systém CATIA V5. Praktická část v podobě jednotlivých variantních technologií je obsahem kapitoly č. 4, ve které jsou popsány navržené kroky při obrábění tvarové části vstřikovací formy. Poslední kapitola se věnuje technicko-ekonomickému rozboru obou navržených variant.

2 Rozbor současného stavu

V této kapitole budou představeny konvenční i nekonvenční metody používané při výrobě vstřikovacích forem a taktéž zde budou vysvětleny základní termíny vztahující se k tématu vstřikování plastů. Dále zde bude představena firma, která poskytla data ke zpracování této bakalářské práce.

2.1 Představení firmy PeHToo, a.s.

Společnost PeHToo je podnik sídlící v Horšovském Týně s více než 45letou zkušeností s výrobou technických výlisků z plastů. Za léta své existence prošla společnost mnoha změnami jak v názvu, tak i struktuře. Současným generálním ředitelem je Ing. Luis Odermann. Z původních cca. 400 zákazníků došlo k redukci, která umožnila nabídnout vybraným partnerům komplexní servis. Ten zajišťuje samotnou výrobu nástroje včetně jeho údržby až po finální plastový výlisek doručený vlastní logistickou sítí po celém světě přímo k zákazníkovi. V současnosti má firma kolem 450-ti zaměstnanců a mezi přední zákazníky patří zejména společnosti z oblasti automotive: VW, Škoda, Valeo, Sika, Adis, ale i Daikin, aj. [6]



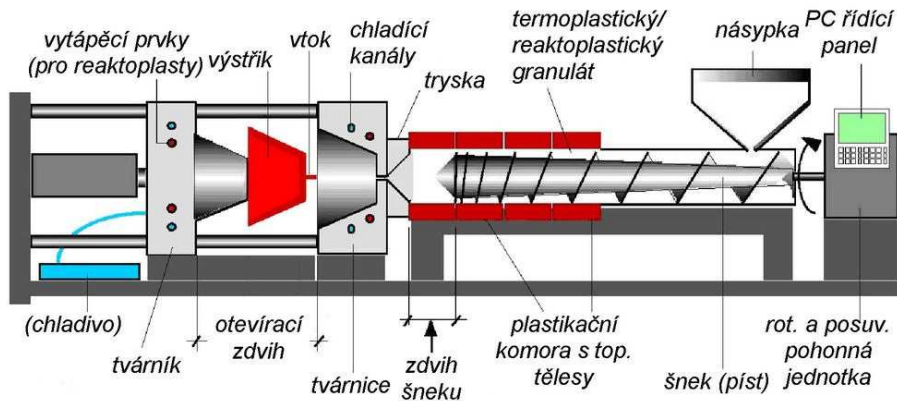
Obr. 1 Firemní logo (vlevo), pohled na nástrojárnu (vpravo) [6]

2.1.1 Nástrojárna PeHToo, a.s.

Roku 2008 firma investovala do zřízení nové nástrojárny (obr.1), která disponuje výrobní plochou o rozměrech 1400 m². V nástrojárně pracuje cca. 50 kvalifikovaných zaměstnanců vedených Ing. Lubošem Trkovským, kteří zabezpečují výrobu ve dvousměnném provozu (obsluha CNC strojů i v třísměnném provozu). Strojní park disponuje konvenčními i nekonvenčními technologiemi zabezpečující výrobu forem od hmotnosti 5kg až do hmotnosti 15 tun s vysokou přesností a kvalitou. Hlavní systém používaný k tvorbě a modifikaci dat 3D modelů je CATIA V5. Ten zabezpečuje spolu s firemní sítí a DNC serverem rychlou a pružnou formu přenosu dat z oddělení konstrukce, přes oddělení TPV až k obsluze stroje skrze vygenerovaný NC program CAM programátorem. CAD/CAM systém CATIA V5, ve kterém je zpracována i praktická část bakalářské práce, bude blíže popsán ve 3. kapitole.

2.2 Vstřikování plastů

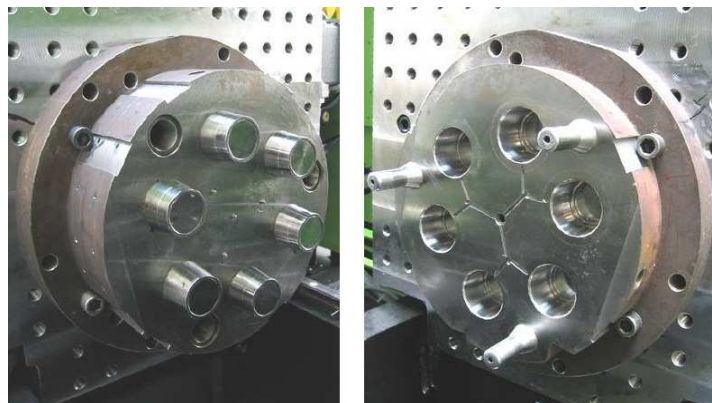
Vstřikováním se vyrábějí takové výrobky, které mají buď charakter konečného výrobku, nebo jsou polotovary nebo díly pro další zkompletování. Vstřikování je nejrozšířenější technologií na zpracování plastů, se kterou lze zpracovat téměř všechny druhy termoplastů. V omezené míře se vstřikují i některé reaktoplasty a kaučuky. Na obr. 2 je názorná ukázka vstřikovacího stroje. [7]



Obr. 2 Schéma vstřikovacího stroje [7]

2.2.1 Proces vstřikování

Vstřikování je způsob tváření plastů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu z pomocné tlakové (plastifikační) komory vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy skládající se z tvárníku (pohyblivá část formy) a tvárnice (pevná část formy) (viz obr. 3), kde ztuhne ve finální výrobek. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje (viz obr. 2) a zásoba vstřikovaného materiálu se v ní stále během cyklu doplňuje. Výhodou vstřikování je krátký čas cyklu se schopností vyrábět složité součásti s požadovanými tolerancemi rozměrů a s velmi dobrou povrchovou úpravou. Další výhodou je konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů jsou vysoké investiční náklady, dlouhé doby nutné pro výrobu forem a potřeba použití strojního zařízení, které je neúměrně velké v porovnání s finálním výrobkem. [7]



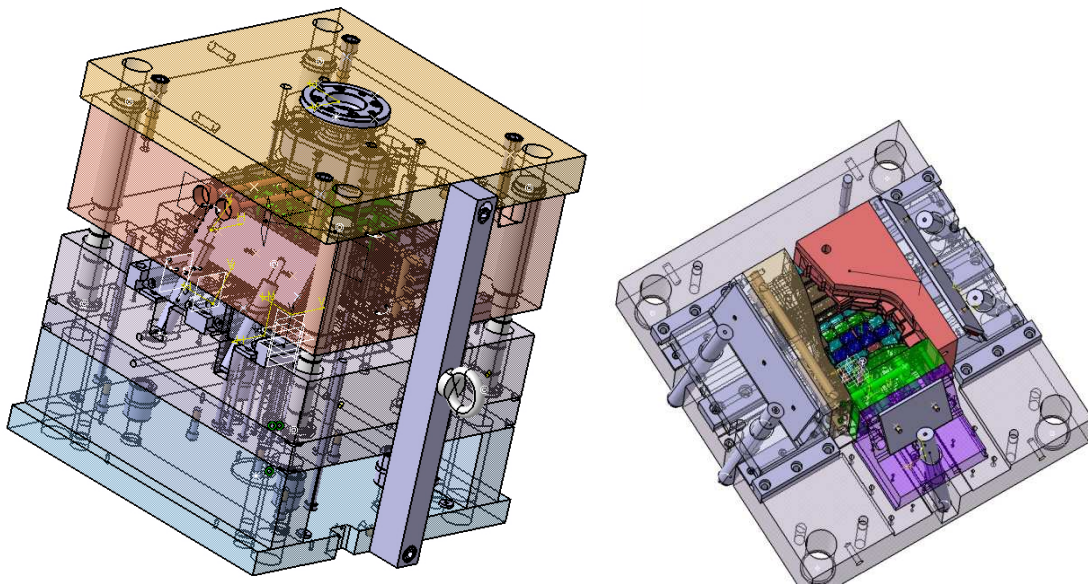
Obr. 3 Ukázka tvarových částí formy - tvárník (vlevo), tvárnice (vpravo) [7]

2.3 Vstřikovací forma

Vstřikovací forma je nástroj, s jehož použitím na speciálním vstřikovacím stroji vznikne výrobek z plastické hmoty. Vstřikovací formy používané v dnešní době jsou technicky poměrně značně komplikovaná zařízení, na které jsou kladeny nemalé nároky z hlediska kvality, produktivity, spolehlivosti a automatizace výroby. Proto v dalším textu budou z metodických důvodů rozděleny vstřikovací formy na dvě oblasti. [8]

První oblastí, jak již bylo naznačeno v předchozí podkapitole, je tvarová dutina. Ta představuje prostor, kam je na vstřikovacím stroji za vysoké teploty a tlaku vtlačena plastová tavenina, která po ztuhnutí v dutině získá tvar finálního výrobku. Konstrukční řešení dutiny bývají velmi rozmanitá a kromě několika málo pravidel technologičnosti konstrukce se tvar řídí především funkčními, tvarovými a vzhledovými požadavky na plastový výrobek. [8]

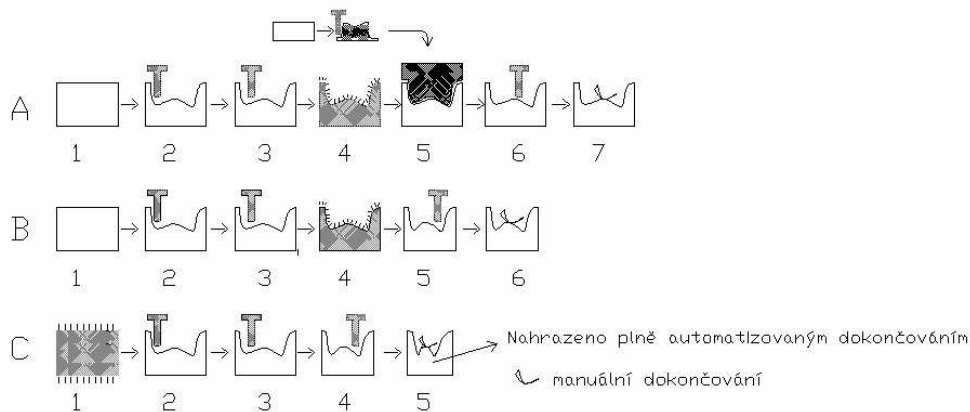
Druhou oblastí je vlastní konstrukční stavba nástroje, která ve většině případů vykazuje značné prvky podobnosti. Převážná většina forem se dnes sestavuje z nějakého stavebnicového systému standardních komponent, které jsou na trhu. Konstrukční stavba takovýchto forem se skládá ze skupiny paralelních desek s různou funkcí a z řady dalších v nich vložených nebo k nim připojených součástí, jako jsou vodící sloupky a pouzdra, spojovací součásti, vtokový, chladicí a vyhazovací systém, apod. Stavebnice se používají zejména proto, že díky nim není nutno vyvíjet a vyrábět každou jednotlivou součást formy, a navíc se jedná o velmi profesionálně promyšlené systémy optimálně splňující řadu funkčních požadavků. [8]



Obr. 4 Sestava vstřikovací formy (vpravo), segmenty tvořící vstřikovací dutinu formy (vlevo)

2.4 Metody obrábění při výrobě forem

Obecně lze způsoby technologie obrábění rozdělit na dvě skupiny a to na konvenční a nekonvenční. V dnešní době lze k výrobě tvarových dílců vstřikovacích forem využít širokého spektra NC strojů, nástrojů a metod. Při volbě technologie výroby je nutné zahrnout nároky geometrické a tvarové přesnosti zhotovovaných ploch, včetně jejich drsností a schopnost jejich dosažení s vybranou metodou. Nejvíce je při výrobě forem upřednostňována konvenční metoda frézování oproti metodám nekonvenčním (např. elektroeroze), které potřebují větší množství energie na úběr stejného množství materiálu, což vede k nižší efektivitě. V případě nepřístupnosti některých oblastí, výskytu ostrých vnitřních hran nebo v důsledku špatné obrobitelnosti materiálu lze použít nekonvenční metody (více viz kapitola 2.6). Na obr. 5 jsou zobrazeny technologické možnosti výroby forem a zápustek. [5]



Obr. 5 Výroba forem a zápustek [5]

- A) **Tradiční proces:** (1) Nevytvrzená forma, (2) hrubování, (3) předdokončení, (4) kalení na požadovanou tvrdost, (5) elektroerozivní proces, (6) elektrodové obrábění malých rádiusů a rohů, dokončování v místech s dobrou přístupností, (7) ruční dokončení nepřístupných míst;
- B) Stejný průběh jako A), ale vyjiskřování (5) je nahrazeno dokončovacím frézováním v režimu HSC (vysokorychlostní obrábění), **úspora jednoho kroku**;
- C) (1) Polotovár je zakalený na požadovanou tvrdost, (2) hrubování, (3) předdokončení, (4) dokončení, **úspora dvou kroků** - úspora času oproti A) činí 30-50%. [5]

2.5 Konvenční metody

Při konvenčním obrábění se odebírá materiál ze základního kusu břitem řezného nástroje ve formě třísek.

Mezi konvenční metody patří:

- frézování,
- soustružení,
- vrtání.

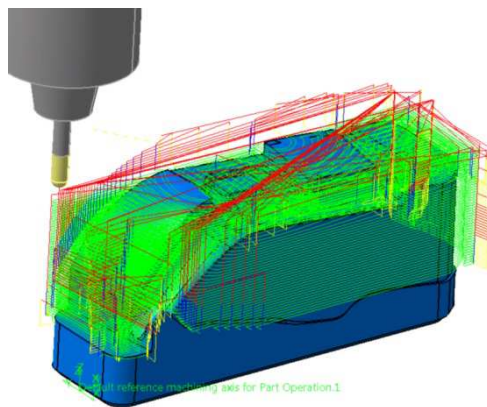
V následujících podkapitolách věnuji rozbor frézování, neboť je stěžejní v praktické části.

2.5.1 Frézování a strategie obrábění tvarových ploch

Frézování je strojní třískové obrábění kovů vícebřítým nástrojem, kde hlavní pohyb (rotační) koná nástroj (fréza) a vedlejší pohyb (přísmuv, posuv) obrobek. V některých případech, např. při obrábění velkých forem, koná vedlejší pohyb nástroj okolo stojícího těžkého obrobku - záleží na kinematice obráběcího stroje. Frézovací stroj se nazývá frézka. Frézování probíhá standardně ve třech osách. Při použití více os obrábění mluvíme o CNC frézovacích centrech, které zatlačují klasické frézky do pozadí. Frézování se vyvíjí ve stále univerzálnější metodu, která se ve spojení s moderními stroji a nástroji stává extrémně výkonnou a tím i samotné obrábění více hospodárným. [5,9]

Frézování je děleno podle smyslu otáčení nástroje vůči směru posuvu obrobku na sousledné a nesousledné. Při nesousledném koná obrobek posuv proti směru otáčení nástroje, průřez třísky se postupně rozšiřuje od nuly do maxima, což má negativní vliv na životnost nástroje a na jakost obrobeného povrchu. Při sousledném má směr posuvu a hlavní řezný pohyb stejný směr, nástroj dosahuje vyšší životnosti a jakost povrchu je též lepší než u nesousledného. [5,9]

Frézování je také možné rozdělit podle druhu technologické operace na hrubovací, předdokončovací a dokončovací (obrábění načisto). Při obrábění složitých tvarových ploch, má podstatný vliv na kvalitu obrobení povrchu nejen sled technologických operací, použitý stroj a nástroj, ale hlavně záleží na technické úrovni CAM systému, s jehož funkcemi je dráha nástroje vypočítána. Pro opracování velmi složitých ploch, např. u vstřikovacích forem je důležité, aby CAM systém obsahoval funkce k doobrobení zbytkového materiálu, což je dnes jejich běžnou součástí. Nyní přiblížíme frézovací strategie. [5,9]



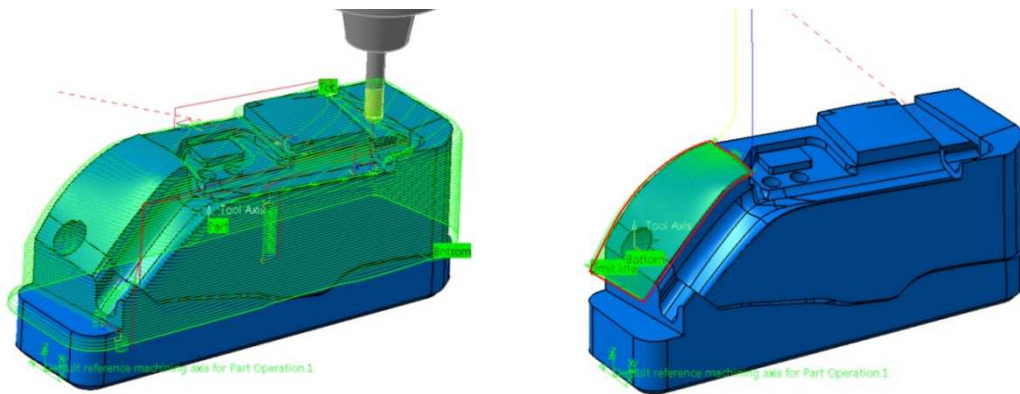
Obr. 6 Hrubování

• HRUBOVÁNÍ

Cílem hrubování (obr.6) je hospodárně a co nejrychleji odstranit co největší objem materiálu a přiblížit se co nejlíže ke kontuře. Tím můžeme v některých případech upustit od předdokončovacích operací, které nám zvyšují strojní čas obrábění. Hrubování je nejčastěji prováděno pomocí frézovacích hlav s VBD. Nejlepší přiblížení k finální kontuře se dosáhne pomocí nástroje se zaobleným tvarem břitu. Nepostradatelným předpokladem při frézování ocelí je kontinuální a sousledný záběr břitu frézy. Směr jednotlivých drah by měl být orientován tak, aby nedocházelo k prudkému a krátkému stoupání či klesání.[5,9]

Při obrábění se také nejvíce osvědčilo tzv. spirálové kapsování, při kterém je kontura zhotovována po spirálových drahách umožňující dodržení rovnoměrných záběrových podmínek. Odebírá-li se materiál v rozích, je nutné kromě výběru frézovací strategie optimalizovat najetí břitu do řezu. U otevřených kontur závisí úspěch najetí na optimálním poloměru přiblížení. U uzavřených kontur se nejčastěji využívá tzv. plochého najetí při sníženém posuvu. Další hrubovací strategií je tzv. zapouštěcí (ponorné) frézování, které eliminuje, nebo snižuje nevýhody tuhosti nástroje s nutným velkým vyložení. Tuhost celého stroje je vždy největší ve směru tlaku do vřetene, proto je tato strategie vhodná k obrábění hlubokých dutin a přímých či úkosových stěn. [5,9]

Nejmodernější hrubovací strategií je tzv. adaptivní frézování. Způsob výpočtu drah je dán vstupními omezujícími podmínkami, které nesmí být během výpočtu drah překročeny. Výsledkem je konstantní zatížení nástroje během celého procesu hrubování, což vede k podstatnému snížení strojního času (až o 40%) a tím podstatnému zvýšení produktivity. Výkonnost (efektivnost) adaptivního frézování je dána výpočtovým aparátem daného CAM systému.[5,9]



Obr. 7 Dokončovací strategie

- **DOKONČOVÁNÍ (obrábění načisto)**

Obrábění načisto je používáno k dokončení požadovaného tvaru plochy. Bylo vyvinuto velké množství frézovacích strategií, jež jsou voleny dle topografie příslušné tvarové plochy. Nejprve mohou být obrobena vrstevnicovým způsobem přechodové plochy a plochy navazující od nich směrem nahoru. Při tom mohou být obráběny i překrývající plochy ve směru vrstevnic, čímž jsou zachovány kontinuální dráhy nástroje bez extrémních změn směru a s konstantními záběrovými podmínkami. Pro samostatné plochy nebo soubory ploch, jejichž sklon je malý či nulový, je výhodnější použít spirálové frézování, které též zachovává konstantní záběrové podmínky. Stejně jako u hrubování i zde je nutné zamezit prudkým změnám směru pohybu nástroje a záběrových podmínek i tzv. mrtvým bodům - tj. bod, kde má nástroj nulovou řeznou rychlost.[5,9]

Při obrábění problematických oblastí (např. vnitřních rohy, úzké a hluboké dutiny) jsou zapotřebí speciální NC funkce. Pro obrábění rohů se žlábkování nabízí jako technologicky optimální způsob vedení pohybu nástroje, přičemž jsou zanechány přídatky ve směru daných

koutů, resp. ve směru pohybu nástroje. Pro obrábění šikmých ploch je vhodné využít co největší řezné rychlosti na nástroji, kterou lze dosáhnout správnou orientací směru pohybu nástroje vůči sklonu obráběné plochy. Proto je nutné programovat pohyb nástroje tak, aby maximální tloušťka odebírané vrstvy byla odebírána částí nástroje, která je vůči ose nástroje na co největším průměru. Těmto problémům lze dnes předcházet použitím pětiosého řízení nakláněním nástroje - tzv. vlečení. Tím je možné se u kulových fréz vyhnout jejich slabému místu - středu s nulovou řeznou rychlostí.[5,9]

2.5.2 Víceosé frézování

Tuto technologii je vhodné zmínit, neboť je významným pomocníkem při dokončování složitých tvarových ploch. Při klasickém tříosém obrábění tvarové plochy je interpolace realizována pouze třemi lineárními pohyby v osách X, Y, Z. Při dokončovacím obrábění kulovou či kuželovou frézou je v ose nástroje nulová řezná rychlost, což v místě řezu činí značné potíže (nadměrné opotřebení nástroje vlivem tření) a ovlivňuje stabilitu celého řezného procesu. Vzniklá negativa lze eliminovat víceosým frézováním a to naklácením nástroje do čtvrté (případně páté) osy. Optimální náklon z hlediska opotřebení břitu, spolehlivosti procesu a kvality opracování povrchu je přibližně 10-20° do směru posuvu (při sousledném frézování). Jedná o tzv. strategii vlečení nástroje.[5,9]

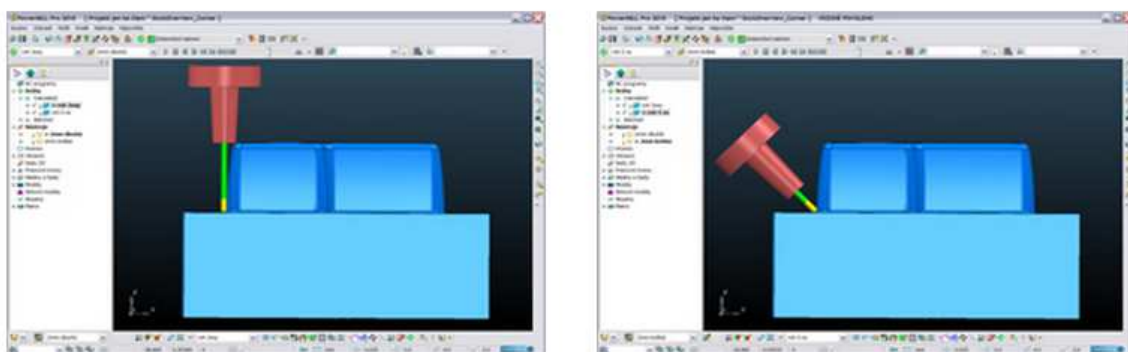
Víceosé (5D) frézování lze dělit podle způsobu řízení os na souvislé frézování a polohování (indexace os).

- **POLOHOVÁNÍ**

O polohování, nebo tzv. 3+2 osém frézování mluvíme tehdy, jsou-li k základním třem současně řízeným lineárním osám (X, Y, Z) přidány další dvě rotační osy (A, B). Tyto osy umožní natočení nástroje vůči obrobku do určité polohy, ve které se zafixuje, a zde pak probíhá klasické tříosé frézování. Tento způsob tedy umožní pohybovat buďto pouze lineární osou, nebo osou rotační (nelze konat oba pohyby naráz).

- **SOUVISLÉ FRÉZOVÁNÍ**

Obrábění se provádí pomocí souvisle (kontinuálně) řízených pěti os, což umožňuje současný pohyb lineárních i rotačních os. K naprogramování drah nástroje po ploše je nutné použít CAM systém. Podle kinematiky stroje získáváme v NC programu kromě lineárních os X, Y, Z ještě rotační osy A, B, C. Celé obrábění probíhá v jedné pracovní rovině, bez ohledu na naklopení rotačních os.

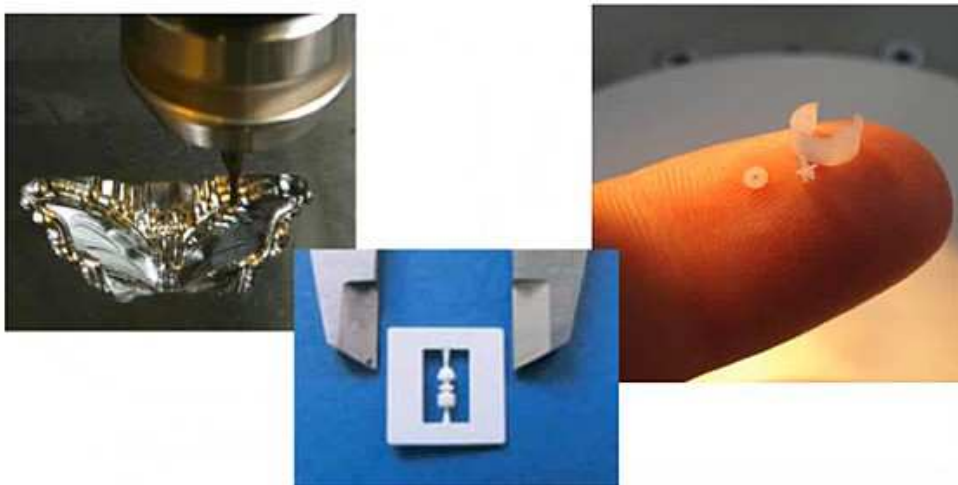


Obr. 8 Výhoda obrobění tvaru víceosým frézováním (vpravo) oproti klasickému (vlevo) [10]

Díky 5osému souvislému obrábění je možno obrábět tvary, které jsou v podkosu (nelze je obrobit ve 3osách), bez nutnosti měnit upnutí obrobku v obráběcím stroji nebo měnit nulový bod obrábění. Osa nástroje se plynule může měnit tak, aby se vždy dosáhlo obrobení celého tvaru při zachování požadované kvality povrchu. Díky naklopení nástroje lze zkrátit jeho vyložení, což vede k lepší kvalitě opracování povrchu, snížení řezných sil a prodloužení životnosti nástroje. [10]

2.5.3 Mikrofrézování

Pojem mikrofrézování patří do skupiny třískového obrábění frézami o velmi malém průměru používané převážně k dokončovacím obrábění složitých tvarových ploch. Obrábění frézami do průměru 1mm je dnes při výrobě forem standardem. Mikrofrézováním se nazývá obrábění nástrojem od průměru 0,03mm až 1,5mm. Pro efektivní obrábění dosahují otáčky nástroje vysokých hodnot od 32 000 min^{-1} až 160 000 min^{-1} (záleží na průměru použitého nástroje). Nezáleží ovšem pouze na vybavení obráběcích strojů vysokootáčkovým vřetenem. Dalším předpokladem pro efektivitu technologie je co nejmenší nutné vyložení nástroje kvůli tuhosti, kontrola házivosti, opotřebení nástroje, intenzivní vyfukování třísek z místa řezu a v neposlední řadě použití kvalitního CAM systému k naprogramování přesných drah vedení nástroje po ploše, vč. podpory víceosého frézování [11,12]



Obr. 9 Ukázka mikrofrézování [12]

Při porovnání s elektroerozivním dokončováním tvarů nese mikrofrézování řadu výhod. Hlavní výhodou je podstatné snížení nákladů na výrobu jednoduchých až středně těžkých forem, neboť odpadají operace nutné k dokončování tvaru jiskřením (tj. modelování elektrody a výroba elektrody, náklady na jiskření a obrábění na jedno upnutí - eliminace vzniku chyb přeupínáním na více strojů). Mezi další výhody patří možnost dokončování tvarů v kalené oceli, ale i v nevodivých nebo špatně vodivých materiálech, jež nejdu jiskřit. Nevýhodou je maximální dosažitelná hloubka 20-25 D nástroje (např. při obrábění žeber). [11,12]

2.6 Nekonvenční metody

Opodstatněné použití nekonvenčních technologií je tam, kde z hlediska technického či ekonomického nelze použít metody konvenční. Nekonvenční technologie jsou založeny na využití fyzikálního nebo chemického principu úběru materiálu. Jedná se převážně o bezsilové působení na obráběný materiál, bez tvoření klasických třísek vznikajících při obrábění řeznými nástroji (konvenční metoda). Dle principu úběru materiálu se metody dělí na:

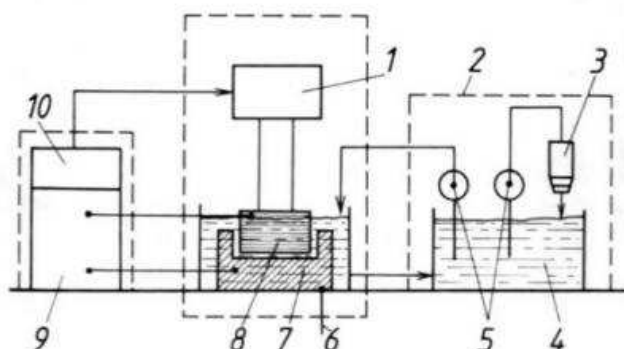
- elektroerozivní obrábění (EDM),
- elektrochemické a chemické obrábění,
- obrábění paprskem koncentrované energie (např. obrábění laserem, plasmou),
- mechanické procesy obrábění (např. obrábění ultrazvukem).

Z výše uvedených metod bude v následující podkapitole přiblíženo pouze elektroerozivní obrábění, jenž je také použito v praktické části BP.[5,13]

2.6.1 Elektroerozivní obrábění (EDM)

Elektroerozivní obrábění se používá pro: hloubení dutin zápusťek a forem, výrobu složitých tvarových povrchů, řezání drátovou elektrodou, výrobu malých otvorů (mikro-děrování). Základem úběru materiálu je elektroeroze, kdy vlivem vysoké koncentrace energie materiál taje a odpařuje se. Princip metody spočívá v úběru materiálu, který se dosahuje elektrickými výboji mezi anodou (nejčastěji ji tvoří nástrojová elektroda) a katodou (nejčastěji tvořenou obrobkem) ponořenými do dielektrika (kapalina s vysokým elektrickým odporem). Při vzájemném přiblížení obrobku a nástroje (elektrody), na kterou je přivedeno elektrické napětí, dochází k elektrickému výboji. Tím dochází k roztavení mikroskopických částec materiálu obrobku a jejich následnému odstranění (vyplavením) z prostoru obrábění. Výsledkem je dělení nebo opracování obrobku do požadovaného tvaru či rozměru. [5,13]

Výhodou této metody je použití v případech, kde všechny ostatní výrobní metody selhávají (tj. obrábění složitých tvarů, těžkoobrobitelné materiály) a zároveň se elektroerozí dosahuje velmi přených rozměrů. Pro dosažení požadované kvality není důležitá tvrdost materiálu, ale naopak vodivost a teplota tavení materiálu. Touto metodou lze dosáhnout přesnosti obrábění v řádu tisícín milimetru, drsnosti povrchu Ra 0,8 a nahradit tak operaci broušení v místech, kde to není technologicky jinak možné. Dalším kladem metody je řízení všech EDM strojů ve čtyřech osách (X, Y, Z, C), což umožňuje obrábět snadněji mnoho složitých tvarů jinak obtížně zhotovitelných konvenčními metodami. [5,13]



Popis schématu stroje (obr10):

- 1 - pracovní hlava, 2 - filtrační zařízení, 3 - filtr, 4 - dielektrikum,
- 5 - čerpadlo, 6 - pracovní stůl,
- 7 - obrobek, 8- nástrojová elektroda,
- 9 - generátor, 10 - CNC řídicí systém

Obr. 10 Schéma EDM hloubícího stroje [13]

Hlobení je z nekonvenčních metod nejvíce používanou technologií k výrobě složitých tvarových ploch u forem a dutin zápuštěk. Současné stroje principu EDM jsou řízeny CNC řídicím systémem, jenž umožňuje snadné naprogramování stroje, zabezpečuje bezobslužný provoz stroje a řídí veškeré jeho funkce (např. řízení směru a rychlosti pohybů, pracovní parametry generátoru, přívod dielektrika, rychlost přísuvu elektrody a zejména kontrolu probíhající elektroeroze). Celý proces lze simulovat na ovládacím panelu stroje. Jednotlivé technologické operace (např. hrubování, dokončování) vyžadují různé formy elektrických výbojů, které jsou na nástrojovou elektrodu a obrobek přiváděny generátorem ve formě pulzů o určité frekvenci. Každý pulz je charakterizován napětím, proudem a tvarem.[5,13]

Jak již bylo řečeno, pro zhotovení požadovaného tvaru se u EDM hlobení používá CNC ŘS a jako nástroj - **elektroda** (obr.11). K výrobě elektrod se používá vodivý materiál, nejčastěji grafit, měď, či jejich kombinace. Tvar elektrody je negativním tvarem od zhotovovaného tvaru. Pro každou jiskřenou pozici formy se konstruuje každá elektroda zvlášť a liší se svou velikostí, tvarem a technologickým požadavkem obráběné plochy (jakostí povrchu). Při vlastním procesu hlobení dochází k postupnému objemovému opotřebení elektrody, proto je při výrobě elektrody důležité nejen stanovení celkového počtu elektrod nutných k výrobě požadovaného tvaru, ale zejména stanovení tzv. "podrozměru" elektrody, tj. rozměr, o který se musí ponížít celkový tvar elektrody. Velikost tohoto podrozměru určuje velikost pracovní mezery mezi obrobkem a elektrodou, jenž má spolu s nastavením generátoru přímý vliv na rychlost úběru materiálu.[13]



Obr. 11 Ukázka značení elektrody (vlevo), (vpravo) pohled upínací systém 3R

2.7 Programování NC strojů

NC program lze vytvořit třemi způsoby:

- **Ruční programování** - je nejstarším způsobem programování a používá se pro výrobu jednoduchých součástí. Programuje se v příslušném programovacím kódu (ISO kódu) přímo z výrobního výkresu. Tento způsob je velice zdlouhavý, náročný na výpočet a náchylnější na vznik chyb a následných kolizí.
- **Díleenské programování** - provádí se přímo na CNC stroji v tzv. dialogovém okně daného řídicího systému. Výhoda oproti předchozímu způsobu spočívá v rychlejší tvorbě NC programu, neboť lze využít předdefinované programovací cykly (kapsování, vrtací) a jiné dodávané funkce. Většinou výrobci používají vlastní programovací jazyk (např. Haidenhain - Dialog, Siemens - Shopmill), ale samozřejmě je podpora standardního ISO kódu (G-kódu). Tento druh programování není taktéž vhodný k programování složitých tvarů.
- **Automatické programování** - NC program je vytvářen na počítači v tzv. CAM systému. Tyto systémy byly účelně vyvinuty pro usnadnění práce programátora, jako pomocník při obrobění složitých tvarů. Funkce CAM systémů se stále vyvíjí a umožňují tak čím dál tím jednodušší a rychlejší tvorbu NC programů. Dnes již standardně obsahují prvky kontroly proti kolizím nástroje s obrobkem či strojem vč. simulace procesu obrábění pro jasný přehled úběru materiálu.

3 CAD/CAM systémy

V dnešní době plné technologických pokroků jak ve strojírenství, tak v informačních technologiích, si jen málokterá firma (výrobně orientovaná) dokáže představit svoji pozici na trhu bez použití CNC strojů a jejich naprogramování skrze NC kódy generované z CAM systému. Kvůli stále se zvyšujícímu výskytu tvarově složitých součástí, nárokům na kvalitu opracování a rychlost jejich výroby (potažmo na ekonomickou efektivitu výroby) je nasazení CAD/CAM systémů přímo nutností. Proto se mnoho firem po celém světě zabývá vytvářením a vylepšováním modulů CAD/CAM systémů, aby co nejvíce vyhovovaly různorodým požadavkům ze stran uživatelů. Nejvyšším možným řešením počítačové podpory veškerých procesů spojených s výrobkem je tzv. PLM (Product Lifecycle Management), který vzájemně propojuje více CAx systémů (vč. CAD, CAM) a tím umožňuje digitální transformaci výrobku v celém jeho životním cyklu. Mezi tyto systémy lze zařadit např.: CATIA, NX, Pro/Engineer.

3.1 Obecný popis CAD/CAM systémů

- CAD - Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování a konstrukce)
- CAM - Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba, resp. řízení a automatizace výroby strojů)

CAD/CAM je komplexní multifunkční systém zahrnující aplikace z CAD i CAM, které zapadají do skupiny tzv. CA systémů (technologií). Aplikací jednotlivých modulů CAD/CAM systému se zajišťuje počítačová podpora výrobku od jeho samotné konstrukce (návrhu) přes simulaci obrábění až po vlastní generování řídicích NC dat pro konkrétní CNC stroje. Primárními úkoly CAD/CAM systémů je zrychlit a ulehčit => zefektivnit práci lidem, podílejících se na vývoji a výrobě výrobku. Tyto systémy mohou být složeny ze dvou, nebo více samostatně použitelných subsystémů (jsou modulární), kde všechny moduly pracují s jednotným datovým popisem 3D modelu. V případě přenosu dat (např. 3D modelů) mezi rozhraním jiných výrobců CAD/CAM systémů se ke vzájemné komunikaci používá základních standardizovaných formátů DXF, IGES, VDA, STEP (viz. obr 12). [14][9]



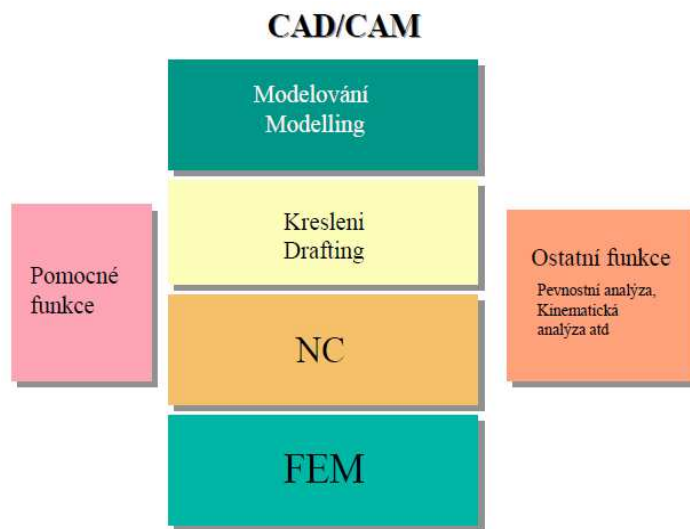
Obr. 12 Struktura komunikačních rozhraní [9]

3.2 Struktura CAD/CAM systémů

Struktura moderních CAD/CAM systémů je v základních rysech zobrazena na obr. 13. Jednotlivé moduly jsou propojeny prostřednictvím centrální databáze, která je průběžně aktualizována. Každý z modulů plní svoji funkci jako je modelování, kreslení, příprava NC programů, FEM, pomocné funkce, ostatní funkce a komunikaci s ostatními CAD/CAM systémy. [14]

- **Modelování** - (modelling) je proces tvorby prostorového modelu pomocí hranového, povrchového, nebo objemového modeláře. Lze vytvářet prostorové, plně parametrické objekty a vytvářet z nich sestavy nebo knihovny. Pro zvýšení uživatelského komfortu jsou jednotlivé moduly vybaveny operacemi, které práci zrychlují a usnadňují. [14]
- **Kreslení** - (drafting) je proces tvorby strojírenského výkresu. Při tvorbě výkresu lze používat nejen standardní pohledy (nárys, bokorys, půdorys), ale i pohledy axonometrické a uživatelsky definované. Součástí výkresů mohou být řezy nebo pomocné řezy. Kreslicí moduly jsou vybaveny standardními ISO/DIN knihovnami s možností automatické konverze mezi nimi. [14]
- **NC** - obrábění NC je proces využití prostorového modelu v procesu definice technologie v jednotlivých technologických operacích, např. soustružení, frézování, vrtání, aj. Modul obrábění je zpravidla vybaven výkonným aparátem pro simulaci, editaci a verifikaci (ověření drah nástroje) NC programu. [14]

- **FEM** - vytváření elementů pro metodu konečných prvků - FEM modelling - je proces náhrady prostorového modelu pomocí jednorozměrných, dvourozměrných i třírozměrných elementů. Takto definované prostorové náhrady lze předat pomocí standardních rozhraní do různých FEM programů (např. ANSYS, MARC). [14]
- **Ostatní funkce** - slouží k doplnění sortimentu modulů a funkcí tak, aby se zvýšila úroveň systému. Například moduly pro práci s plechovými výlisky, kompozitovými součástmi, moduly pro odlévání plastických hmot, aj. [14]
- **Pomocné funkce** - doplňují sortiment funkcí tak, aby se zvýšila úroveň systému nebo jeho funkčnost. Například volby pro rozšíření funkční množiny stávajících funkcí, další funkce pro operace s objekty, zřetězení elementů při výběru křivek, omezené zřetězení elementů při výběru křivek, atd. [14]



Obr. 13 Struktura CAD/CAM systémů [14]

3.3 Rozdělení CAD/CAM systémů

CAD/CAM systémy se rozdělují se do 3 skupin na:

Nízké - řeší úlohy třídy 2D až 2,5D, jsou vhodné pro obrábění jednoduchých tvarů. Jsou nejlevnější (cena v řádu několika desítek tisíc). Do této skupiny se řadí např. KOVOPROG.

Střední - umí řešit úlohy třídy 3D až 5D - Tato skupina je dnes nejrozšířenější na trhu. Jsou schopny naprogramovat obrábění i tvarově složitějších výrobků. Jejich cena se pohybuje v řádu desítek tisíc až statisíců. Zástupci např.: AlphaCAM, EdgeCAM, SolidCAM, GibbsCAM, SurfCAM,

Velké - komplexní modulární CAD/CAM systémy řešící úlohy obrábění třídy 3D a 5D. Používají se k programování CNC strojů obrábějící tvarově složité výrobky. Patří do skupiny tzv. PLM produktů. Jejich cena se pohybuje v řádu statisíců až milionů. Mezi zástupce se řadí: CATIA, Pro/Engineer, NX, Cimatron

3.4 CATIA V5

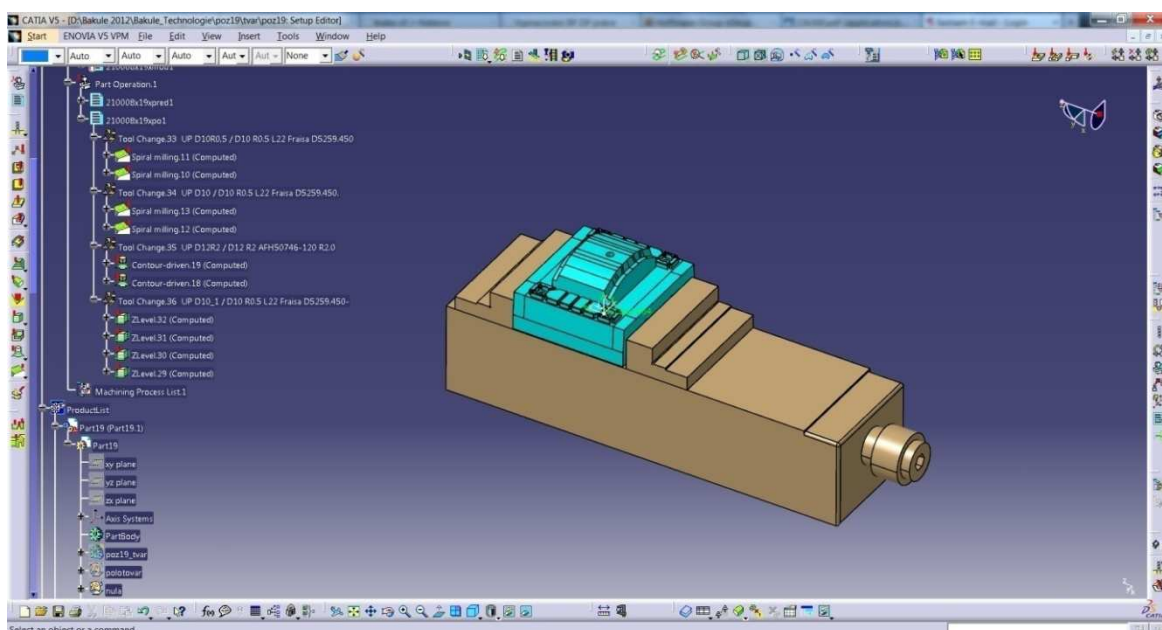
CATIA V5 se řadí do skupiny velkých CAD/CAM/CAE systémů pracujících s 3D modelem. Jde o modulární systém dodávaný ve třech různých platformách (P1, P2, P3), kde si uživatel může vybírat z množství dodávaných modulů v závislosti na své specializaci a požadavcích. Platforma P1 se skládá z modulů orientované na základní objemové modelování. Platforma P2 obsahuje širší soubor konfigurací a modulů pro produktově a technologicky orientovaný vývojový proces. Platforma P3 zahrnuje specifickou funkční výbavu nejvyšší úrovně využívanou především v rozsáhlých průmyslových komplexech.

CATIA V5 je navržena tak, aby bylo umožněno souběžné navrhování, čili překrývání etap vývoje výrobku, a tím i společná práce více oddělení nad nově vyvíjeným produktem. Jednotlivé moduly systému charakterizuje tzv. pracovní prostředí (workbench) na obr. 14. V jednotlivých pracovních prostředích jsou přehledně seskupeny příkazy, které jsou charakteristické pro práci s daným modulem.

Jednotlivá pracovní prostředí jsou ještě rozříděna do skupin - aplikací - podle toho, zda se jedná o návrh strojních součástí, povrchové modelování, analýzu produktu, NC obrábění, analýzu a návrh ergonomie, atd. Mezi těmito moduly lze libovolně přepínat a vždy ve stromové struktuře vidíte, v jaké části vývoje výrobku (např. modelování, tvorba technologie, atd.) se právě nacházíte.

NC modul CATIA V5 obsahuje několik oddílů, a to 2,5D frézování (Prismatic machining), 3D frézování (Surface machining), víceosé frézování (Advanced machining) a soustružení (Lathe machining). Každý oddíl obsahuje specifické cykly a funkce, jejichž nastavení je usnadněno obrazovým průvodcem a lze mezi nimi během tvorby technologie libovolně přepínat. NC modul taktéž obsahuje statickou i dynamickou simulaci procesu, analýzu obrobení povrchu (tzv. verifikaci) a kontrolu kolizí mezi obrobkem a nástrojem.

Architektura systému umožňuje definovat, modifikovat, vyhodnocovat a sdílet veškeré datové informace o celém životním cyklu výrobku, což z něj dělá kvalitní PLM systém.[4]



Obr. 14 Pracovní prostředí (workbench) NC modulu v CATIA V5

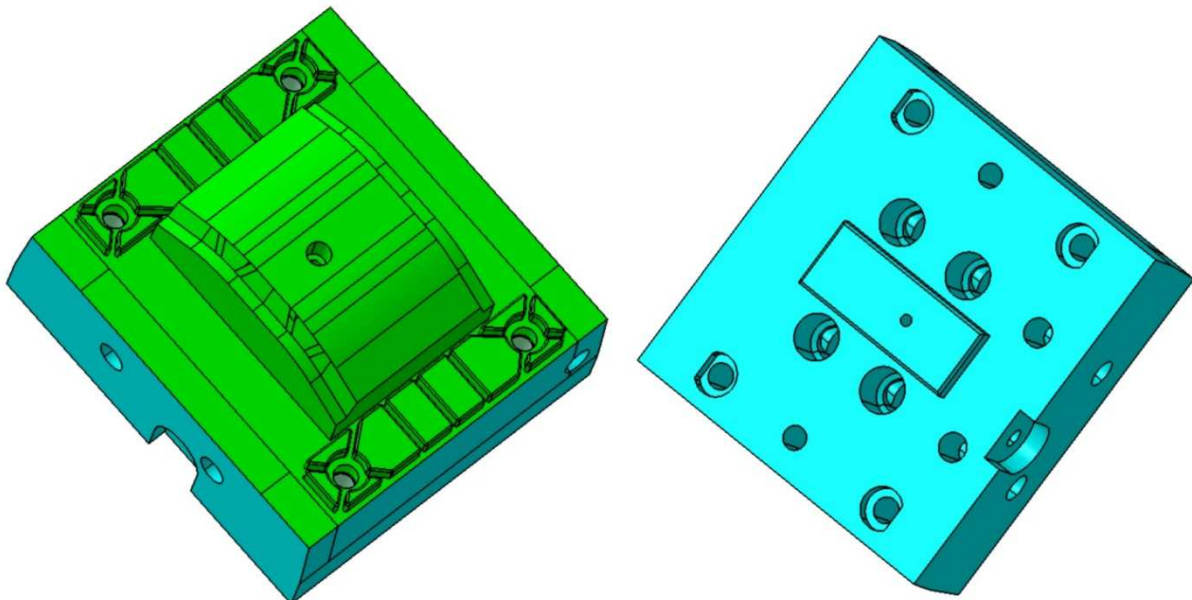
4 Tvorba technologických variant

V této kapitole budou vytvořeny dvě variantní technologie obrábění tvarové části na zadané součásti (tvarová čelist) vstřikovací formy v CAD/CAM systému CATIA V5R20, který je používán firmou PeHToo, a.s. Tvorba variant proběhne dle technologických postupů firmy PeHToo a.s., aby mohly být případně aplikovány v praxi. První varianta se bude skládat z kombinace tříosého frézování a elektroerozivního hloubení. Druhá varianta bude obsahovat kombinaci technologií víceosého frézování a mikrofrézování. Obě dvě varianty poté budou v kapitole 5 porovnány a zhodnoceny.

4.1 Popis součásti a zvolení strojů a nástrojů

4.1.1 Charakteristika součásti

Řešená součást (obr.15) je pohyblivá čelist tvořící dutinu vstřikovací formy na plasty. Podkladem pro vytvoření technologie je 3D model vytvořený konstruktéry ve firmě PHT v CAD systému CATIA V5R20. Součást obsahuje chladicí kanálky, několik přesných děr v toleranci H7 (otvory pro jádra), lícovací plochy, které je nutné po následném kalení brousit, a v neposlední řadě obsahuje vrchní tvarovou část (zvýrazněna zelenou barvou), která bude předmětem tvorby technologií obrábění. Součást má být dle požadavku konstruktéra zakalena na tvrdost 52 ± 2 HRc. Z toho důvodu bude ve variantních technologiích uvažováno obrábění před kalením a po kalení. Výrobní výkres součásti, kde jsou z hlediska tvarové složitosti zakótovány pouze základní rozměry, je vložen v příloze BP.



Obr. 15 Pohled na 3D model součásti

4.1.2 Volba nástrojů

Při výběru řezných nástrojů se vychází z druhu obráběného materiálu, velikosti obrobku, přístupnosti obráběných ploch, požadované jakosti obrobeného povrchu a výkonu stroje

(otáčky vřetene). Typ a průměr frézy se volí dle velikosti a tvaru obráběné plochy. Při tvorbě technologií jsou zvoleny převážně nástroje od fy. FRAISA a ARNO, neboť jsou osvědčenými dodavateli kvalitních nástrojů k obrábění kalených materiálů používaných v nástrojárně PeHToo. Použité nástroje lze najít v dokumentaci daných variant v příloze BP.

4.1.3 Stanovení řezných podmínek

Při volbě řezných podmínek se vychází zejména z typu použitého nástroje, druhu obrábění (hrubování a dokončování) a druhu obráběného materiálu. Uvažovaní výrobci udávají ve svých katalogích k danému nástroji doporučené řezné podmínky jako je řezná rychlost (v_c), otáčky (n), posuv na zub (f_z) či minutový posuv (v_f), hloubka záběru - axiální přísvu (a_p), boční přísvu (a_e). V našem případě jsou řezné podmínky stanoveny jak z katalogů výrobce, tak dle zkušeností a doporučení CAM programátorů z fy. PHT. Otáčky nástroje lze též spočítat ze vzorce $v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D}$. Obdobně lze z otáček spočítat i minutový posuv skrze hodnotu posuvu na zub $v_f = f_z \cdot z \cdot n$. Další možností, jak spočítat řezné podmínky, je nadefinovat geometrii (průměr) nástroje přímo v CATII (v kartě nástroje) a potažmo vyplnění dvou známých hodnot (např. v_c a f_z). Ekvivalentní hodnoty (n , v_f) dopočte CATIA.

4.1.4 Volba polotovaru

Polotovar je zvolen na základě geometrie modelu a měl by být zvolen tak, aby docházelo k minimálnímu úběru materiálu. V obou variantách bude uvažován polotovar dle technologických zvyklostí ve firmě PHT. To znamená, že obráběnou oblastí skrze CAM systém CATIA bude pouze vrchní tvarová část. Všechny ostatní rozměry a tvary budou již předhotoveny či zhotoveny podle výkresu. Materiálem pro výrobu součásti je podle požadavků konstruktéra nástrojová ocel značená dle normy ČSN (ČSN 19 552) a dle normy W.Nr. (1.2343). Polotovarem k výrobě elektrod je záměrně použit grafit, jenž se ve srovnání s mědí lépe obrábí. Rozměry polotovarů budou popsány v rozboru variant.

4.1.5 Volba strojů

Stroje jsou zvoleny podle skutečného strojního parku PHT. V nástrojárně je zvykem, že se hrubovací operace před kalením provádí na strojích určených pouze pro hrubovací operace před kalením, aby se šetřily další stroje k přesnému dokončovacímu obrábění po kalení. V našem případě bude taktéž v obou variantách před kalením použito 4-osé obráběcí frézovací centrum AXA VPC 40U (obr.16) s ŘS Heidenhain TNC 320 s max. otáčkami 15000min^{-1} . K výrobě elektrod se používá jednoúčelového tříosého HSC obráběcího centra RÖEDERS RFM760 (obr.17) s vlastním ŘS podporující ISO kód a max. otáčkami 36000min^{-1} . Vybavení stroje je speciálně uzpůsobeno k obrábění grafitových elektrod (odsavač grafitového prachu, paletizační systém upínání elektrod). K obrábění po kalení je v první variantě použito tříosé HSC frézovací centrum RÖEDERS RFM1000 (obr.18), též z vlastním ŘS a max. otáčkami 36000min^{-1} . Jelikož firma nevlastní 5-ti osé obráběcí centrum, bylo ve 2. variantě po kalení uvažováno 5-ti osé frézovací centrum HERMLE C22U (obr.19) s ŘS

Heidenhain iTNC 530, které umožní plynulé naklápění osy nástroje a vysoké otáčky vřetene (max. 42000 min⁻¹) k použití technologie mikrofrézování.



Obr. 16 Obráběcí centrum AXA VPC 40U [6]



Obr. 19 Obráběcí centrum RÖEDERS RFM760 [6]




Obr. 18 Obráběcí centrum RÖEDERS RFM1000 [6]



Obr. 17 Obráběcí centrum HERMLE C22U [6]

4.2 Obecný postup tvorby technologie v NC modulu CATIA V5


Obecný postup při tvorbě technologie v CATIA V5 začíná navolením parametrů v záložce  *Part operation*, kde se nejprve zvolí obráběcí stroj (frézka, soustruh, víceosé obráběcí centrum) a základní parametry stroje (výchozí bod, bod výměny nástroje, aj.). Dále je nutné sladit souřadnicový systém modelu se souřadnicovým systémem stroje a vymezení polotovaru, obráběného kusu, volba bezpečné roviny a označení upínacích přípravků, pokud jsou vymodelovány. Poté se zvolí požadovaný obráběcí cyklus a v něm se navolí parametry nástroje.[4]

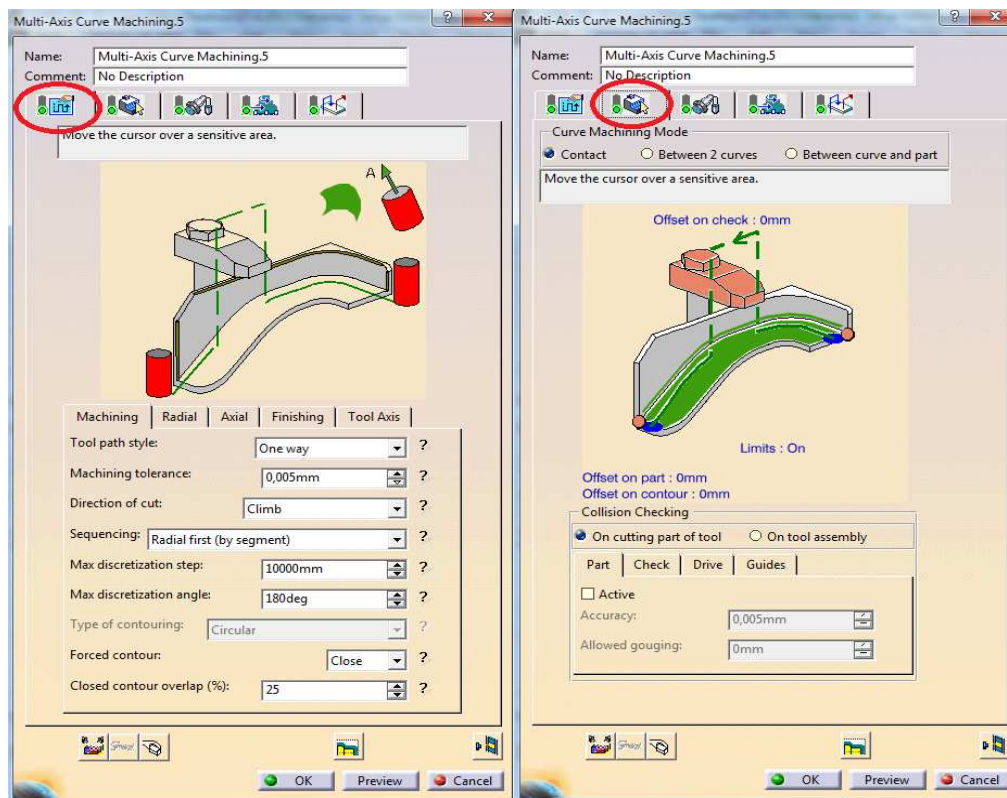
Ve vybraném cyklu se dále zvolí obrobek či požadovaná obráběná plocha, horní a spodní rovina definující oblast obrábění, hraniční či kontrolní kontura nebo plocha, apod. Následuje volba strategie dráhy nástroje po povrchu součásti pro konkrétní operaci, volba řezných podmínek a nastavení důležitých parametrů, které ovlivňují výslednou kvalitu obráběného povrchu (*Machining tolerance*, *Scallop height*, aj.) a definice maker pro nájezd a odjezd nástroje ze záběru. V předposledních krocích je vhodné ověřit požadované obrobení

součástí vizualizací a verifikací korektnosti dráhy nástroje. Poslední krok spočívá ve vygenerování NC kódu pro CNC stroj, který může být buďto ve tvaru APT, CL dat nebo přímo ve tvaru pro konkrétní řídicí systém CNC stroje. [4]

Jelikož je cílem bakalářské práce pouze porovnat variantní technologie, není vhodné ani možné vzhledem k rozsáhlosti nastavení použitých cyklů všechny jednotlivě popsat. Z toho důvodu v následující podkapitole bude předvedena pouze jedna ukázka nastavení cyklu v prostředí NC modulu CATIA V5. Vypočtené dráhy jednotlivých cyklů vč. nastavení řezných podmínek jsou k nahlédnutí v dokumentaci v příloze BP.

4.2.1 Ukázka nastavení cyklu v prostředí NC modulu CATIA

Na obr.20 je ilustrativní ukázka možnosti nastavení cyklu  *Multi-Axis-Curve-Machining* (víceosé frézování po křivce), jenž je obsažena v NC modulu víceosého frézování. Prostředí nastavení je pro všechny funkce z jakéhokoliv NC modulu stejný. Vybavení jednotlivých záložek se však mění v závislosti na použité funkci.



Obr. 20 Ukázka nastavení první a druhé záložky cyklu víceosého frézování po křivce

Obecně **první záložka** (obr. 20 vlevo) slouží k nastavení parametrů jednotlivých strategií. Volí se např.: strategie dráhy nástroje (např. *one way*, *zig zag*), (*machining tolerance*), přesnost obrábění, směr pohybu nástroje, hloubka (a_p) a šířka (a_e) třísky.

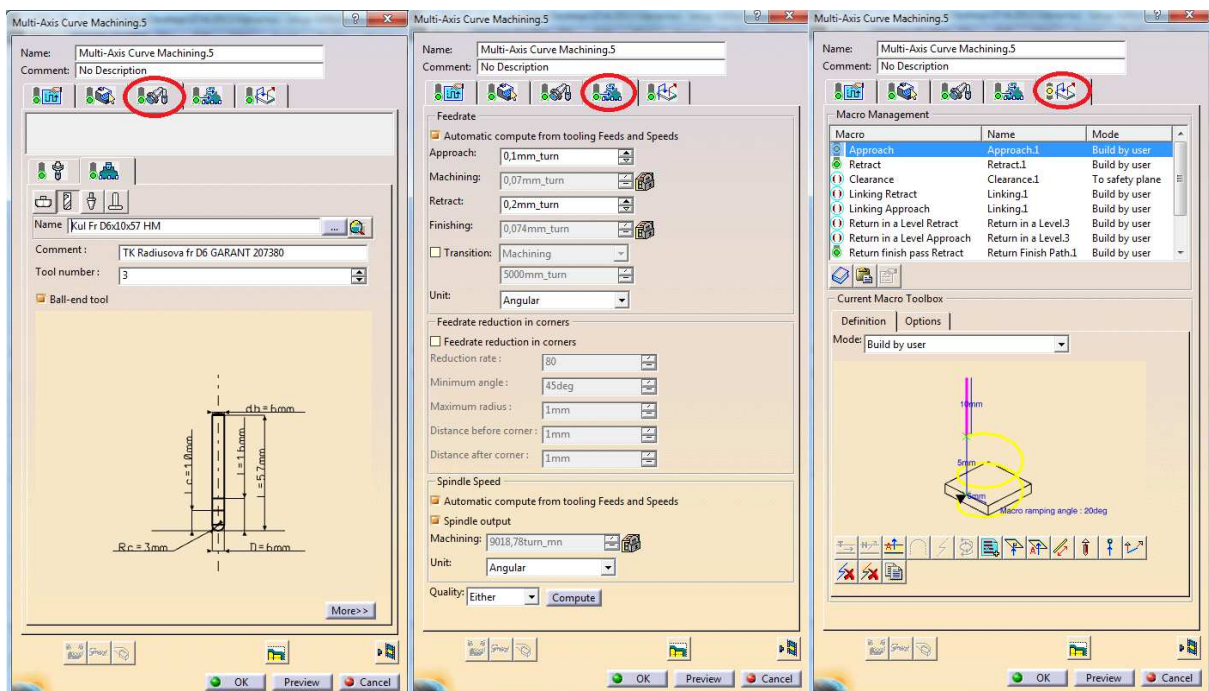
Druhá záložka (obr. 20 vpravo) je určena pro označení geometrie obráběné součástky pomocí ploch nebo kontur, které chceme obrábět. Dále se zde nastavují vodící a limitní

kontury, (*offset*) přídávky - např. na dokončení. Nastavují se zde také kolizní hranice (*check*), kterým se má nástroj vyhnout při výpočtu drah.

Ve **třetí záložce** (obr. 21 vlevo) se zvolí obráběcí nástroj, jehož rozměrové parametry si lze navolit dle přehledného průvodce, nebo nástroj vybrat z katalogu nástrojů již vytvořených. Je možné zde pevně nadefinovat řezné podmínky (posuv a otáčky) a upínač nástroje, což je vhodné ke kvalitnější kontrole kolizí (zejména při víceosém frézování).

Čtvrtá záložka (obr. 21 uprostřed) slouží k dodatečné úpravě řezných rychlostí, které již byly zvoleny ve třetí záložce v rámci nastavení nástroje. Je zde možnost nastavit například kritéria pro snížení rychlosti posuvu při pohybu nástroje v rozích a vybrat z předdefinovaných řezných podmínek (rychlost posuvu a otáčky), jedná-li se o hrubování (*rough*) nebo dokončování (*finish*).

Pátá záložka (obr. 21 vpravo) je určena k definování způsobu příjezdů a odjezdů nástroje k obrobku a to i v rámci jednotlivých hladin obrábění. Je zde možné navolit i vlastní pohyb nástroje, nebo využít předdefinovaných maker, jako je např. pohyb po šroubovici, rampování, aj.



Obr. 21 Ukázka nastavení třetí, čtvrté a páté záložky cyklu víceosého frézování po křivce

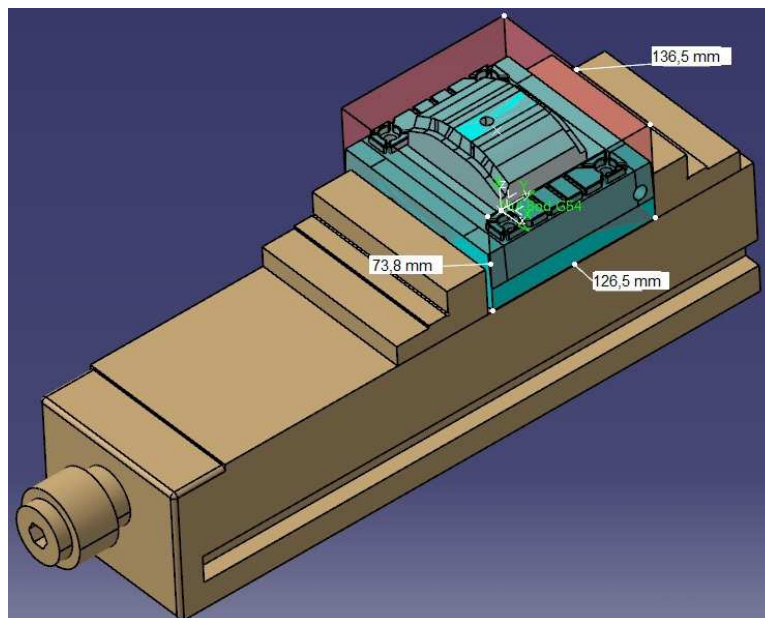
4.3 Technologická varianta č. 1

Předmětem tvorby a porovnání technologií za pomoci CATIA V5 je obrábění vrchní tvarové části čelisti (ostatní tvary a rozměry jsou již předhotoveny). V této technologické variantě je uvažováno obrábění tvarové části obrobku kombinací tříosého frézování pomocí modulu *Surface machining* a poté doobrobení nepřístupných míst pomocí elektroerozivního hloubení. Samotný proces elektroeroze v CATII simulovat ani programovat nelze, avšak je nutné za pomoci funkcí v modulu *Generative shape design* namodelovat vhodný tvar elektrod, jež bude též obroben s využitím cyklů z modulu 3D frézování.




Na počátku samotné tvorby technologie je důležité si promyslet, které části obrobku bude možno zhotovit frézováním, a které je nutno vzhledem k nepřístupnosti, či jakosti povrchu, jiskřit. Jak bylo řečeno již dříve, je vhodné odebrat pokud možno co nejvíce materiálu z polotovaru frézováním, neboť úběr materiálu jiskřením je méně efektivní a to vede k celkovému navýšení nákladů výroby.

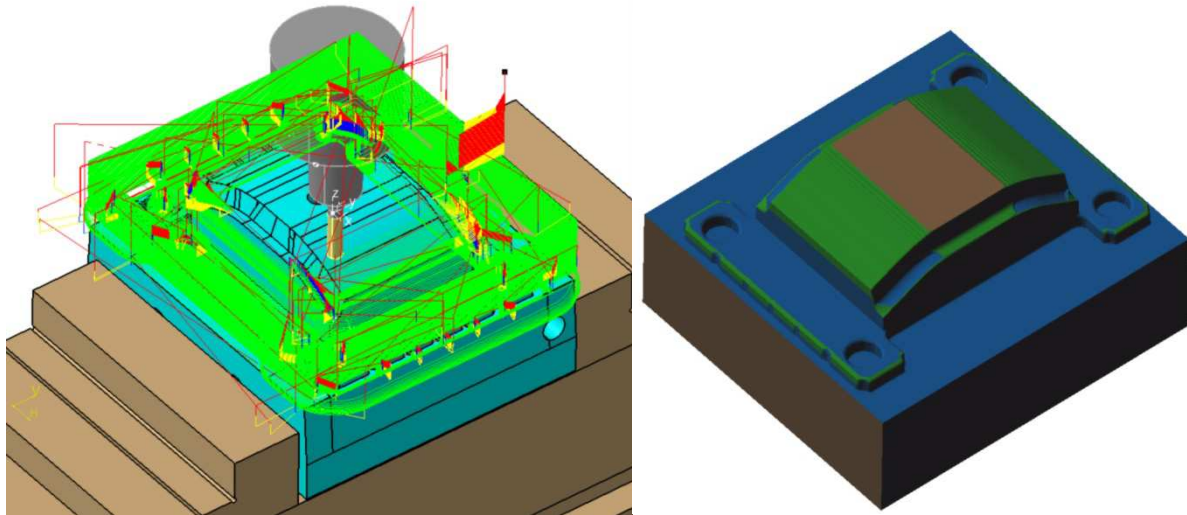
4.3.1 Obránění tvaru před kalením

Výchozí polotovar je z materiálu nástrojové oceli dle ČSN 19552. Jelikož jsou dle výkresu požadovány rozměry obvodových stěn v toleranci g6, jsou všechny stěny polotovaru pro obrábění před kalením přesně nabroušeny do tvaru kvádru na rozměry 136,5 x 126,5 x 73,8 mm, jenž zahrnují přídavek 0,5 mm pro dokončovací obrábění po kalení. Před kalením se bude tvar pouze frézovat pomocí vytvořeného programu 210008x19xpred1. Nulový bod je umístěn uprostřed obrobku na spodní rovné ploše (podrobněji viz dokumentace v příloze BP). Na obr. 22 je znázorněno upnutí součásti vč. polotovaru a orientace os souřadného systému stroje.



Obr. 22 Upnutí součásti - varianta č.1 před kalením

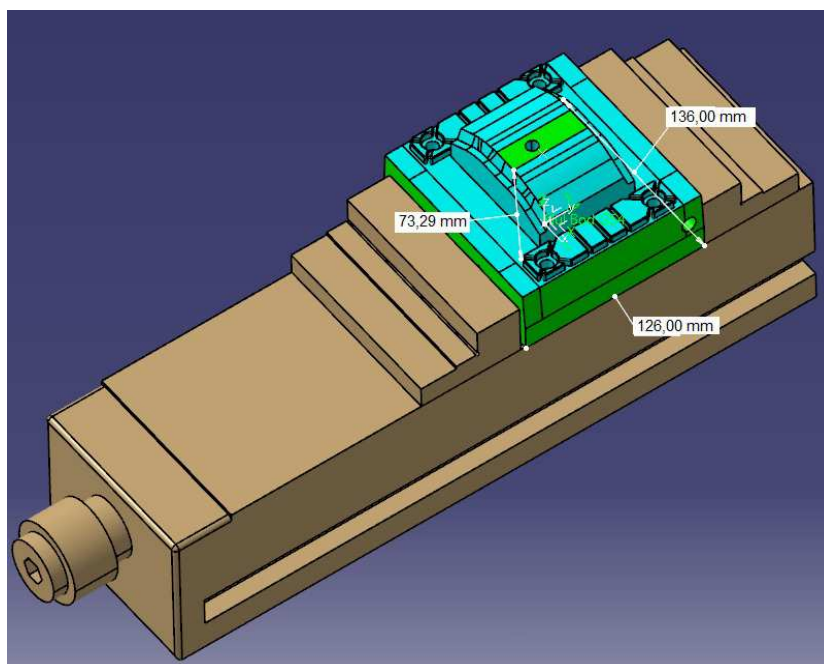
Jako první byl použit cyklus  *Roughing (hrubování)*, který předhruboval tvar součásti s přídávkem 0,5 mm. Jako nástroj byla záměrně zvolena frézovací hlava o $\varnothing=32\text{mm}$ osazená VBD s radiusem 2 mm kvůli velkému úběru materiálu. Tento cyklus uvažuje při výpočtu drah vybraný polotovar v základním nastavení *Part Operation*. K nastavení cyklu bylo nutné vybrat celý *Part* (celý model) a označit oblast výpočtu drah nástroje, jenž byla vymezena mezi vrchní plochou polotovaru a spodní rovinnou plochou v tvarové části. Pro dohrubování tvaru před kalením po předchozím nástroji byla zvolena tórusová fréza o průměru $D=6\text{mm}$ se zaoblením špičky $r=0,5\text{mm}$ a opět byl zvolen cyklus  *Roughing*, který uvažoval jako polotovar výsledek předchozího obrobení. Dle CAD/CAM systému CATIA byl výsledný strojní čas před kalením stanoven na 42,6 minut. Na obr. 23 vlevo jsou vidět dráhy vygenerované cyklem  *Roughing*, vpravo výsledek obrobení po proběhnutí simulace.







Obr. 23 Výsledek simulace obrábění tvaru před kalením

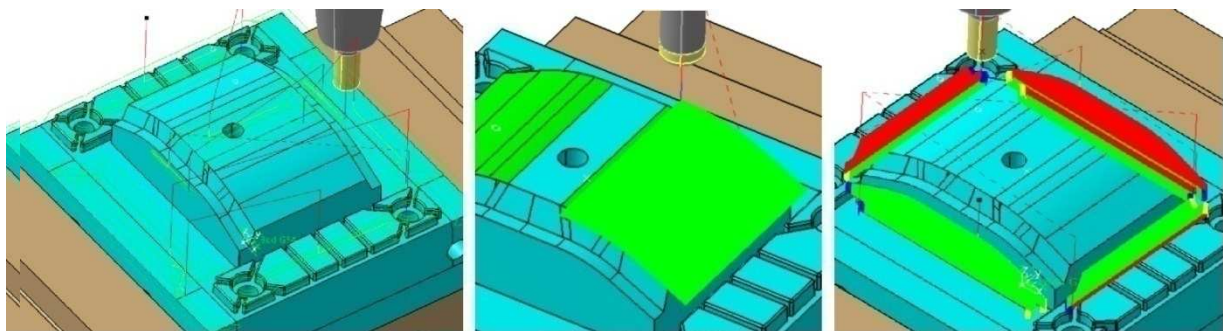
4.3.2 Obrábění tvaru po kalení

Jako výchozí polotovár bude uvažován tvar součásti obrobene dle předchozího programu a je zakalen na tvrdost 52HRc. Všechny 6 stran obrobku je nabroušeno na hotovo dle tolerancí na výkresu na rozměr 136 x 126 x 73,29 mm. Všechny tvary, které jsou již obrobene načisto, jsou na obr. 24 zvýrazněny zelenou barvou. Nulový bod je umístěn ve stejném místě jako v předchozím programu. Na obr. 24 je též znázorněno upnutí součásti a orientace os souřadného systému stroje. K obrábění po kalení byl použit program 210008x19xp03AX (obsažený na CD v elektronické příloze BP).










Obr. 24 Upnutí součásti - varianta č.1 po kalení

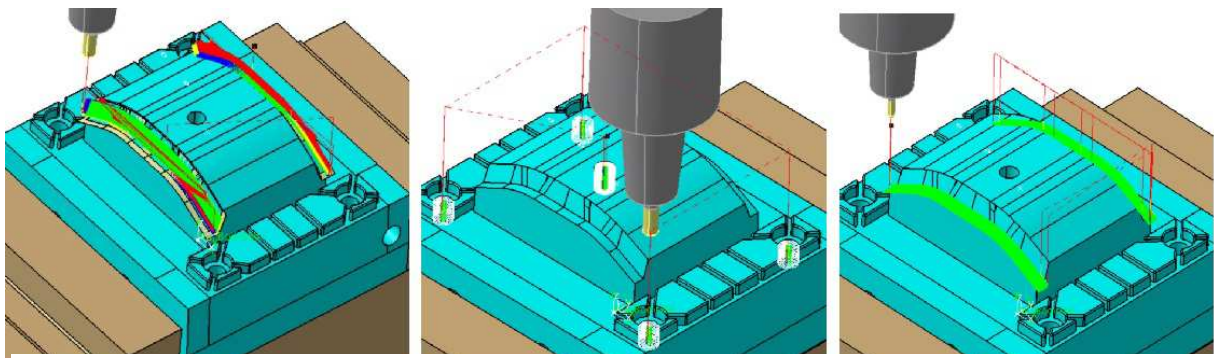
Vrchní čelo označené zelenou barvou uvažujeme po kalení již nabroušené na hotovo. Zbývá tedy doobrobit ostatní tvary s přídávkem 0,5 mm zanechané před kalením. Jako první byly nejprve obrobena tórusovou frézou o průměru $D=10\text{mm}$ $r=0,5\text{mm}$ všechny horizontální plochy obrobku s přídávkem 0,1 mm na dokončení za pomoci cyklu  *Spiral milling (obrábění po spirále)*, který na označeném modelu automaticky najde a obrobí všechny plochy nepřekračující úhel definovaný v kartě ZONE. Jelikož se obrábí kalený materiál, je důležité zabezpečit, aby nástroj při zarovnání horizontálních ploch nepřišel do styku s přídávkem na svislých stěnách, což by vedlo k neúměrnému zatížení nástroje a jeho možnému poškození. Proto byl v cyklu ještě nastaven parametr *Offset on contour (přídavek na konturu)* na 1,2mm. Poté jsou dráhy nástroje na horizontálních plochách generovány s bezpečným odstupem od svislých ploch, kde je ještě přídavek. Dalším krokem bylo obrobení stejných ploch na čisto, též cyklem  *Spiral milling* (obr. 25 vlevo). Následovalo obrobení vrchní zaoblené plochy cyklem  *Contour-driven (řádkování řízené křivkou)* dle obr. 25 uprostřed. Zde byla zvolena strategie vedení nástroje po 3D tvaru v směru osy Y s konstantním přísuvem 0,1 mm. Jelikož jsou plochy dobře přístupné, byla k obrobení záměrně zvolena tórusová fréza $D=12\text{ mm}$ $r=2\text{ mm}$, abychom docílili rychlého a kvalitního obrobení ploch bez přídávku rovnou načisto. V dalším kroku byly postupně obrobena načisto boční stěny dle obr. 25 vpravo. Jelikož jsou stěny v úkosu a čelist na těchto stěnách lícuje (zavírá) s protikusem, bylo nutné použít 3D cyklus  *Z-level (vrstevnicové frézování)*. Oblast výpočtu drah na jednotlivých stěnách bylo třeba omezit limitní konturou, aby cyklus negeneroval bezúčelné dráhy při přejíždění nástroje ze stěny na stěnu, čímž by obrábění nebylo plynulé a zvýšil by se strojní čas obrábění. Opět byl použit jako nástroj tórusová fréza $D=10\text{ mm}$ $r=0,5\text{ mm}$, jejíž geometrie břitu umožňuje obrobit mnoho tvarů (např. čela i tvarových bočních ploch) jedním odměřeným nástrojem. Abychom dosáhli požadované kvality obrobení stěn, byl zvolen vzhledem k tvaru břitu použitého nástroje axiální přísuv $a_p=0,14\text{ mm}$. Stejným principem se obrobily zbývající 3 stěny.



Obr. 25 První série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.1

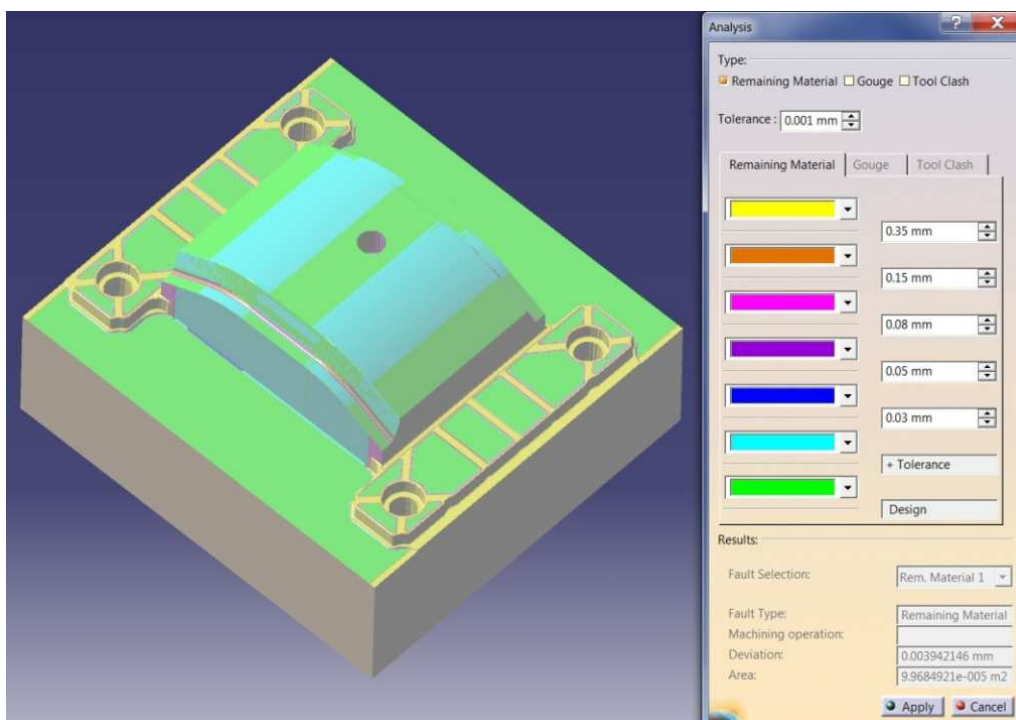
Další oblastí k obrábění bylo tvarové osazení zobrazené na obr 26. Nejdříve bylo nutné vymodelovat pomocné vytažení tvarových ploch funkcemi  *sweep*  a *extrapolate* z modulu *Generative shape design* (v tomto modulu byly dělány všechny pomocné plochy, body, pomocné limitní hranice, aj.). Tato pomocná plocha byla využita i ve druhé variantě při obrobení stejné oblasti víceosým obráběním. K obrobení oblasti v této variantě bylo zapotřebí cyklu  *Z-level* (obr. 26 vlevo), jenž obrobil načisto (dle dosahu) svislé plochy

tórusovou frézou $D=6$ mm $r0,5$ mm s axiálním přísuvem $0,11$ mm. Se stejným nástrojem s pomocí 2D cyklu  *Profile Contouring* byly předdokončeny s přídávkem $0,05$ mm na stěnu 5x tolerované díry H7 o průměru $D = 8$ mm. Stejnými cykly  *Profile Contouring* (kopírování kontury) a novým typově stejným nástrojem byly zhotoveny 5x tolerované díry. Dané cykly byly nastaveny s parametrem *2D radial profile*, který při generování NC programu zanesse korekci na průměr nástroje (G41,G42), aby bylo možné zhotovit díry v požadované toleranci a nebylo nutné přepočítávat průměr nástroje v CATII a znovu generovat NC program. K vizuálnímu rozeznání jsou dráhy nástroje s korekcí označeny bílou barvou (obr. 26 uprostřed). Posledním cyklem  *Contour-driven* (řádkování řízené křivkou) je odstraněn zbytkový materiál po cyklu  *Z-level* v oblasti tvarového osazení (dno a přechod ze stěny na dno) - viz obr. 26 vpravo. Jako nástroj byla použita kulová fréza o průměru $D = 3$ mm.



Obr. 26 Druhá série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.1

Obrázek 27 zobrazuje obrobek při distanční analýze po proběhnutí simulace obrábění celé součásti dle programu 210008x19xpo3AX. Žlutá barva zobrazuje neobrobené oblasti, kde bude tvar dokončen pomocí elektrod. Zbytkový materiál v oblasti spojení ploch tvarového



Obr. 27 Distanční analýza po obrábění variantou č.1

osazení je v toleranci 0,15 mm, který může být po dohodě s konstruktérem ponechán (v tomto místě forma nelícuje s protikusem, jen tvaruje výlisek.) Dle CAD/CAM systému CATIA byl výsledný strojní čas obrábění po kalení varianty č.1 spočítán na 165,02 minut, tzn. 2,75 hod.

4.3.3 Výroba elektrod

Jak již bylo řečeno výše, bude pro oblasti, jež nebyly zcela obrobena frézováním, použita technologie elektroerozivního hloubení. K tomu je nejprve nutné namodelovat dvě tvarové elektrody, jejichž tvar odpovídá negativnímu tvaru obráběné plochy. Modelování elektrod bylo provedeno v modulu *Generative shape design* a byly k tomu použity tyto funkce:



Extract (*extrahování*) - funkce umožňující získat plochy, nebo hranice křivek z objemového modelu



Extrapolate (*protažení elementu*) - funkce sloužící k protažení plochy nebo křivky



Extrude (*tažení plochy*) - funkce k vytvoření plochy vytažením křivky ve zvoleném směru



Sweep (*tažení profilu*) - funkce vytvářející plochy tažením rovinného profilu po křivce



Fill (*vyplnění*) - funkce vyplňující skupinu křivek nebo hranic plochy



Blend (*přechodová plocha*) - funkce vytvářející plynulou přechodovou plochu mezi dvěma plochami nebo křivkami





Join (*spojení*) - funkce sloužící ke spojení na sebe navazujících křivek nebo ploch v jednu celistvou

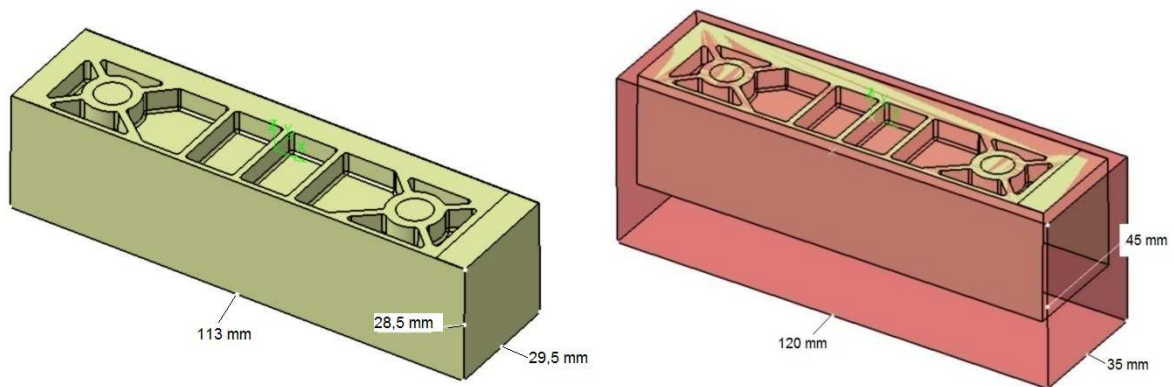


Split (*ořezání*) - slouží k oříznutí jednoho elementu (plochy, křivky) druhým.




Výroba elektrody č.1






Elektroda č.1 (obr. 28 vlevo) má tvar kvádrů o rozměrech 113x29,5x28,5 mm. Tvarová část elektrody byla vymodelována z větší části pomocí funkce  **Extract**. Polotovaru je přířez z grafitu o rozměrech 120x35x45 mm a byl v CATII vytvořen pomocí funkce  **Creates rough stock**, jenž rozdělí zadané rozměry polotovaru rovnoměrně od středu modelu podle orientace os ve zvoleném počátku souřadného systému (v našem případě bude střed tvorby polotovaru v nulovém bodě dle směru os souř. systému stroje). Výška polotovaru byla záměrně navýšena o 14 mm, neboť do této hloubky budou zasahovat šrouby spojující upínací systém elektrod (tzv. "3R" viz obr. 11) s polotovarem elektrody. Nulový bod je umístěn ve středu polotovaru na horní ploše (viz obr. 28 vpravo), přičemž kvůli zabezpečení orientace elektrody vůči obrobku je směr osy X souř. systému stroje vždy rovnoběžný s nejdelší hranou polotovaru. Zároveň značka "3R" upínacího systému vždy směřuje v záporném směru osy Y.

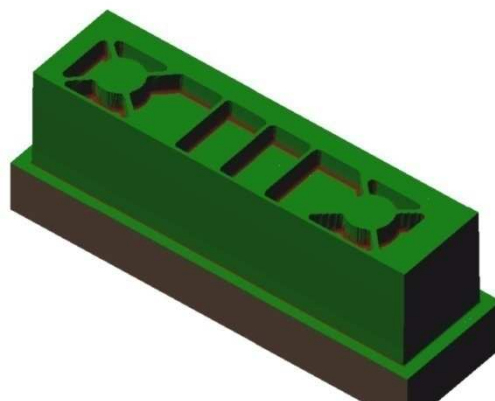
Elektroda č.1 byla obrobena dle programu 210008x19xE1M04, který je v elektronické příloze BP. K obrábění elektrod byly uvažovány frézy vyrobené ze slinutého karbidu s diamantovým povlakem určené pro obrábění grafitu. Uvažovaný stroj pro obrobání obou elektrod byl Røeders RFM760 (viz kap. 4.1.5).



Obr. 28 Elektroda č.1

Nejprve byl tvar elektrody předhrubován čelní vřezou o průměru $D = 8$ mm s přídkem 2mm pomocí cyklu  *Roughing*. V druhém cyklu  *Roughing* byla jako limitní kontura označena vrchní obdélková část elektrody, přičemž byly hrubovány kapsy na nulu (tj. s nulovým přídkem) čelní vřezou o $\varnothing = 4$ mm dle dosahu. Za použití posledního cyklu  *Roughing* byly dohrubovány na nulu krajní kapsy kulovou frézou o průměru $D = 2$ mm.

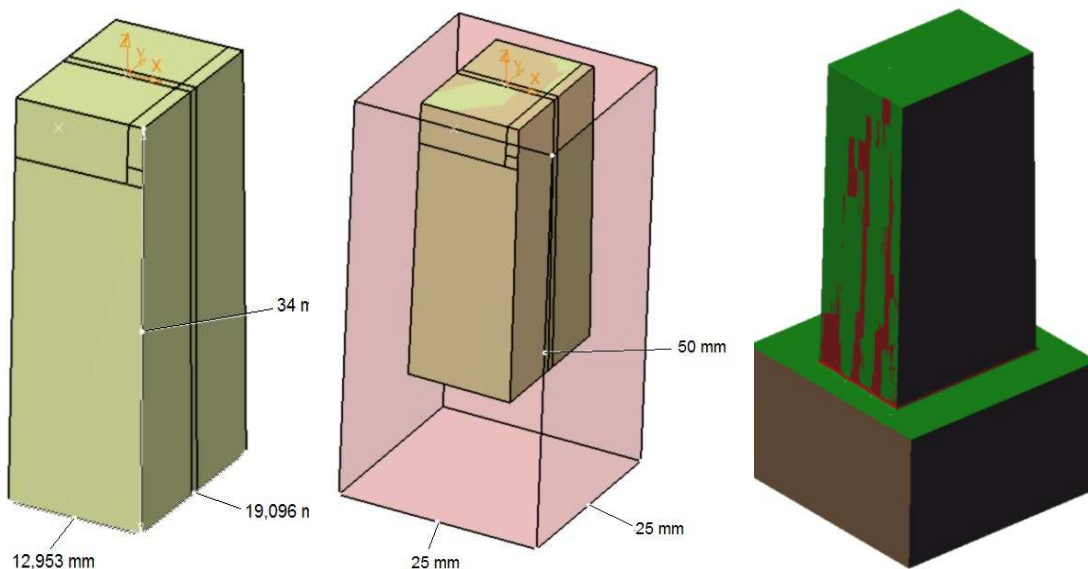
Tvarové plochy elektrod, které budou jiskřit, musí být přebrobeny (dle doporučení CAM programátorů z PHT) o $-0,2$ mm na stěnu (na tzv. podrozměr), neboť je nutné ponechat pracovní prostor pro přeskočení výboje mezi elektrodou a součásti při elektroerozivním hloubení. Proto bylo s pomocí cyklu  *Spiral milling*, tórusovou frézou o průměru $D = 6$ mm $r = 0,5$ mm nejprve přebrobeno vrchní čelo o $-0,2$ mm. Stejným nástrojem byly obrobena i boční stěny, z nichž je jedna úkosová a kvůli tomu není možné použít na stěny 2D cykly (např.  *Profile Contouring*). K tomu byl využit ověřený 3D cyklus  *Z-level*, který přebrobenil boční stěny také o $-0,2$ mm. K přebrobení kapes o $-0,2$ mm (jenž mají všechny stěny v úkosu a obsahují přechodové radii $r = 0,8$ mm) byla použita kulová fréza o průměru $D = 2$ mm. Nejdříve se pomocí cyklu  *Z-level* obrobily stěny kapes a poté se cyklem  *Spiral milling* dokončila dna. Celkový strojní čas obrábění elektrody č. 1 je dle CATIA 59,75 minut, tzn. 1hod. Z výsledku distanční analýzy (obr. 29) je zřejmé, že v rozích kapes zbyl materiál (červená barva). Zbytek je v řádu několika 0,01mm a jelikož forma v těchto oblastech nelícuje s protikusem, ale pouze tvaruje konečný výlisek, je možné zbytkový materiál v rozích po dohodě s konstruktérem zanedbat. Celkem budou vyrobeny 4 ks elektrod.






Obr. 29 Distanční analýza obrobění elektrody č. 1

Výroba elektrody č.2

Podstava elektrody č.2 (obr. 30 vlevo) má tvar obdélníku o rozměrech 12,953x19,096x34 mm. Elektroda byla vymodelována pomocí výše zmíněných funkcí tak, aby její tvar byl symetrický, a mohla být při vlastním jiskření rotována o 180° kolem své osy. Rotováním symetrických elektrod se ušetří náklady na výrobu jinak většího počtu elektrod. Minimální rozměry polotovaru musí být max. 25x25x25 mm, aby bylo možno polotovar upnout do upínacího systému 3R. V tomto případě je opět polotovar z grafitu o rozměrech 25x25x50 mm. Nulový bod je též umístěn ve středu polotovaru na horní ploše (viz obr. 30 uprostřed). Orientace os souř. systému stroje je dle obr. 30. Elektroda č.2 byla obrobena dle programu 210008x19xE2M04, který je přiložen v elektronické příloze BP. Technologie obrábění tvaru elektrody byla podstatně méně náročná než u předchozí elektrody.



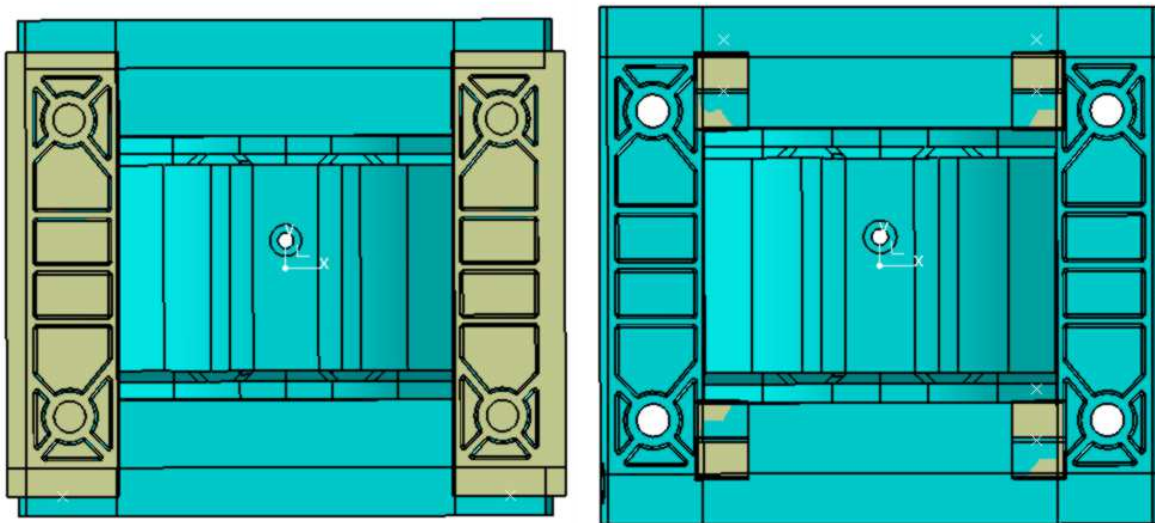
Obr. 30 Elektroda č. 2

První zvolený cyklus byl standardně  *Roughing*, který vyhruboval celý tvar elektrody s přídavkem 1,5 mm čelní vřetovitou frézou o průměru $D = 8$ mm. Poté následovalo dokončovací přebrobění vrchního čela o -0,2 mm tórusovou frézou o průměru $D = 6$ mm $r = 0,5$ mm s cyklem  *Spiral milling*. Boční stěny elektrody jsou v úkosu a budou muset erodovat zbytkový materiál v rozích po předešlém frézování v oblasti lícovacích bočních stěn tvarové části obrobku. Proto byly stěny taktéž přebroběny o -0,2 mm 3D cyklem  *Z-level* a stejnou frézou jako v předchozím cyklu.

Na obr. 30 vpravo je zobrazen výsledek distanční analýzy finálního tvaru po proběhnutí simulace obrábění. Celkový strojní čas obrábění elektrody č. 2 je dle CATIA 7,58 minut. Po konzultaci s programátory z firmy PHT je nutno vyrobit opět celkem 4 ks elektrod vzhledem k množství zbytkového materiálu v rozích po operaci frézování.

4.3.4 Dokončovací obrábění tvaru elektrodami

Erodování je v našem případě uvažováno až po obrobení tvaru frézováním po kalení. Na obr. 31 jsou znázorněna místa, kde budou vyrobené elektrody dokončovat tvar jiskřením (obr. vlevo zobrazuje oblasti jiskření elektrodou č.1, vpravo oblasti jiskření elektrodou č.2). V nástrojárně PeHToo předchází vlastnímu hloubení ještě několik operací. Po vyrobení elektrody a jejímu následnému označení je nutné zkontrolovat její tvar v rámci mezioperační kontroly na 3D měřícím souřadnicovém stroji podle 3D modelu. Tím se z části eliminuje výroba zmetkového výrobku jiskřením. Správné založení elektrody do vřetene hloubičky (její jednoznačná orientace) je dána upínacím systémem 3R (obr 11 vpravo). K určení pozice, ve které bude patřičná elektroda jiskřit, je zanesena v najížděcím listě elektrody (viz. příloha



Obr. 31 Rozložení elektrod (vpravo) elektroda č.1, (vlevo) elektroda č.2

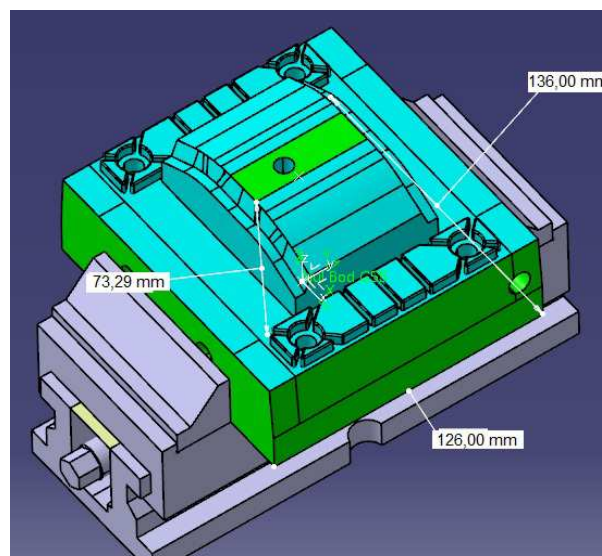
BP). Najížděcí list obsahuje orientaci os souřadného systému stroje, nulový bod (stejný jako při frézování), souřadnice, ve kterých bude elektroda jiskřit, a zahrnuje také důležitý údaj "M" udávající velikost elektrodojiskrové (pracovní) mezery. Hodnota "M" slouží obsluze stroje k nastavení parametrů procesu elektroeroze. Proces hloubení se provádí v dielektriku, ve které je součást ponořena. Obrábění probíhá podobně jako při vrtacím cyklu. Elektroda jezdí ve směru osy Z nahoru a dolů, přičemž při pohybu nahoru dochází k výplachu vyerodovaného materiálu z místa jiskření. Poté se elektroda vrátí zpět a celý cyklus se opakuje, dokud elektroda nedosáhne zadaných souřadnic. Rychlost a kvalita erodování závisí na použitém stroji. Jelikož CATIA V5 neumí simulovat proces hloubení (kvůli zjištění času) a ani nebylo možné prakticky ověřit délku trvání procesu hloubení, bylo proto vzneseno několik dotazů na odborné pracovníky nástrojárny PHT. Ve firmě se tvarově podobná součást již dříve vyráběla. Oba dva pracovníci se nezávisle na základě svých praktických zkušeností shodli na celkové době obrábění kolem 3 hodin, proto bude tato hodnota brána jako určující při porovnávání obou variant.

4.4 Technologická varianta č.2



V této variantě bude předmětem tvorby technologie opět pouze obrábění vrchní tvarové části čelisti (ostatní tvary a rozměry jsou uvažovány předhotovené) a to za použití technologie víceosého frézování a mikrofrézování. K tomu budou použity cykly z modulu *Surface machining* (tříosé obrábění) a *Advanced machining* (víceosé obrábění). Výchozí polotovar před kalením je stejný jako v první variantě a i zde bude nejprve tvar vyhrubován stejným postupem s přídkem 0,5mm podle programu 210008x19xpred1. Doobrobení tvaru bude popsáno v následující kapitole.





4.4.1 Obrábění tvaru po kalení

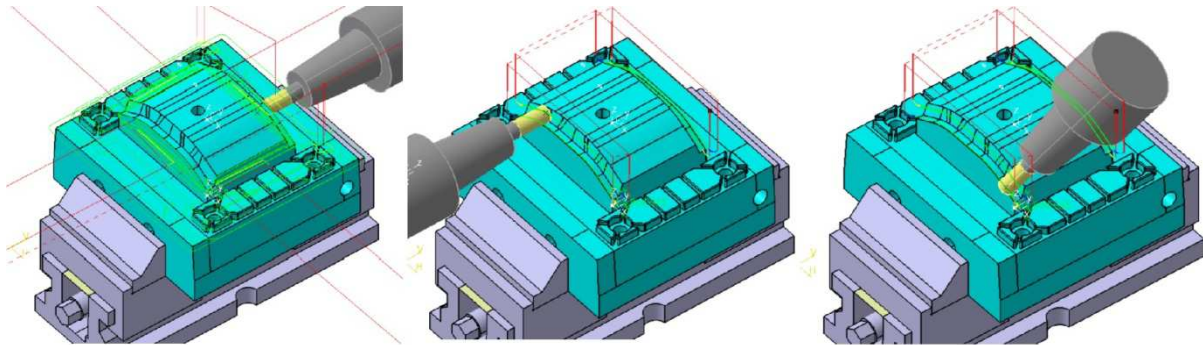
Výchozím polotovarem je uvažován tvar součásti obrobene dle programu 2100018x19xpred1 a je zakalen na tvrdost 52HRC. Po kalení je opět všech 6 stran obrobku nabroušeno na hotovo v tolerancích dle výkresu na rozměr 136 x 126 x 73,29 mm. Všechny tvary, které jsou již obrobene načisto, jsou na obr. 32 zvýrazněny zelenou barvou. Nulový bod je umístěn ve stejném místě jako v předchozím programu. Na obr. 32 je též znázorněno upnutí součásti a orientace os souřadného systému stroje. Uvažovaným strojem je HERMLE C22U. Jelikož fy. PHT uvedený stroj a k němu patřičný postprocesor nevlastní, výstupem budou pouze APT data, jež je možno dodatečně zpracovávat vhodným postprocesorem. Jsou též součástí el. přílohy na CD. K obrábění po kalení bude použit program 210008x19xpo5AX. Podrobná výrobní dokumentace je vzhledem ke své rozsáhlosti umístěna v příloze BP.










Obr. 32 Upnutí součásti - varianta č.2 po kalení


Vrchní čelo (označené zelenou barvou) uvažujeme po kalení již nabroušené na hotový rozměr dle výkresu. Zbývá tedy doobrobit ostatní tvary s přídkem 0,5 mm ponechaným před kalením. První operací bylo obrobení vrchní zaoblené plochy načisto za pomoci cyklu  *Contour-driven* (řádkování řízené křivkou). Nastavení cyklu bylo zcela stejné jako ve variantě č.1 a i použitý nástroj (tórusová fréza D12R2) zůstal stejný. Dalším krokem bylo předdokončení horizontálních ploch a bočních úkosových stěn (dle obr. 33 vlevo) s přídkem 0,05 mm za pomoci cyklů  *Spiral milling*. Při obrábění jednotlivých bočních

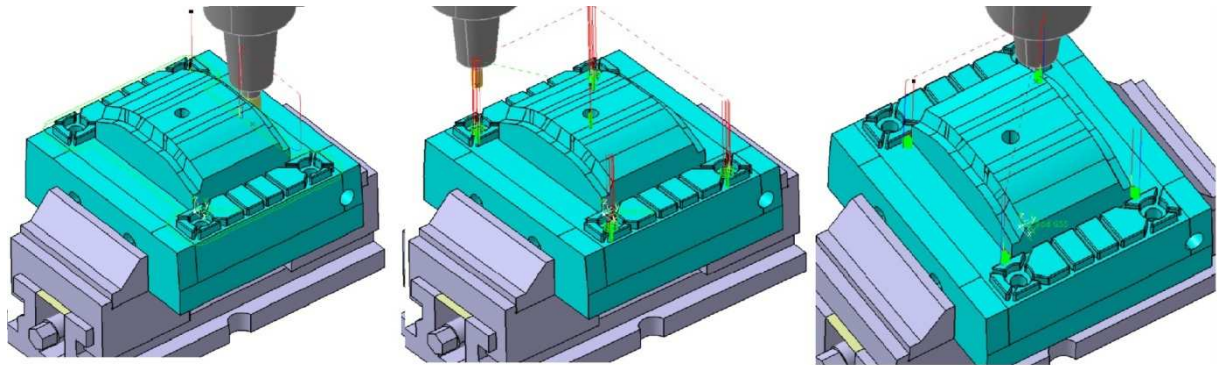
úkosových stěn se využila možnost pevného naklonění osy nástroje (tzv. indexované obrábění). Směr osy nástroje je vždy kolmý na obráběnou plochu. K obrábění byla použita tórusová fréza D10R0,5. Zde byla patrná první úspora času oproti variantě č.1., ve které byly úkosové plochy řádkovány cyklem  *Z-level*. Dále byla stejným nástrojem předdokončena s přídávkem 0,1 mm tvarová osazení po stranách zaoblené plochy. Zde byl použit cyklus  *Multi-axis curve machining* (víceosé frézování po křivce), přičemž byl nejdříve vykloněn nástroj (indexován) v ose Y a obráběla se celá spodní plocha osazení bokem nástroje na 3 vrstvy s radiálním přísuvem 0,3 mm. Nastavení indexace osy nástroje se provedlo v záložce *Tool-axis mode* a byla vybrána volba *Fixed axis* (obr. 33 uprostřed). Poté se využila namodelovaná pomocná plocha pomocí funkce  *Sweep*, kde byly jako vodící křivky označeny horní a spodní hranice plochy. Nastavení osy nástroje bylo provedeno volbou *Tangent axis*, přičemž jako tangentská plocha byla vybrána námi namodelovaná. Bok nástroje tak kopíroval izoparametricky vodící křivku s radiálním přísuvem po 0,3 mm ve 2 vrstvách (obr. 33 vpravo). Využitím tohoto cyklu se opět ušetřilo mnoho času oproti první variantě, kde byly tvarové výběry opět řádkovány po vrstevnicích cyklem  *Z-level*.









Obr. 33 První série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.2

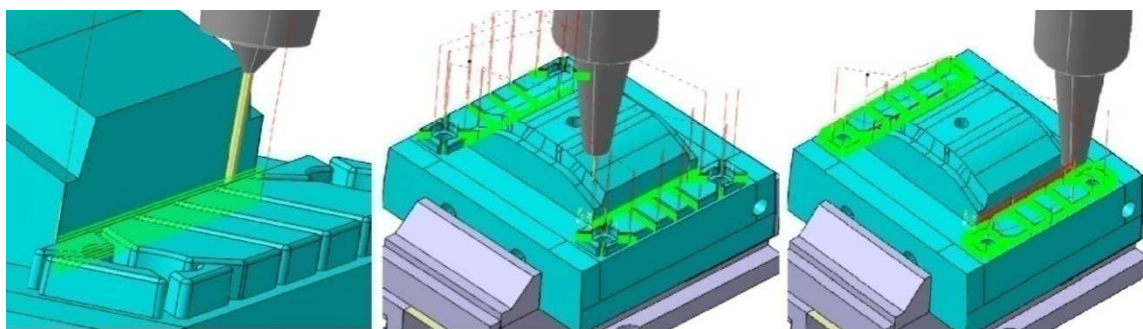
Další krok spočíval v dokončení horizontálních ploch a bočních úkosových stěn cyklem  *Spiral milling* stejným způsobem nastavení jako na obr. 33 vlevo, přičemž byl zvolen stejný typ nově použité tórusové frézy kvůli požadavku na lepší kvalitu povrchu při dokončování. Stejným nástrojem bylo provedeno obrábění tvarového osazení dvěma cykly  *Multi-axis curve machining*, kde byly nyní dokončeny dno a stěny osazení opět s využitím indexace a plynulého víceosého vedení nástroje (jako na obr. 33 uprostřed a vpravo). Dále byla tentýž nástrojem za použití cyklu  *Z-level* začištěna celá tvarová část kolem svého obvodu do výšky tvarových žebér (cca 5 mm ode dna), přičemž byly z části odstraněny zbytky v rozích mezi žebry a bočními úkosovými stěnami po předchozím cyklu  *Spiral milling* a byly předdokončeny krajní boční stěny tvarových žebér (oblast frézování viz obr. 34 vlevo). V dalším kroku byly předdokončeny tolerované díry H7 o průměru $D = 8\text{mm}$ s přídávkem 0,05 mm za pomoci cyklu  *Profile contouring* se stejným nastavením jako v první variantě. K tomu byla využita tórusová fréza D6R0,5. Se stejným nástrojem bylo pomocí 2D cyklu  *Profile contouring* předdokončeno 4x kruhové osazení v oblasti žebér s přídávkem 0,05 mm na stěnu (dle obr. 34 uprostřed). Poté byly zhotoveny 5x tolerované díry D8H7 cyklem  *Profile contouring*, který byl nastaven jako stejně v předchozí variantě

s korekcí na poloměr nástroje (zapnutí korekce v CATII – volba *2D radial profile*) - viz obr. 26 uprostřed. Následně byly odfrézovány zbytky v rozích mezi úkosovými stěnami a tvarovými žebry (náhrada hloubení elektrodou číslo 2 v první variantě). Na obr. 34 vpravo jsou vyznačeny oblasti, v nichž za pomoci tórusové frézy D3R0,2 a cyklu  *Z-level* s axiálním přísuvem 0,08 mm byla odstraněna významná část zbytkového materiálu do výšky tvarových žebor (5,1 mm).






Obr. 34 Druhá série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.2

Předposlední operace v této variantě spočívala v otevření drážek tvarových žebor. Jako poslední zbývá doobrobit tvarová žebra, jejichž tvar byl v první variantě doobroben jiskřením (elektrodou č. 1). Elektroda v první variantě byla nasazena zejména z důvodu špatné přístupnosti obrobení tvaru žebor frézami (vysoká boční úkosová stěna=18 mm). V této variantě (č. 2) byla k obrobení oblasti mezi žebrem a vysokou boční úkosovou stěnou (dle obr. 35 vlevo) použita tórusová mikrofréza D1,2R0,2 s odlehčením 18 mm. Následoval výběr vhodného cyklu. K výběru byly možnosti použít cyklus  *Z-level*,  *Profile contouring* a *Trochoid milling*. Jelikož se jedná o nástroj s malým průměrem a velkým odlehčením, byl by nástroj při frézování oblasti (otevření tvaru mezi žebrem a boční úkosovou stěnou) při použití cyklů  *Z-level* či  *Profile contouring* nadměrně zatížen velkým opásáním nástroje v řezu v plném materiálu. Tím by se jeho životnost značně zkrátila, nebo by musely být zvoleny méně výkonné řezné podmínky (snížit a_p , v_c , f_z). Proto byl zvolen k hrubování cyklus  *Trochoid milling* (trochoidní frézování), jenž je nově obsažen v NC modulu systému CATIA V5 R20. Tento cyklus generuje specifické dráhy nástroje, jenž umožňují využít maximálních řezných podmínek nástroje k zhotovení drážek do plného materiálu, neboť dochází k úběru materiálu zejména bokem nástroje s konstantním a_e . V našem případě byl cyklus  *Trochoid milling* využit k "otevření tvaru", ke zhotovení všech drážek mezi

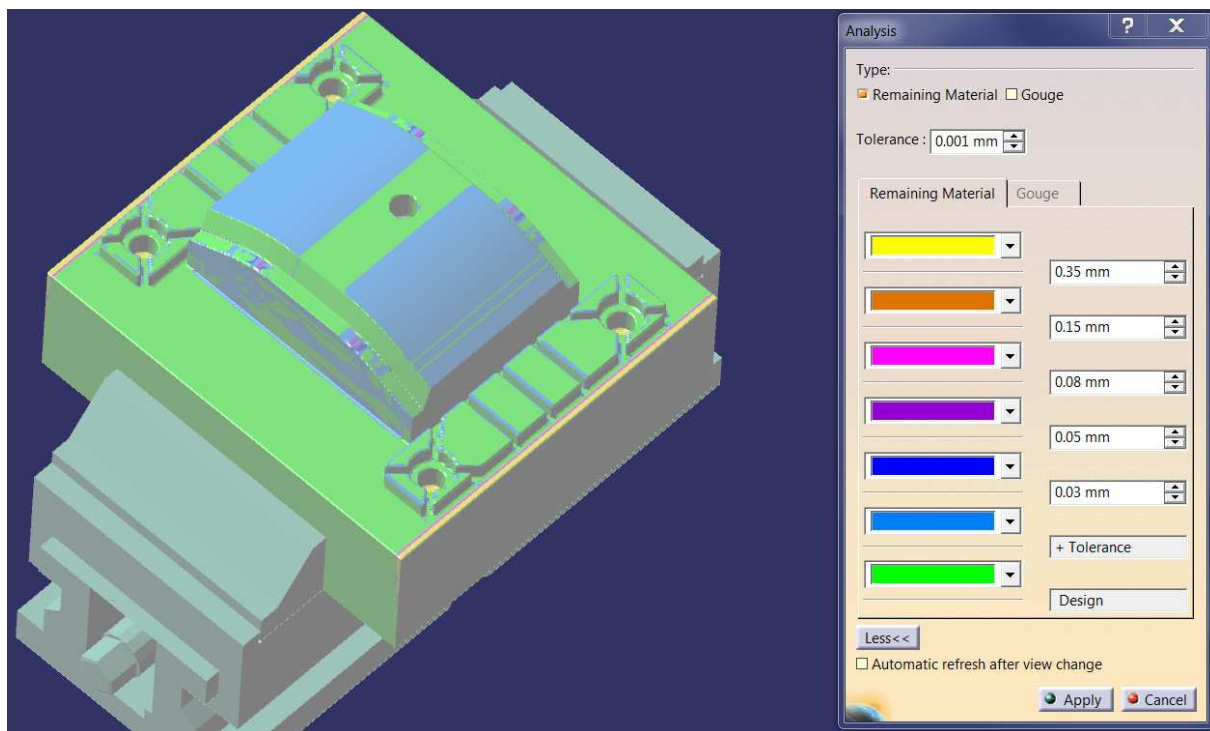


Obr. 35 Třetí série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.2

žebry s přídavkem 0,03 mm (obr. 35 uprostřed). K dokončení tvaru žebér (obrábění načisto) se jako nejvhodnější jevil cyklus  Z-level při použití nové tórusové frézy D1,2R0,2 též s odlehčením 18 mm, jímž byla obrobena najednou všechna tvarová žebra s bezpečným axiálním přísuvem 0,03 mm. Obr. 35 vpravo znázorňuje finální doobrobení tvaru cyklem  Z-level.

Protože je tvar součásti symetrický, bylo možné několik vypočtených drah z jednotlivých cyklů rotovat kolem osy Z pomocí funkce  Copy-transformation. Tím se značně ušetřil čas a usnadnila práce při nastavování parametrů v cyklech (např. výběr ploch, zadávání řezných podmínek, limitních kontur, aj.). Celkový čas obrábění vypočítaný systémem CATIA V5 činí 4,98 hod (299,05 min).

Na obr. 36 je vidět obroběný 3D model čelisti při distanční analýze po proběhnutí simulace obrábění celé součásti dle programu 210008x19po5AX. Z obr. 36 jsou patrná světle modrá místa, což značí dle tabulky zbytkový materiál v řádu několika tisícín milimetru a není nutné jim věnovat zvláštní pozornost. Vyskytuje se zde také barva růžová na vrcholcích radiusu (dna tvarového osazení) zastupující odchylku v toleranci 0,08mm od ideálního povrchu modelu. Důvodem je chyba grafického znázornění distanční analýzy, neboť následně provedenou kontrolou po simulaci cyklu, který danou plochu obrábí, byla v týž místech po distanční analýze naměřena odchylka v toleranci 0,01 mm. Výsledek obrábění lze tedy z hlediska kvality obroběné povrchu hodnotit jako uspokojivý.



Obr. 36 Distanční analýza po obrobění variantou č.2

5 Porovnání technologických variant

Obě navržené technologické varianty (třiosá, pětiosá) lze zhodnotit z několika hledisek. V následujícím textu bude zhodnocena ekonomická stránka výroby každé varianty. Jednotlivé podkapitoly obsahují postupné výpočty časové náročnosti výroby a finančních nákladů u jednotlivých variant. Poslední podkapitola pak obsahuje celkové zhodnocení a porovnání obou navržených technologií.

Jelikož nebylo možné prakticky odzkoušet navržené varianty, je jako hlavní ukazatel využit čas vygenerovaný systémem CATIA, který je ve většině případů navýšen o 30 % a to na základě zkušeností a doporučení CAM programátorů z firmy PHT. Důvodem pro toto navýšení je, že CATIA nezahrnuje při výpočtu doby obrábění rychloposuvy stroje. Dalším důvodem je odlaďování programu obsluhou při obrábění prvního kusu vyžadující navýšení času o 30 %. K době obrábění se dále připočítává čas nutný k upnutí obrobku a seřízení stroje (konkrétní časy uvedeny u jednotlivých postupů). Údaje ohledně nákladů na hodinu práce stroje či cen materiálů a nástrojů poskytla firma PHT z vlastních interních evidencí a výpočtů.

Pro obě varianty je společné obrábění frézováním před kalením, ke kterému je použito stejného stroje a nástrojů, a je tedy stejná i časová náročnost a nákladovost. Výpočet potřebného času na toto obrábění je proto uveden níže a v dalších jednotlivých podkapitolách již není zmiňován.

Frézování před kalením

| Položka | Hodnota |
|----------------------------------|------------|
| Čas frézování před kalením | 42,6 min |
| Čas upnutí obrobku | 20 min |
| Čas seřízení stroje | 10 min |
| Hodinové náklady na práci stroje | 800 Kč/hod |

Tab. 1 Vstupní údaje pro výpočet - frézování před kalením

Celkový čas frézování před kalením

$$0,71 * 1,3 + 0,167 + 0,333 = \underline{1,42 \text{ hod}}$$

Celkové náklady frézování před kalením

$$1,42 * 800 = \underline{1\,136 \text{ Kč}}$$

Použité nástroje

| Druh nástroje | Cena za ks (Kč) | Spotřebované množství (ks) | Cena za použité nástroje (Kč) |
|------------------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|
| D32_7792VXD09SA032Z3R43 | 5308 | 1 | 5308 |
| VBD_XDLW090408SR-D | 271 | 3 | 813 |
| D6 R0.5 L20_AFH50146-060A | 485 | 1 | 485 |
| Celkové náklady na nástroje | | | 6606 |

Tab. 2 Výpočet nákladů na nástroje - frézování před kalením

5.1 Varianta č. 1

U varianty č. 1 se musí vzít v úvahu celková spotřeba času a materiálu při výrobě elektrod, erodování a frézování po kalení. Nedílnou součástí nákladů na tuto variantu představují i cenové náklady na spotřebované nástroje. Následující text obsahuje výpočty časové náročnosti a nákladnosti jednotlivých kroků. V této variantě byly uvažovány stroje, kterými firma PHT skutečně disponuje.

5.1.1 Výroba elektrod

Náklady na výrobu elektrody se skládají z nákladů na práci stroje, které zahrnují opotřebením stroje a náklady na pracovníka obsluhy, a nákladů na materiál. Při výrobě prvního kusu elektrod (č. 1 a č. 2) je nutno připočíst 30 % ke strojnímu času zjištěného na základě výpočtu systémem CATIA, jak bylo zmíněno výše. Dále je nutno započítat i čas pro upnutí obrobku a pro seřízení stroje (elektrody jsou vždy upínány do přípravku upínacího systému 3R po 2 kusech).

Následující tabulka obsahuje údaje potřebné pro vypočtení celkového času na výrobu elektrod, nákladů na práci stroje a spotřebovaný materiál na výrobu obou druhů elektrod. Využité nástroje jsou uvedeny v podkapitole 5.1.4.

| Položka | Hodnota |
|--|-----------------------------|
| Čas výroby 1 ks elektrody č. 1 | 59,75 min |
| Čas výroby 1 ks elektrody č. 2 | 7,58 min |
| Čas upnutí obrobku | 5 min |
| Čas seřízení stroje | 20 min |
| Hodinové náklady na práci stroje | 900 Kč/hod |
| Spotřebovaný materiál na výrobu elektrody č. 1 | 0,189 dm ³ /ks |
| Spotřebovaný materiál na výrobu elektrody č. 2 | 0,03125 dm ³ /ks |
| Cena materiálu | 1475 Kč/dm ³ |

Tab. 3 Vstupní údaje pro výpočet - výroba elektrod

Elektroda č. 1

Celkový čas výroby 4 elektrod č. 1

$$(59,75 * 1,3) + (3 * 59,75) + 2 * 5 + 20 = \underline{286,925 \text{ min (4,78 hod)}}$$

Celkové náklady na práci stroje

$$4,78 * 900 = \underline{4\,303,9 \text{ Kč}}$$

Celkové náklady na spotřebovaný materiál na výrobu 4 elektrod č. 1

$$0,189 * 4 * 1475 = \underline{1\,115,1 \text{ Kč}}$$

Elektroda č. 2

Celkový čas výroby 4 elektrod č. 2

$$(7,58 * 1,3) + (3 * 7,58) + 2 * 5 + 20 = \underline{62,6 \text{ min (1,04 hod)}}$$

Celkové náklady na práci stroje

$$1,04 * 900 = \underline{939 \text{ Kč}}$$

Celkové náklady na spotřebovaný materiál na výrobu 4 elektrod č. 2

$$0,03125 * 4 * 1475 = \underline{184,375 \text{ Kč}}$$

5.1.2 Frézování po kalení

V případě frézování po kalení je opět z důvodu odlaďování nutno započítat navýšení strojního času o 30 %. Seznam použitých nástrojů včetně jejich cen je uveden v podkapitole 5.1.4.

| Položka | Hodnota |
|----------------------------------|--------------------|
| Čas frézování | 2,75 hod (165 min) |
| Čas upnutí obrobku | 20 min |
| Čas seřízení stroje | 30 min |
| Hodinové náklady na práci stroje | 1 000 Kč/hod |

Tab. 4 Vstupní údaje pro výpočet - frézování po kalení, varianta č. 1

Celkový čas frézování po kalení

$$165 * 1,3 + 20 + 30 = \underline{264,5 \text{ min (4,4 hod)}}$$

Celkové náklady na práci stroje

$$4,4 * 1 000 = \underline{4 400 \text{ Kč}}$$

5.1.3 Elektroerozivní hloubení

Oproti předchozím případům není čas potřebný pro elektroerozivní hloubení vygenerován skrze systém CATIA, ale byl zjištěn odhadem na základě zkušeností odborných pracovníků ve firmě PHT. Tento čas odpovídá skutečnému času elektroerozivního hloubení a tak není nutné navyšovat tento čas o 30 %.

| Položka | Hodnota |
|----------------------------------|-----------------|
| Čas elektroerozivního hloubení | 3 hod (180 min) |
| Čas upnutí obrobku | 20 min |
| Čas seřízení stroje | 40 min |
| Hodinové náklady na práci stroje | 900 Kč/hod |

Tab. 5 Vstupní údaje pro výpočet - elektroerozivní hloubení

Celkový čas elektroerozivního hloubení

$$180 + 20 + 40 = \underline{240 \text{ min (4 hod)}}$$

Celkové náklady na práci stroje

$$4 * 900 = \underline{3 600 \text{ Kč}}$$

5.1.4 Náklady na nástroje první varianty

U varianty č. 1 byly využity nástroje uvedené v následující tabulce, která obsahuje údaje i o jejich cenách získané z ceníku dodavatele firmy PHT. Ceny musely být přepočteny na koruny, při čemž byl použit orientační kurz 25 Kč/Eur. Jelikož nebylo možné prakticky ověřit obrábění a s ním související opotřebení nástrojů, je uvažováno, že nástroj je zcela upotřeben při výrobě. Ze stejného důvodu a zároveň z lepší srovnatelnosti obou variant je tento předpoklad uvažován také u použitých nástrojů varianty č. 2.

| | Typ nástroje | Cena za ks (Kč) | Spotřebované množství (ks) | Cena za použité nástroje (Kč) |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|
| Výroba elektrod | D8R0 L50_B5645.391 | 1925 | 1 | 1925 |
| | D4R0 L40_B5640.220 | 1525 | 1 | 1525 |
| | D6R0,5 L50_B7284.300 | 1750 | 1 | 1750 |
| | D2R1 L16_B5786.140 | 1025 | 2 | 2050 |
| Frézování po kalení | D10 R0.5 L22_D5259.450 | 1850 | 2 | 3700 |
| | D12 R2_AFH50746-120 R2.0 | 1390 | 1 | 1390 |
| | D6 R0.5 L13_D5259.300 | 1058 | 2 | 2116 |
| | D3 R1.5 L9_D5792.180 | 978 | 1 | 978 |
| Celkové náklady na nástroje | | | | 15 434 |

Tab. 6 Výpočet nákladů na nástroje - varianta č. 1

5.2 Varianta č. 2

U varianty č. 2 po kalení je množství výpočtů menší. Zde je nutné zahrnout pouze čas obrábění a náklady na použité nástroje (náklady na frézování před kalením jsou totožné pro obě varianty). Zatímco u první varianty byly použity stroje, jež firma PHT skutečně vlastní, u této varianty je uvažováno pronajmutí pětiosého obráběcího centra Hermle C22 z kooperace, jelikož firma PHT nedisponuje žádným strojem umožňujícím plynulé pětiosé frézování a ředitel firmy nechce prozatím do pětiosé technologie investovat. Uvažované hodinové náklady na práci stroje v kooperaci tak obsahují náklady na pronajmutí stroje a na mzdy pracovníka a jsou uvažovány ve výši 1500 Kč/hod.

5.2.1 Frézování po kalení

Stejně jako v první variantě, i zde se musí uvažovat navýšení strojního času o 30 %. Nástroje použité při výrobě dle varianty č. 2 jsou shrnuty dále v textu. Jak již bylo zmíněno výše, i zde je uvažován předpoklad plné upotřebitelnosti využitých nástrojů.

| Položka | Hodnota |
|----------------------------------|-----------------------|
| Čas frézování po kalení | 4,98 hod (299,05 min) |
| Čas upnutí obrobku | 20 min |
| Čas seřízení stroje | 30 min |
| Hodinové náklady na práci stroje | 1 500 Kč/hod |

Tab. 7 Vstupní údaje pro výpočet - frézování po kalení, varianta č. 2

Celkový čas frézování po kalení

$$299,05 * 1,3 + 20 + 30 = \underline{438,8 \text{ min (7,3 hod)}}$$

Celkové náklady na práci stroje

$$7,3 * 1\,500 = \underline{10\,950 \text{ Kč}}$$

5.2.2 Náklady na nástroje druhé varianty

| | Typ nástroje | Cena za ks (Kč) | Spotřebované množství (ks) | Cena za použité nástroje (Kč) |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|-------------------------------|
| Frézování po kalení | D12 R2_AFH50746-120 R2.0 | 1390 | 1 | 1390 |
| | D10 R0.5 L22_D5259.450 | 1850 | 2 | 3700 |
| | D6 R0.5 L13_D5259.300 | 1058 | 2 | 2116 |
| | D3 R0.2 L15_X6534.180 | 1007 | 1 | 1007 |
| | D1.2 R0.2 L18_X6742.108 | 1438 | 2 | 2876 |
| Celkové náklady na nástroje | | | | 11 089 |

Tab. 8 Výpočet nákladů na nástroje - varianta č. 2

5.3 Technicko-ekonomické hodnocení

Z výše vypočtených hodnot časové náročnosti, potažmo nákladovosti (tj ekonomického hlediska), je patrné, že mezi jednotlivými variantami existují značné rozdíly. Technologický postup varianty č. 2 vychází z výpočtů výhodněji a to na základě všech uvažovaných ekonomických hledisek.

Celková doba potřebná ke zhotovení tvarové části čelisti dle varianty č. 1 (tj. kombinace tříosého frézování a elektroerozivního hloubení) činí 15,64 hod, zatímco druhá varianta (tj. kombinace technologie víceosého frézování a mikrofrézování) dokáže vyrobit stejný výrobek za 8,72 hod, tedy o téměř polovinu rychleji a tím ušetřit náklady na práci stroje.

Z hlediska nákladovosti opět vychází výhodněji varianta č. 2. Celkové výrobní náklady u varianty s víceosým frézováním činí 23 175 Kč. Celkové náklady varianty č. 1 dosahují výše 31 112 Kč, což je způsobeno nutností použití více strojů a nástrojů ke zhotovení finálního výrobku. Ve srovnání s druhou variantou se musí navíc vyrobit elektrody a pomocí nich pak doobrobit tvarovou část do konečné podoby.

Rozdíly mezi oběma variantami jsou lépe viditelné z tabulky na následující stránce, kde jsou porovnány jak celkové časy potřebné pro tvorbu tvarové části čelisti, tak celkové výrobní náklady (náklady na materiál, na práci stroje, atd.). V položce nástroje jsou zahrnuty celkové náklady na veškeré nástroje použité v každé variantě, tzn. celkové náklady na nástroje použité při frézování před a po kalení (a při výrobě elektrod u varianty č. 1).

Z technického hlediska není určení vhodnější varianty zcela jednoznačné. Obě technologie totiž přinášejí různé výhody a nevýhody. Nevýhodou při použití varianty č.1 je k dokončení tvaru nutnost použít technologii elektroerozivního hloubení, kde je nutné znovu upínat obrobek. Tím je zvýšeno riziko vzniku nepřesností tvaru a rozměrů. Výhodou je samotná tvorba tříosé technologie v CATII, jež je pro CAM programátora jednodušší než-li programování cyklů ve víceosém modulu. Nevýhodou druhé varianty je, že obráběcí centra

umožňující víceosé obrábění nejsou tak rozšířené jako klasické stroje pro tříosou technologii a jejich pořízení není právě levnou záležitostí (víceosé frézovací centrum je cca. dvakrát tak dražší než tříosé). Zároveň jsou kladeny vyšší finanční nároky na pořízení hardwaru a softwaru umožňující jejich naprogramování. Hlavní výhodou investice do víceosé technologie je možnost obrobit součást na jedno upnutí ze všech pěti stran, čímž odpadají operace vyžadující přeupínání obrobku. Tím se minimalizuje možnost vzniku chyb a nepřesností při výrobě a celkově se zefektivní technologie výroby, což by bylo pro firmu PeHToo, a.s. jistým přínosem. Při rozhodování o volbě konkrétní varianty je tedy nutno vzít v úvahu všechna výše uvedená hlediska.

| | Varianta č. 1 (tříosá) | Varianta č. 2 (víceosá) |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Celková časová náročnost | 15,64 hod | 8,72 hod |
| Frézování před kalením | 1,42 hod | 1,42 hod |
| Výroba elektrod | 5,82 hod | - |
| Frézování po kalení | 4,4 hod | 7,3 hod |
| Elektroerozivní hloubení | 4 hod | - |
| Celkové výrobní náklady | 37 718 Kč | 29 781 Kč |
| Frézování před kalením | 1 136 Kč | 1 136 Kč |
| Výroba elektrod | 6 542 Kč | - |
| Frézování po kalení | 4 400 Kč | 10 950 Kč |
| Elektroerozivní hloubení | 3 600 Kč | - |
| Nástroje | 22 040 Kč | 17 695 Kč |

Tab. 9 Porovnání technologických variant

6 Závěr

Cílem této práce bylo navržení dvou variantních technologií obrábění části vstříkovací formy a jejich následné porovnání a zhodnocení z různých hledisek. Navržené varianty se týkaly obrobení tvarové části čelisti, přičemž bylo uvažováno obrábění před kalením a po kalení. Pro první variantu se uvažovaly stroje skutečně vlastněné firmou PeHToo, a.s., zatímco u druhé varianty bylo předpokládáno pronajmutí víceosého frézovacího centra. Obě technologie byly zpracovány v CAD/CAM systému CATIA V5 a jsou obsaženy spolu s vygenerovanými NC programy v el. příloze na CD.

V první variantě bylo uvažováno tříosé obrábění s následným dokončováním nepřístupných míst pomocí technologie elektroerozivního obrábění. K tomu bylo zapotřebí nejprve namodelovat elektrody a poté jejich tvar obrobít. Celkový čas potřebný pro zhotovení tvarové části čelisti se tak značně prodloužil a dle výpočtů by výroba dle varianty č. 1 trvala přibližně 15,64 hod. Náklady na výrobu byly spočteny pomocí údajů o hodinových nákladech na práci stroje, o cenách spotřebovaného materiálu a použitých nástrojů zjištěné z interní evidence firmy PeHToo. Celkové náklady pro variantu č. 1 činily 37 718 Kč, což bylo způsobeno jak delším časovým vytižením strojů, tak i větším množstvím potřebných nástrojů. Výhodou této varianty je snazší tvorba technologie při nastavování obráběcích cyklů v CAD/CAM systému CATIA V5. Naopak nevýhodou je nutnost opakovaného upnutí obrobku (na EDM hloubící stroj) při dokončování tvaru, což může vést k případným nepřesnostem rozměrů a tvaru.

U druhé varianty byla aplikována víceosá technologie spolu s technologií mikrofrézování. K naprogramování drah nástrojů byl využit modul víceosého frézování CAD/CAM systému CATIA V5. Využitím víceosé technologie se dosáhlo úspory času oproti tříosé technologii. Konkrétně se došlo při výpočtu celkové potřebné doby potřebné k obrobení součásti do požadovaného tvaru k výsledku 8,72 hod. s náklady 29 781 Kč. Mezi hlavní výhody ve srovnání s variantou č. 1 patří možnost zhotovení tvaru po kalení na jedno upnutí, což zajistí větší rozměrovou a tvarovou přesnost finálního výrobku. Nevýhodou představuje náročnější nastavení cyklů víceosého modulu v CAD/CAM systému CATIA V5, což vyžaduje větší praktické zkušenosti CAM programátora s jejich správným nastavením.

Na základě výše uvedených výsledků bych doporučil variantu č. 2, neboť s její pomocí lze dosáhnout větší ekonomické efektivity při stejné kvalitě obrobení.

Literatura

Monografie:

- [1] JANDEČKA, K., ČESÁNEK, J., KOŽMÍN, P. : *Programování NC strojů*. Plzeň: ZČU, 2000.
- [2] JANDEČKA, K. *Využití moderních CAD/CAM systémů při programování NC strojů*. Plzeň : ZČU, 1996.
- [3] RAJCHART, P., SOVA, F., ČESÁNEK, J., VYŠATA, J. *Geometrické modelování a obrábění tvarově složitých součástí*. Plzeň : ZČU, Grant GR 215, 1994.
- [4] FABIAN, Michal; SPIŠÁK, Emil. *Navrhování a výroba s pomocí CA.. technologií*. Brno : CCB, 2009. 398 s. ISBN 978-80-85825-65-7.
- [5] VALENTOVÁ, A. *Diplomová práce - Optimalizace technologie obrábění formy*. ZČU, Plzeň : 2008

Internetové zdroje:

- [1] PEHTOO, *Domovské stránky společnosti*. <http://www.pehtoo.com>
- [2] LENFELD, P. *Technologie II – Vstřikování plastů*, Liberec: TU
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [3] MM PRŮMYSLOVÉ SPECTRUM. *Vstřikovací formy v systému Catia*
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vstrikovaci-formy-v-systemu-catia.html>
- [4] MM PRŮMYSLOVÉ SPECTRUM. *Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek*
<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapusstek.html>
- [5] DELCAM. *Víceosé frézování*. <http://www.frezovani-5os.cz/clanky/>
- [6] DIGITOVÁRNA.CZ. *Mikrofrézování oceli - zdroj úspor*
<http://www.digitovarna.cz/clanek-84/mikrofrezovani-oceli-zdroj-uspor.html>
- [7] CAXMIX. *Jak funguje mikrofrézování od Cimatronu*
<http://www.caxmix.cz/2011/03/28/jak-funguje-mikrofrezovani-od-cimatronu/>
- [8] MM PRŮMYSLOVÉ SPECTRUM. *Nekonvenční metody obrábění*
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni.html>

Další zdroje:

- [9] *Automatizace tvorby NC programů*. Doc.Ing. Janděčka, Karel, CSc. Plzeň : autor neznámý, 2009. 5.přednáška.

Seznam obrázků

| | |
|--|--------|
| Obr. 1 Firemní logo (vlevo), pohled na nástrojárnu (vpravo)..... | - 2 - |
| Obr. 2 Schéma vstřikovacího stroje | - 3 - |
| Obr. 3 Ukázka tvarových částí formy - tvárník (vlevo), tvárnice (vpravo)..... | - 3 - |
| Obr. 4 Sestava vstřikovací formy (vpravo), segmenty tvořící vstřikovací dutinu vlevo) | - 4 - |
| Obr. 5 Výroba forem a zápusťek | - 5 - |
| Obr. 6 Hrubování..... | - 6 - |
| Obr. 7 Dokončovací strategie..... | - 7 - |
| Obr. 8 Výhoda obrobení tvaru víceosým frézováním (vpravo) oproti klasickému (vlevo) . | - 8 - |
| Obr. 9 Ukázka mikrofrézování..... | - 9 - |
| Obr. 10 Schéma EDM hloubicího stroje | - 10 - |
| Obr. 11 Ukázka značení elektrody (vlevo), (vpravo) pohled upínací systém 3R | - 11 - |
| Obr. 12 Struktura komunikačních rozhraní..... | - 13 - |
| Obr. 13 Struktura CAD/CAM systémů | - 14 - |
| Obr. 14 Pracovní prostředí (workbench) NC modulu v CATIA V5..... | - 15 - |
| Obr. 15 Pohled na 3D model součásti | - 16 - |
| Obr. 16 Obráběcí centrum AXA VPC 40U..... | - 18 - |
| Obr. 17 Obráběcí centrum RÖEDERS RFM760 | - 18 - |
| Obr. 18 Obráběcí centrum RÖEDERS RFM1000 | - 18 - |
| Obr. 19 Obráběcí centrum HERMLE C22U | - 18 - |
| Obr. 20 Ukázka nastavení první a druhé záložky cyklu víceosého frézování po křivce..... | - 19 - |
| Obr. 21 Ukázka nastavení třetí, čtvrté a páté záložky cyklu víceosého frézování po křivce. - | - 20 - |
| - | |
| Obr. 22 Upnutí součásti - varianta č.1 před kalením..... | - 21 - |
| Obr. 23 Výsledek simulace obrobení tvaru před kalením | - 22 - |
| Obr. 24 Upnutí součásti - varianta č.1 po kalení..... | - 22 - |
| Obr. 25 První série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.1 | - 23 - |
| Obr. 26 Druhá série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.1 | - 24 - |
| Obr. 27 Distanční analýza po obrábění variantou č.1 | - 24 - |
| Obr. 28 Elektroda č.1 | - 26 - |
| Obr. 29 Distanční analýza obrobení elektrody č. 1 | - 26 - |
| Obr. 30 Elektroda č. 2 | - 27 - |
| Obr. 31 Rozložení elektrod (vpravo) elektroda č.1, (vlevo) elektroda č.2..... | - 28 - |
| Obr. 32 Upnutí součásti - varianta č.2 po kalení..... | - 29 - |
| Obr. 33 První série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.2 | - 30 - |
| Obr. 34 Druhá série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.2..... | - 31 - |
| Obr. 35 Třetí série použitých cyklů - Obrábění tvaru načisto - varianta č.2 | - 31 - |
| Obr. 36 Distanční analýza po obrobení variantou č.2 | - 32 - |

Seznam tabulek

| | |
|--|--------|
| Tab. 1 Vstupní údaje pro výpočet - frézování před kalením..... | - 33 - |
| Tab. 2 Výpočet nákladů na nástroje - frézování před kalením..... | - 33 - |
| Tab. 3 Vstupní údaje pro výpočet - výroba elektrod..... | - 34 - |
| Tab. 4 Vstupní údaje pro výpočet - frézování po kalení, varianta č. 1..... | - 35 - |
| Tab. 5 Vstupní údaje pro výpočet - elektroerozivní hloubení..... | - 35 - |
| Tab. 6 Výpočet nákladů na nástroje - varianta č. 1..... | - 36 - |
| Tab. 7 Vstupní údaje pro výpočet - frézování po kalení, varianta č. 2..... | - 36 - |
| Tab. 8 Výpočet nákladů na nástroje - varianta č. 2..... | - 37 - |
| Tab. 9 Porovnání technologických variant..... | - 38 - |

PŘÍLOHY K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Seznam příloh

- Příloha č. I Výrobní dokumentace varianty č.1 - frézování před kalením
- Příloha č. II Výrobní dokumentace varianty č.1 - po kalení
- Příloha č. III Výrobní dokumentace varianty č.2 - po kalení
- Příloha č. IV Výrobní výkres součásti

Přílohy na CD:

- Příloha č. 1 NC programy
- Příloha č. 2 Soubory z CAD/CAM systému CATIA V5 (model, technologie obrábění čelisti a elektrod)

PŘÍLOHA č. I

Výrobní dokumentace varianty č.1- frézování před kalením

PŘÍLOHA č. II

Výrobní dokumentace varianty č.1 - po kalení

PŘÍLOHA č. III

Výrobní dokumentace varianty č.2 - po kalení

