



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PRODUKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ TVAROVÝCH PLOCH

PRODUCTIVE MACHINING OF PROFILE SURFACES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Eva Šulcová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Eva Šulcová
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Chladil, CSc.
Akademický rok:	2019/20

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

Produktivní obrábění tvarových ploch

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Charakteristika CNC frézování a experimentální ověření.

Cíle bakalářské práce:

- Tvary a procesy obrábění frézováním .
- CNC obráběcí centra a řezné nástroje.
- Experimentální část.
- Technická zpráva.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje, Vyd. 1., Brno Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 1. část. Brno. 2003. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf. Syllabus. Vysoké učení technické v Brně.

KOČMAN, K. Technologické procesy obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. New York Oxford University Press. 2nd. edition. 2005. ISBN 0-19-514206-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou způsobu frézování tvarových ploch. Teoretická část práce obsahuje obecnou charakteristiku CNC frézování, CNC strojů a řezných nástrojů. V následující části experimentálního ověření se zabývá porovnáním dvou odlišných metod pro frézování tvarových ploch. V této části jsou popsány konkrétní tvarové plochy, volba strojů, volba a výroba řezných nástrojů, popis a realizace obou metod. V závěrečné části práce jsou shrnuty výsledky obou metod.

Klíčová slova

tvarové plochy, hliník, ponorné frézování, nástroj, 5-ti osé frézování

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on a method of milling shaped surfaces. As for the theoretical part, it contains general characteristics of CNC milling, CNC machines and cutting tools. The following part of the experimental verification deals with the comparison of two different methods for milling shaped surfaces. Having said that, it also describes specific shape surfaces, choice of machines, selection and production of cutting tools as well as description and implementation of both methods. The final part of the work summarizes the results of both methods.

Key words

shaped surfaces, aluminium, plunge milling, tool, 5-axis milling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠULCOVÁ, Eva. *Produktivní obrábění tvarových ploch* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124853>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Chladil, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Produktivní obrábění tvarových ploch** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.06.2020

Datum

.....
Eva Šulcová

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat firmě Chotěbořské strojírně, a.s. a jejím zaměstnancům, za možnost vypracování bakalářské práce a cenné rady.

Poděkování patří i mé rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 TVARY A PROCESY OBRÁBĚNÍ FRÉZOVÁNÍM.....	10
1.1 Technologie obrábění.....	10
1.2 Obrábění	10
1.3 Frézování	10
1.3.1 Válcové frézování	11
1.3.2 Tříosé frézování (3D)	12
1.3.2 Pětiosé frézování (5D)	13
2 CNC OBRÁBĚCÍ CENTRA	14
2.1 Definice CNC strojů.....	14
2.2 Schéma CNC obráběcího stroje a jeho popis.....	15
2.3 Režimy práce řídicího systému CNC obráběcích strojů	16
2.4 Souřadnicový systém CNC strojů.....	18
2.4.1 Kartézský souřadnicový systém.....	18
2.5 Vztažné body na CNC strojích	19
2.5.1 Nulové body CNC strojů.....	19
2.5.2 Referenční bod CNC stroje	19
2.5.3 Další vztažné body.....	19
2.6 CAD/CAM.....	20
3 ŘEZNÉ NÁSTROJE	21
3.1 Rozdělení	21
3.2 Upínání fréz.....	21
4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ	23
4.1 Volba materiálu	25
4.1.1 Slitiny hliníku	25
4.1.2 Slitina 3.3547	26
4.2 Volba strojů	26
4.2.1 Trimill VU 3019	26
4.2.2 MCFV 1680.....	27
4.3 Upnutí obrobku.....	28

4.4 Volba nástrojů	29
4.4.1 Frézy pro 5-ti osé frézování	29
4.4.2 Fréza pro 3 osé obrábění (ponorné frézování).....	29
4.4.2.1 Definice ponorného frézování	29
4.4.2.2 Výkresová dokumentace	31
4.4.2.3 Technologický postup výroby ponorné frézy	32
4.4.2.4 Vyrobenaá ponorná fréza.....	32
5 REALIZACE PROJEKTU	34
5.1 5-ti osé obrábění	34
5.2 3 osé frézování.....	36
TECHNICKÁ ZPRÁVA	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
SEZNAM PŘÍLOH	41

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je odzkoušení dvou technologií frézování tvarových ploch ve firmě Chotěbořské strojírně, a.s. Pro odzkoušení byl vybrán model spodního dílu vypěňovací formy z důvodu časté výroby ve firmě. Na tomto modelu se nacházejí podkosové plochy, které byly navrženy konstruktérem na žádost zákazníka kvůli designu. Tyto plochy se doposud obráběly na 5-ti osém CNC centru. Avšak vzhledem k provozním nákladům, vytíženosti a menšímu zastoupení těchto strojů se hledala metoda, která by umožnila obrábění tvarových ploch na 3 osých CNC centrech. Proto byla za druhou technologii zvolena metoda ponorného frézování.

První teoretická část se zaměřuje na obecnou charakteristiku CNC frézování, CNC stroje a řezné nástroje. Druhá část se zabývá odzkoušením obou metod. Dosažené výsledky jsou shrnuty v technické zprávě.

1 TVARY A PROCESY OBRÁBĚNÍ FRÉZOVÁNÍM

1.1 Technologie obrábění

Technologie obrábění jako vědní obor studuje, zkoumá a analyzuje vzájemné souvislosti a faktory obráběcího procesu jako integrální složky výrobního procesu strojírenských součástí. Obráběcí proces realizujeme v obráběcím systému, který lze obecně členit na subsystemy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Objektem obráběcího procesu je obrobek a základním výstupem obráběcího procesu jsou příslušné obrobené plochy [1].

1.2 Obrábění

Obrábění je technologický proces, při kterém je přebytečná část materiálu oddělována z obrobku ve formě třísky břitem řezného nástroje. Obrábění se uskutečňuje v soustavě stroj – nástroj – obrobek, kde stroj je zastoupen pouze symbolicky upínací částí.

Obrobek – obráběný nebo již částečně obrobený předmět.

Obráběná plocha – část povrchu obrobku, ze které je odebírán materiál.

Obrobená plocha – plocha vzniklá obrobením.

Řezná plocha – plocha vznikající těsně za břitem nástroje.

Obrábění lze rozdělit podle charakteristických znaků na:

- nástroje s definovanou geometrií (soustružení, frézování, vrtání, vystružování),
- nástroje s nedefinovanou geometrií (dokončovací metody – broušení, lapování, superfinišování),
- úpravy obrobených ploch (leštění, válečkování, hlazení) [2,3].

1.3 Frézování

Frézování patří mezi velmi rozšířené metody obrábění. Velký sortiment nástrojů a řada způsobů frézování umožňují dosáhnout široké škály jakosti obrobené plochy. Kromě geometrie nástroje a způsobu frézování je přesnost rozměrů a tvaru a jakost povrchu ovlivněna řadou dalších parametrů. Mezi tyto parametry patří řezné podmínky, přesnost seřízení nebo naostření nástroje, tuhost stroje atd. Frézování se využívá pro obrábění hranolovitých (prizmatických) rovinných, tvarových i rotačních ploch, pro obrábění drážek různých profilů i pro obrábění závitů a ozubení [2,4].

Při frézování je tříska odebírána břity rotujícího nástroje – frézou. Hlavní pohyb při frézování je rotační a vykonává ho nástroj. Vedlejší pohyb je posuv, který je obvykle přímočarý a vykonává ho obrobek. U moderních strojů jsou posuvy plynule měnitelné a mohou se realizovat ve více směrech zároveň (víceosá obráběcí centra). Řezný proces je přerušovaný, protože každý zub odřezává krátké třísky většinou proměnlivé tloušťky [2].

Z technologického hlediska se podle polohy osy nástroje k obráběné ploše rozlišuje frézování [2]:

- válcové – obvodem nástroje – osa nástroje je rovnoběžná s obráběnou plochou,
- čelní – čelem nástroje – osa nástroje je kolmá na obráběnou plochu, hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje.

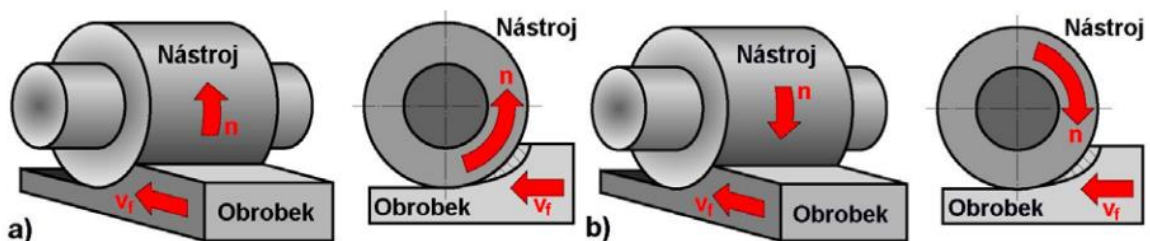
Od těchto základních způsobů se rozlišují další způsoby frézování, mezi které patří okružní frézování a planetové frézování. Okružním i planetovým frézování lze obrábět vnější i vnitřní válcové plochy [2].

1.3.1 Válcové frézování

Během válcového frézování se využívají válcové a tvarové frézy. Zuby jsou pouze po obvodu nástroje, hloubka řezu se nastavuje v rovině kolmé na osu frézy a na směr posuvu. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení. V závislosti na smyslu otáčení nástroje rozlišujeme dva druhy válcového frézování, sousledné a nesousledné frézování [2].

Při nesousledném frézování je smysl rotace nástroje proti směru posuvu obrobku (obr. 1.1a). Obrobená plocha vzniká při vnikání nástroje do obrobku. Tloušťka třísky se postupně mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. K oddělování třísky nedochází v okamžiku její nulové tloušťky, ale po určitém skluzu břitu po ploše vytvořené přecházejícím zubem. Přitom vznikají silové účinky a deformace způsobující zvýšené opotřebení břitu. Řezná síla při nesousledném frézování má složku, která působí směrem nahoru a odtahuje obrobek od stolu nástroje. Mezi výhody nesousledného frézování patří: trvanlivost nástroje nezávisí na okujích, záběr zubů frézy při jejich vřezávání nezávisí na hloubce řezu [1].

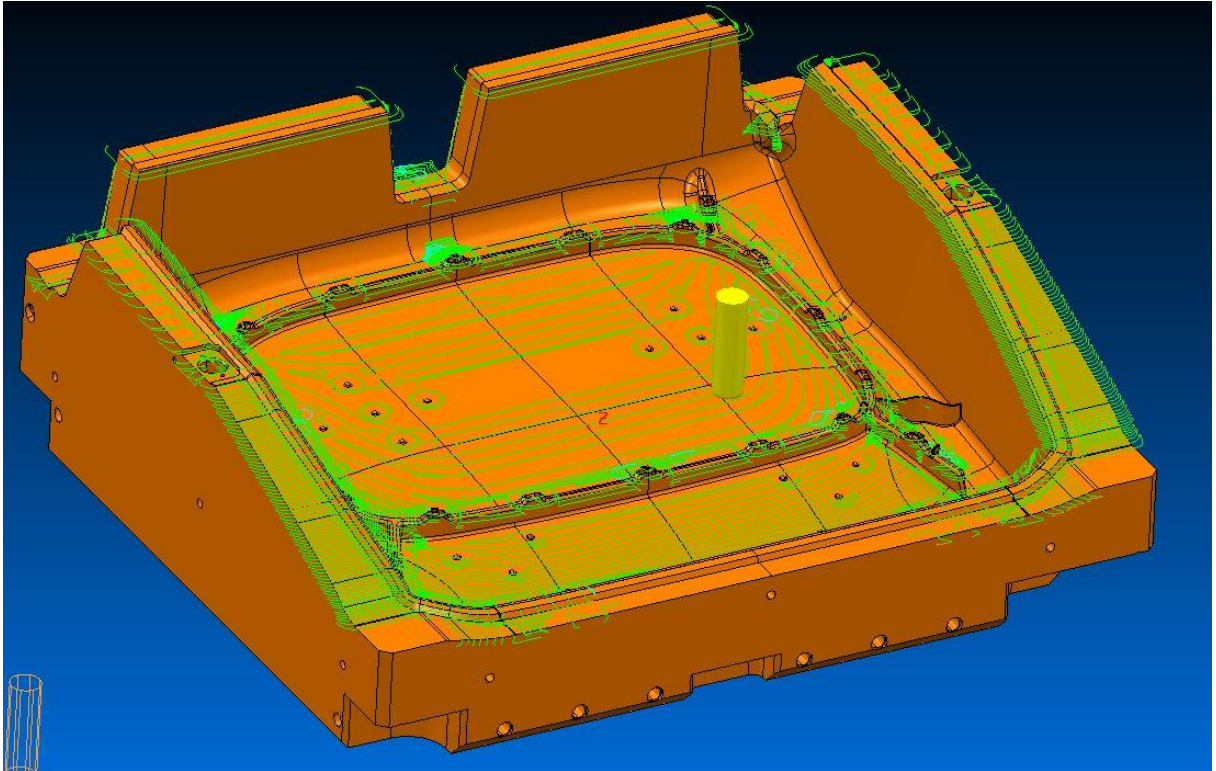
Sousledné frézování má smysl rotace nástroje ve směru posuvu obrobku (obr. 1.1b). Maximální tloušťka třísky vzniká při vnikání zubu frézy do obrobku. Obrobená plocha se vytváří, když zub vychází ze záběru. Řezné síly působí obvykle směrem dolů, proti stolu stroje. Sousledné frézování může probíhat pouze na přizpůsobeném stroji. Výhody při sousledném frézování: vyšší trvanlivost břitů, menší potřebný řezný výkon, menší drsnost obrobeného povrchu [1].



Obr.1.1 Válcové frézování [1]. a) nesousledné frézování, b) sousledné frézování.

1.3.2 Třiosé frézování (3D)

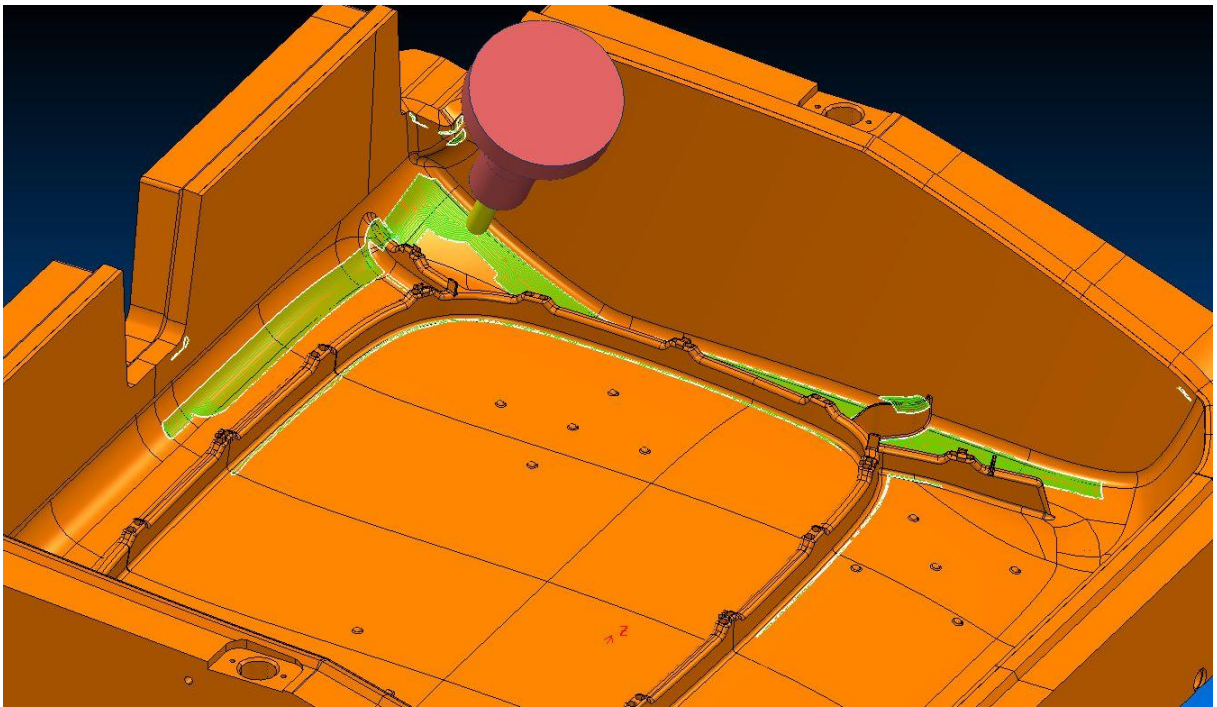
Třiosé frézování (obr. 1.2) je určeno pro 3D frézování forem, zápustek, lisovacích nástrojů a tvarově složitých součástí. Sada operací umožňujících hrubování, zbytkové hrubování a dokončování pokrývá komplexně problematiku tvarového frézování. Dokončovací strategie dovolují oddělené obrábění strmých a mělkých oblastí. Definice výsledné kvality povrchu pro zadání kroku řádkování zefektivní výpočet drah nástroje [5].



Obr. 1.2 Třiosé frézování.

1.3.2 Pětiosé frézování (5D)

Pětiosé frézování (obr. 1.3) je určeno pro pokročilé obrábění programování pětiosých CNC obráběcích strojů. Umožňuje rychlé a přesné obrábění součástí především pro letecký a automobilový průmysl, energetiku nebo výrobu forem. Dovoluje obrábění negativních stěn, které jsou mnohdy ve 3D problematické a redukuje počet obráběcích upnutí, čímž zkracuje a zlevňuje obrábění součástí. Pomocí pětiosého frézování lze obrábět hluboké a strmé tvary. Tangenciální obrábění bokem nástroje výrazně šetří obráběcí čas oproti klasickému tříosému řádkování [5].



Obr. 1.3 Pětiosé frézování

2 CNC OBRÁBĚCÍ CENTRA

2.1 Definice CNC strojů

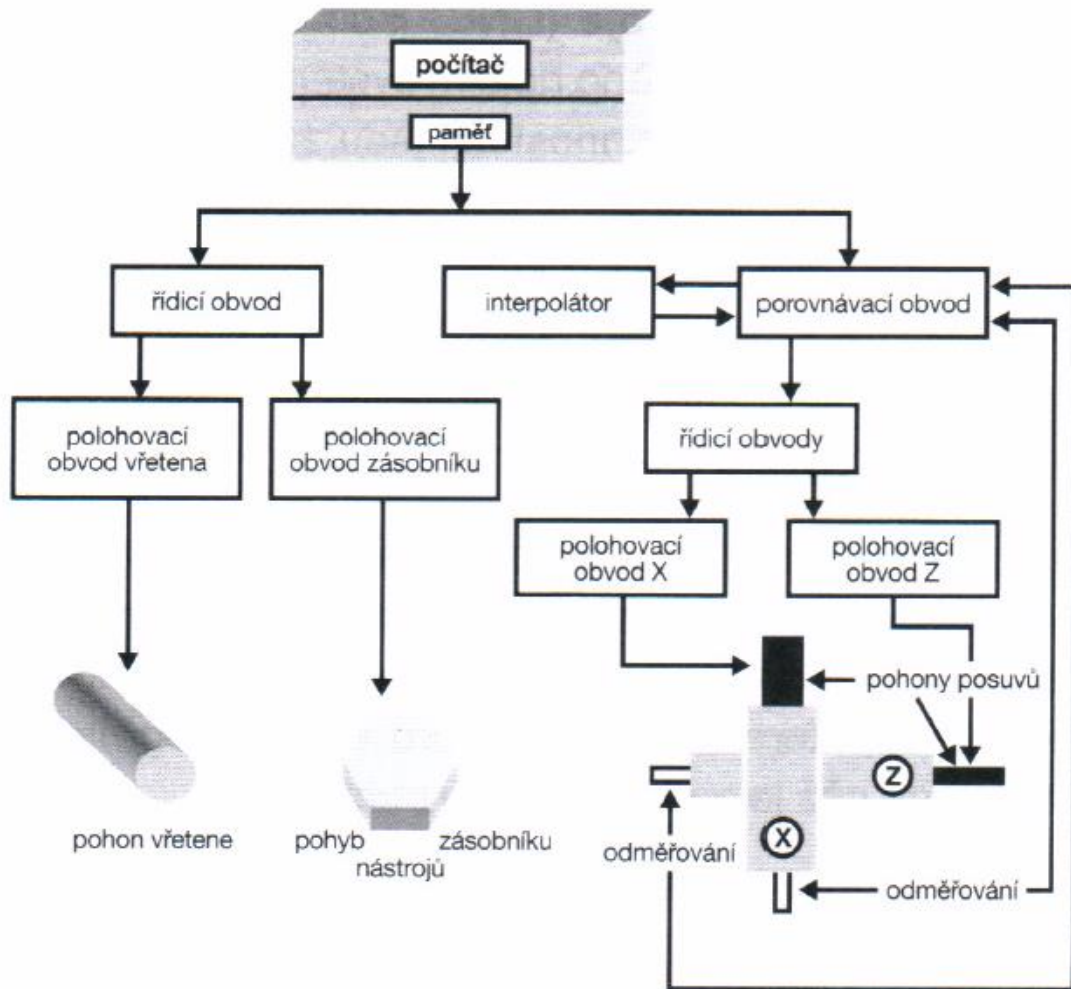
Název CNC stroj vyplývá z anglického výrazu Computer Numerical Control. V českém překladu toto označení značí: počítačem (číslicově) řízený (stroj). Za předchůdce CNC strojů jsou považovány NC stroje (Numerical Control), které byly jako první řízeny řídicím systémem.

CNC stroje jsou charakteristické tím, že ovládání pracovních funkcí stroje je prováděno řídicím systémem pomocí vytvořeného programu. Informace o požadovaných činnostech jsou zapsány v programu pomocí alfanumerických znaků. Vlastní program je dán posloupností oddělených skupin znaků, které se nazývají bloky nebo věty. Program je určen pro řízení silových prvků stroje a zaručuje, aby proběhla požadovaná výroba součástí.

Informace, které program obsahuje, lze rozdělit na:

- Geometrické – Popisují dráhy nástroje, které jsou dány rozměry obráběné součásti, způsoby jejího obrábění a popisují příjezd a odjezd nástroje k obrobku a od něho.
- Technologické – Stanovují technologii obrábění z hlediska rezných podmínek (otáčky nebo rezná rychlost, posuv, případně hloubka třísky).
- Pomocné – Informace, povely pro stroj pro určité pomocné funkce (např. zapnutí čerpadla chladící kapaliny, směr otáček vřetene) [6].

2.2 Schéma CNC obráběcího stroje a jeho popis



Obr. 2.1 Blokové schéma CNC obráběcího stroje [6].

Počítač – Průmyslový počítač s nainstalovaným řídicím systémem, který je součástí stroje. Z hlediska obsluhy je dán obrazovkou a ovládacím panelem.

Řídící obvody – V těchto obvodech se logické signály převádějí na silnoproudé elektrické signály, kterými se přímo ovládají jednotlivé části stroje – motory vřetene a posuvů, ventily atd.

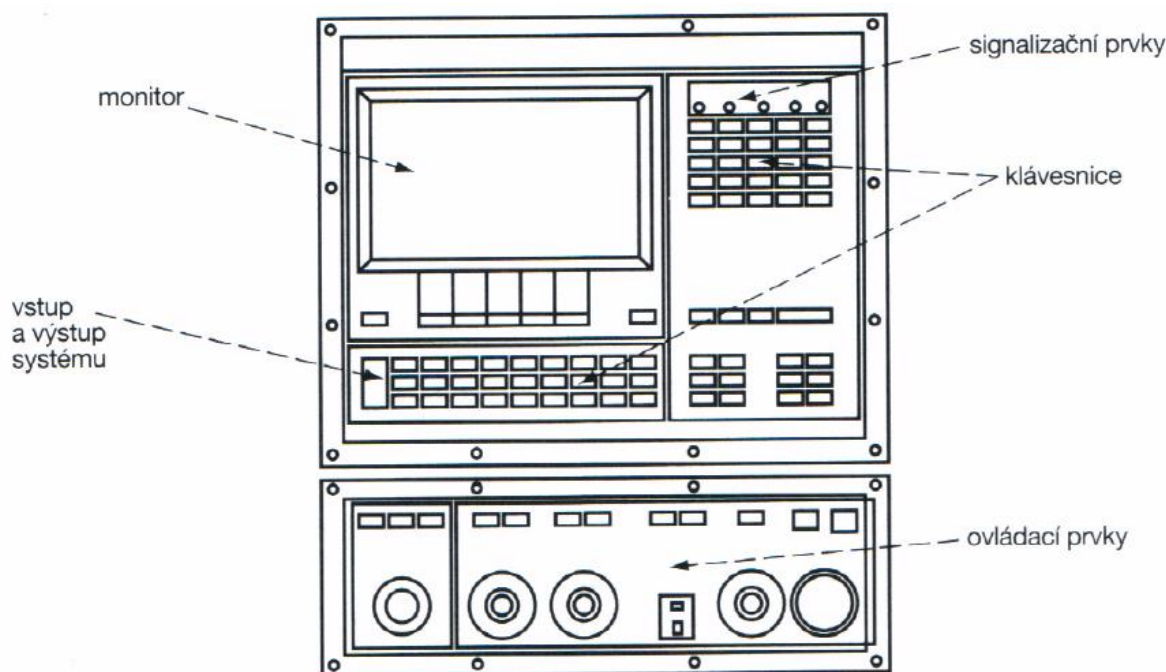
Interpolátor – Řeší dráhu nástroje, která je zadána geometrií, a výpočty délkových a rádiusových korekcí nástroje.

Porovnávací obvod – Stroj musí být vybaven zpětnou vazbou, která přenáší informace o dosažených geometrických hodnotách suportů v souřadných osách, v jednotlivých bodech dráhy pohybu [6].

Řídící panel se dělí na několik částí, lišících se svým významem [6]:

- vstup dat – část alfanumerická, pomocí níž se ručně zapisuje např. program, data o nástrojích, o seřízení stroje;

- ovládání stroje – část speciální, pomocí které se pohybuje nástrojem nebo obrobkem, spouští se otáčky vřetene, ovlivňuje se ručně velikost posuvů, otáček;
- volba režimu práce – lze zvolit ruční režim, automatický režim, dílenské programování;
- aktivace paměti – vyvolání jednotlivých druhů pamětí;
- aktivace testů – vyvolání testů programu a testů stroje, simulace programů;
- obrazovka – slouží ke kontrole prováděných činností;
- přenosný panel – slouží k ovládání základních pohybových funkcí stroje.



Obr. 2.2 Ukázka řídicího panelu CNC stroje [6].

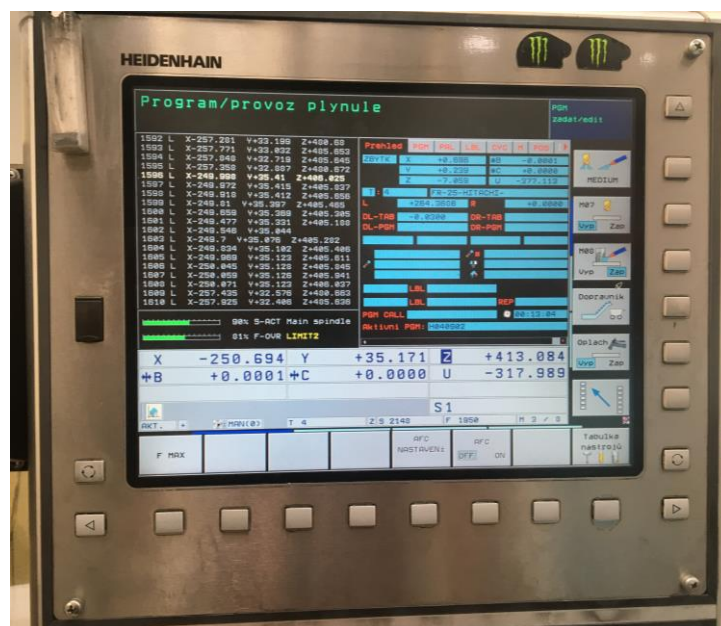
2.3 Režimy práce řídicího systému CNC obráběcích strojů

Řídicí systémy představují klíčovou součást CNC strojů. Aby mohl uživatel s řídicím systémem snadno komunikovat, má řídicí systém několik režimů, které jsou spojeny se specifickými obrazy. Výjimkou je základní režim MANUAL, který specifický obraz nemá. Režimy práce řídicího systému lze nastavit tlačítky na řídicím panelu CNC stroje [2].

Režimy řídicích systémů (nejčastější) [6]:

- Režim MANUAL (ruční provoz) – slouží k přestavení nástroje nebo měřícího zařízení do požadované polohy, k výměně nástroje, najíždění (posuvu) na obrobek, rozběh otáček.

- Režim AUTO (automatický – plynulé provádění programu) – stroj po zpracování bloku čte a zpracovává další blok automaticky – plynulý proces obrábění (obr. 2.3).
- Režim B-B (Blok po Bloku) stroj se po zpracování bloku zastaví a po znovu opakovaném startu čte a zpracovává další blok. Takto lze provést celé obrábění dle programu. Režim B-B slouží jako jedna z možností kontroly, zda byl správně tvořen CNC program.
- Režim TOOL MEMORY (paměť nástrojových dat) umožňuje uložit a vyvolat data o nástrojích, včetně korekcí. Název paměti může být rozličný, stejně tak zapisované údaje k nástrojům se mohou lišit svým názvem a množstvím. Nástroje v zásobníku mají v této „tabulce korekcí“ přiřazené údaje o velikosti korekcí a řídicí systém si je při použití daného nástroje načítá. Tento režim se obvykle nepoužívá u strojů s jedním nástrojem (výměna nástrojů se provádí ručně).
- Režim TEACH IN („učení se“ nebo „najatí a uložení“) – Obsluha provádí ručně (pomocí klávesnice) požadovanou činnost pro výrobu obrobku. Dochází k automatickému načítání úkonů do editoru. Takto zadané úkony se vykonávají automaticky při následném puštění CNC programu. Tento režim se používá výjimečně.
- Režim EDITACE programu – vlastní zapisování programu pro obrábění se zapisuje přímo do editoru na stroji nebo je „nahrán“ do řídicího systému externě (z počítače, po síti). V editoru se mohou programy dle potřeby opravovat či upravovat.
- Režim DIAGNOSTIKY – oznamuje, lokalizuje, diagnostikuje závadu pro rychlé odstranění.



Obr. 2.3 Ukázka režimu AUTO.

2.4 Souřadnicový systém CNC strojů

Pro určení správné a přesné dráhy nástroje, musí být zaveden jednoznačně souřadný systém. Pro lepší programovatelnosti strojů byly stanoveny pravidla pro souřadné systémy a označování os u obráběcích strojů [6].

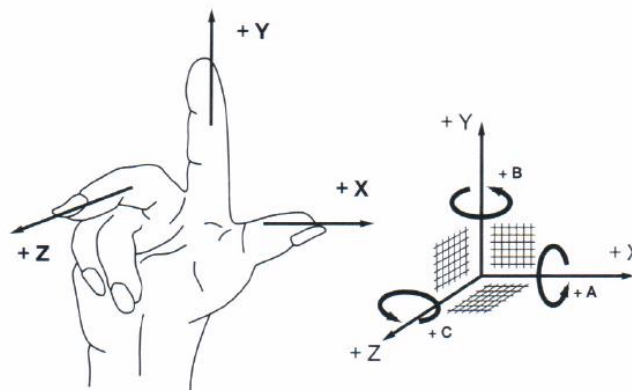
2.4.1 Kartézský souřadnicový systém

Většina výrobních strojů používají kartézský souřadnicový systém. Definice je dána normou ČSN ISO Terminologie os a pohybu. Tento systém je pravotočivý, pravouhlý se základními osami X,Y,Z, otáčivé pohyby, jejichž osy jsou rovnoběžné s osami X,Y,Z, se označují jako A,B,C. Platí, že osa Z je rovnoběžná s osou pracovního vřetene, přičemž kladný smysl probíhá od obrobku k nástroji. Hodnoty se vyskytují v záporném poli souřadnic.

Kartézský souřadnicový systém je nutný pro řízení stroje, nástroj se v něm pohybuje podle zadaných příkazů z řídicího panelu CNC stroje nebo dle příkazu uvedených ve spuštěném CNC programu. Je nutný také pro měření nástrojů. Podle potřeby lze souřadnicový systém posunovat a otáčet. V případě měření nástrojů (zjišťování korekcí) je umístěn v bodě výměny nástrojů nebo na špičce nástrojů [6].

Pravidla pro umístování souřadného systému na stroji [8]:

- vychází se od nehybného obrobku
- vždy musí být definována osa X
- osa X leží v upínací rovině obrobku nebo je s ní rovnoběžná
- osa Z je totožná nebo rovnoběžná s osou pracovního vřetene, které udílí hlavní řezný pohyb
- kladný smysl os je od obrobku k nástroji, ve směru zvětšujícího se obrobku
- pokud jsou na stroji další doplňkové pohyby v osách X,Y,Z, označují se U, V,W
- pokud se obrobek pohybuje proti nástroji, označují se takové osy X', Y', Z'.



Obr. 2.4 Definování kartézských souřadnic – pravotočivá soustava [6].

2.5 Vztažné body na CNC strojích

Polohu tělesa v dané vztažné soustavě umožňuje určovat souřadnicový systém, který je součástí řídicího systému stroje a je aktivován ihned po jeho zapnutí. V souřadném systému existují nulové body a několik důležitých vztažných bodů [10].

2.5.1 Nulové body CNC strojů

Každý souřadnicový systém má svůj počátek – nulový bod, který musí být přesně stanoven. Nulové body se nazývají podle způsobu jejich využití [6,9,10]:

M – nulový bod stroje

Z hlediska programátora se jedná o pevný bod, jehož polohu není možné měnit. Poloha je stanovena při montáži CNC stroje a je fixována polohou měřících systémů. Jedná se o výchozí bod všech souřadnic.

W – nulový bod obrobku

Pozici bodu stanovuje programátor. Od tohoto bodu se pak počítá tvar samotné součásti. Tento počátek souřadného systému obrobku je možné podle potřeby měnit. Pokud jsou součásti tvarově souměrné, bod W je obvykle umístěn v samotné ose souměrnosti, případně na horní ploše polotovaru. V jednom NC programu může být použito i více nulových bodů obrobku [6,9,10].

2.5.2 Referenční bod CNC stroje

R – referenční bod

V referenčním bodě dochází k přesnému sladění polohy nástroje s odměřovacím systémem. Nájezd do tohoto bodu je nutno provést po zapnutí stroje. Hledání bodu je automatické a zpravidla probíhá postupně po jednotlivých ručně volených osách [6,9,10].

2.5.3 Další vztažné body

C – výchozí bod programu

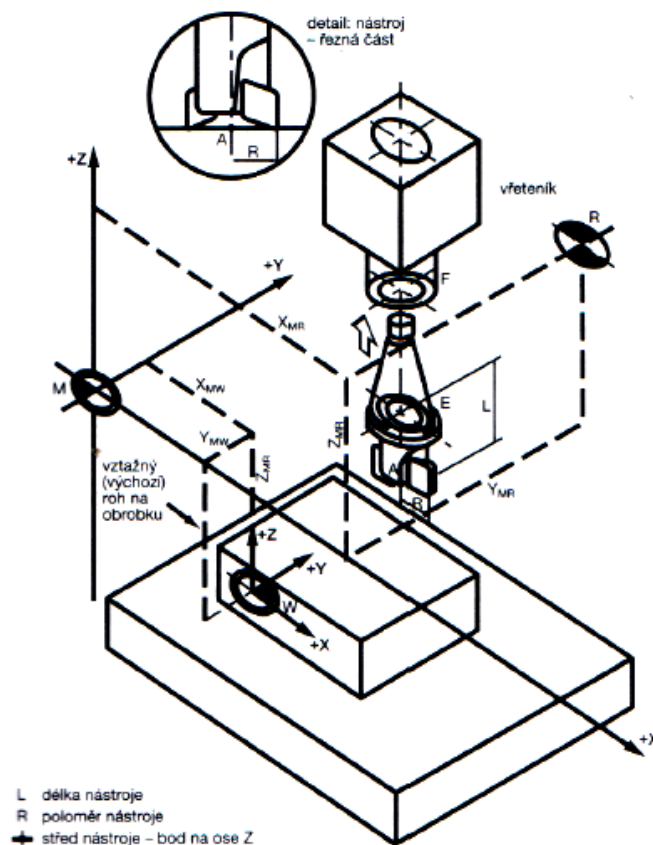
Jeho poloha je stanovena programátorem mimo obrobek, aby mohla proběhnout bez problémů např. výměna nástroje nebo obrobku. Pozice bodu je zapsána v NC programu zpravidla prostřednictvím pohybové funkce G0 [6,9,10].

F – vztažný bod suportu nebo vřetene

Bod výměny nástroje je umístěn na upínací nebo dosedací ploše nosiče nástroje. Řídí podle programu řídicí systém. Nástroj má v bodě F nulové rozměry, proto je jeho skutečná dráha korigována pomocí tzv. délkových korekcí [6,9,10].

E – bod nastavení nástroje

Tento bod na držáku nástroje je po upnutí totožný s bodem F. Slouží především k externímu přeměrování korekcí nástroje [6,9,10].



Obr. 2.4 Vztažné body na frézce [6].

2.6 CAD/CAM

V současné době je použití systému CAD/CAM nezbytnou součástí efektivní výroby ve strojírenství. Nabídka trhu poskytuje CAD/CAM systémy pro stejnou technologii v různém rozsahu a komfortu. Tyto systémy realizují vyšší stupeň počítačové podpory než klasické (ruční) CNC programování. Výhodou systému CAD/CAM je navržení nejlepší strategie obrábění a volby nástrojů, ještě před uvedením výrobku do výroby [6].

CAD – Computer Aided Design

V českém překladu znamená CAD – počítačová podpora konstruování. Slouží k návrhu a úprav 2D geometrie a 3D modelů s tělesy, povrchy a objekty sítě [6].

CAM – Computer Aided Manufacturing

V českém překladu znamená CAM – počítačová podpora výroby. Slouží k vytvoření programu pro CNC stroje. Při CAD/CAM programování se vyžaduje vyšší znalost obsluhy modulu CAM. Výše znalostí programátora CAM zajistí kvalitu výsledného programu [6].

3 ŘEZNÉ NÁSTROJE

Vzhledem k mnohostrannému uplatnění frézování ve strojírenské výrobě a k velkému rozsahu technologie frézování se v současné době používá mnoho typů fréz. Frézy jsou vícebřité, někdy i tvarově složité, nástroje, na nichž jsou břity různě uspořádané [1].

3.1 Rozdělení

Dle technologického uplatnění lze typy fréz dělit podle různých hledisek [1]:

1. Podle umístění zubů na tělese nástroje – válcové, čelní, válcové čelní.
2. Podle nástrojového materiálu zubů – z rychlořezné oceli, ze slinutých karbidů, z cermetů, z řezné keramiky, z KNB, z PKD.
3. Podle směru zubů – přímé zuby, zuby ve šroubovici.
4. Podle počtu zubů – jemnozubé, polohrubozubé, hrubozubé.
5. Podle konstrukčního uspořádání – celistvé, s vloženými zuby, s vyměnitelnými břitovými destičkami.
6. Podle geometrického tvaru funkční části – válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, rádiusové, na výrobu ozubení.
7. Podle způsobu upnutí – nástrčné, stopkové.
8. Podle smyslu otáčení – pravořezné, levořezné.

3.2 Upínání fréz

Válcové nástrčné frézy se upínají na frézovací trny. Upínací kužel frézovacích trnů a pracovního vřetene se vyrábí buď metrický nebo s kuželovostí 1:20, Morse 1:19 až 1:20, nebo strmý 1:3,5. Metrický a Morse kužel jsou samosvorné a mohou přenést kroutící moment z vřetena na frézovací trn. Aby upnutí na trnech bylo co nejtuzší, upínají se frézy, co nejbližší k vřetenu a výsuvné rameno se přisune k fréze tak blízko, jak je to jen možné. Čelní nástrčné frézy a frézovací hlavy se upínají krátkými upínacími trny letmo upnutými do vřetena nástroje [1].

Frézy s kuželovou stopkou se upínají pomocí redukčních pouzder přímo do upínacího kužele ve vřetenu frézky. Redukční pouzdro se použije také tehdy, neshoduje – li se kužel frézovacího trnu s kuželem vřetena. Frézy s válcovou stopkou se upínají do vřetena frézky při použití sklíčidla s upínacím pouzdem [1].

Frézy s válcovou stopkou o průměru 3÷50 mm se v současné době velmi často upínají pomocí speciálních tepelných (obr. 3.1) nebo hydraulických upínačů. V tepelném upínači je nástroj vložen do tělesa upínače a poté spolu s ním ohříván ve speciálním zařízení pomocí magnetického pole cívky vysokofrekvenčního generátoru.

Průběh ohřevu je rychlý, takže zvýšení teploty nástroje v důsledku vedení tepla je minimální. Poté je upnutý nástroj ochlazen proudem vzduchu a v důsledku smrštění materiálu upínače upnut. Uvolnění nástroje se provede ohřevem ve stejném zařízení [1].



Obr. 3.1 Zařízení pro tepelné upínání fréz.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této bakalářské práce bylo odzkoušení dvou strategií frézování tvarových ploch ve firmě Chotěbořské strojírny, a.s. Obrábění tvarových ploch se zde doposud provádělo na 5-ti osém CNC centru. Vzhledem k vytíženosti a ceně práce na tomto stroji, bylo zapotřebí navrhnout novou strategii, která by byla vhodná pro 3 osé CNC centrum.

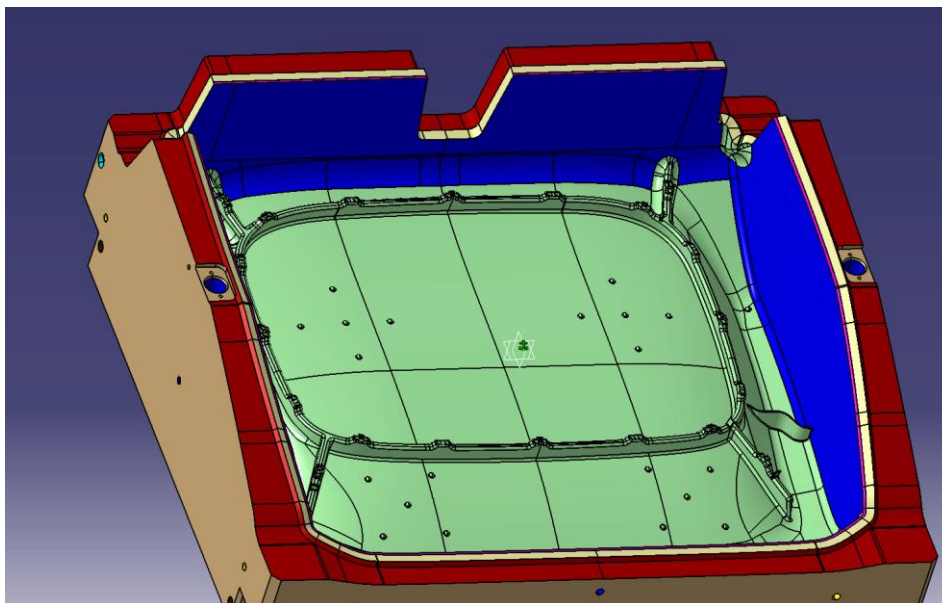
Porovnávací technologie frézování:

- řádkování (5-ti osé frézování)
- ponorné frézování (3 osé frézování)

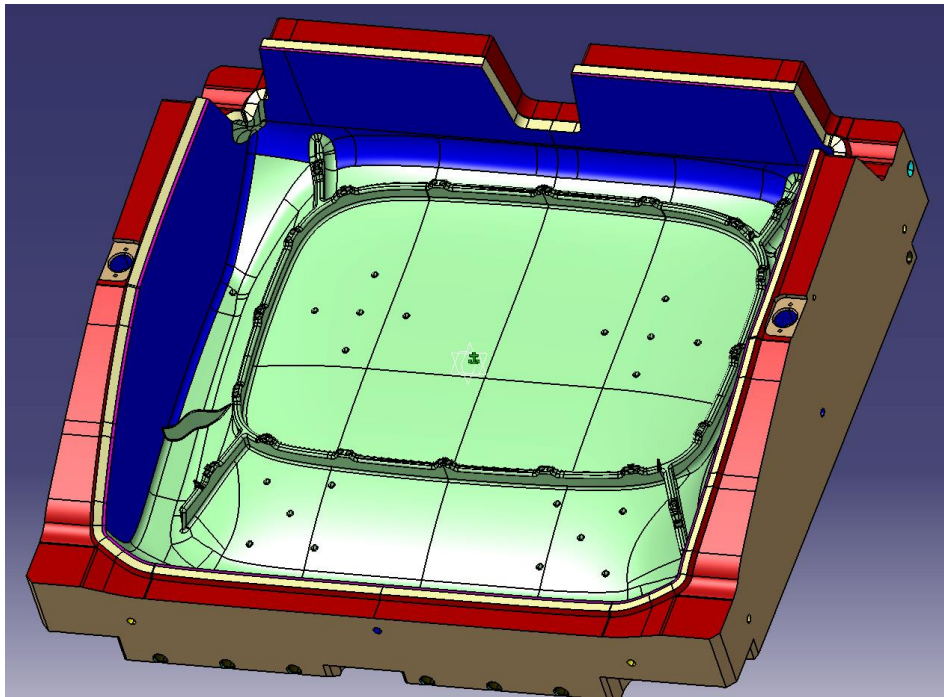
Základní kritéria pro výběr z obou porovnávaných metod:

- nejkratší výrobní čas
- kvalita povrchu

Výchozím modelem pro odzkoušení a porovnání těchto dvou technologií byl zvolen model spodního dílu vypěňovací formy. Na tomto díle se nacházejí podkosové plochy, které jsou zobrazeny na obr. 4.1 a obr. 4.2 modrou barvou.

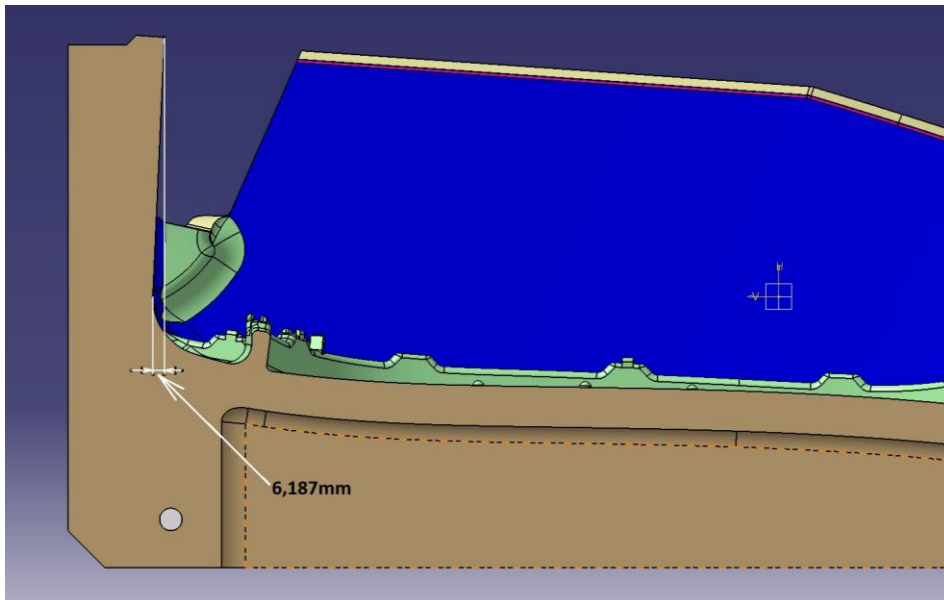


Obr. 4.1 Model spodního dílu formy – první pohled.

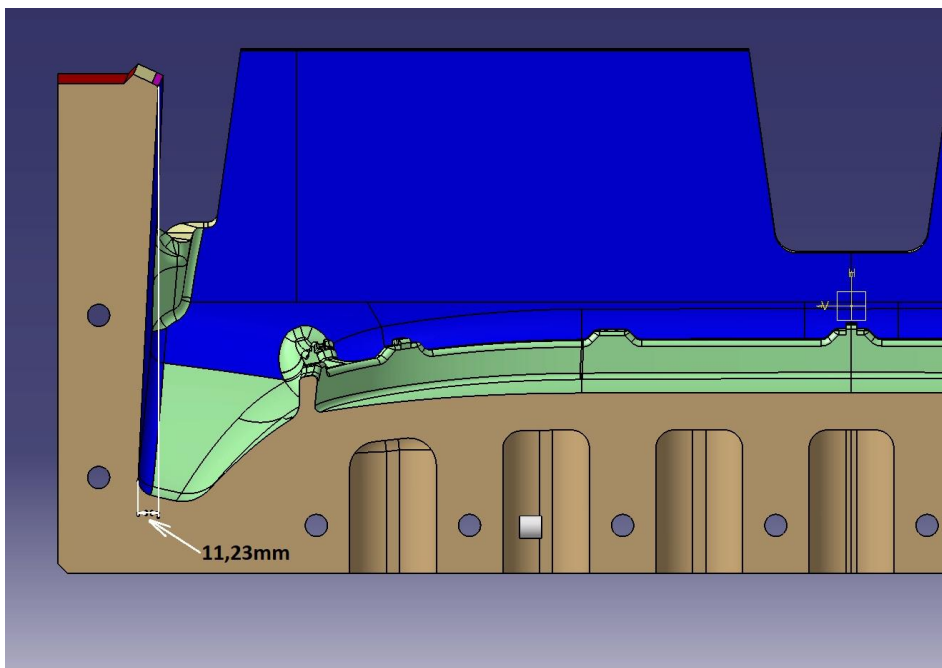


Obr. 4.2 Model spodního dílu formy – druhý pohled.

Velikost podkosů je zobrazena na obr. 4.3 a obr. 4.4.



Obr. 4.3 Velikost předního podkosu.



Obr. 4.4 Velikost bočního podkosu.

4.1 Volba materiálu

Spodní díl vypěňovací formy je vyráběn na žádost zákazníka z materiálu 3.3547. Tento materiál patří mezi hliník a jeho slitiny. K významným vlastnostem hliníku se řadí vysoká tepelná a elektrická vodivost. Pro výrobu hliníku je nejdůležitější surovinou bauxit (hydratovaný oxid hlinitý s železem, křemíkem, a titanem). V dnešní moderní výrobě je proces výroby hliníku poměrně složitý. Proces výroby se sestává ze dvou etap. První etapa je výroba oxidu hlinitého z hlinitanových rud. Druhá etapa je redukce oxidů na kovový hliník elektrolytickým způsobem z elektrolytu. K výrobě 1 t hliníku je zapotřebí 4 t bauxitu, cca 20 GJ tepelné energie a 14 MWh elektrické energie. Tato metoda je energeticky velmi náročná, avšak čistota získaného hliníku dosahuje 99,9 %. Další vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tab. 4.1 [11].

Tab. 4.1 Vlastnosti hliníku [11].

Hustota	2 700 kg.m ⁻³
Teplota tání	660 °C
Krystalická mřížka	Kubická plošně centrovaná (FCC)
Pevnost v tahu R_m	Pod 100 MPa
Mez kluzu Re	20 MPa
Tvrdość podle Brinella	20 – 30 HB

4.1.1 Slitiny hliníku

Pro konstrukční účely je čistý hliník zcela nevyhovující (vzhledem ke špatným mechanickým vlastnostem). Důležité uplatnění však našel ve formě slitin, kde právě přísadové prvky zvyšují pevnost a tvrdost se zachováním malé hustoty. Hlavními

přísadami, které se vyskytují ve slitinách hliníku jsou měď, křemík, hořčík nebo mangan. V případě přísadového prvku mědi se zlepšuje obrobiteľnosť, ale zhoršuje odolnosť proti korozi. Slitiny hliníku lze rozdělit do třech základních skupin: siluminy (slitiny Al – Si), duraluminium (Al – Cu) a hydronalium (Al – Mg) [11].

4.1.2 Slitina 3.3547

Podle normy ČSN EN 485 – 2 se tento materiál označuje EN AW – 5083 (AlMg4,5Mn0,7). Dále tato slitina obsahuje hořčík, proto se řadí mezi slitiny hydronalium (Al -Mg). Má zvýšenou odolnosť proti korozi, tudíž se využívá především ke stavbě lodních konstrukcí, karoserií vozidel, v chemickém a potravinářském průmyslu. Mezi její vlastnosti patří: přirozená tvrdost, chemická stálost, dobrá obrobiteľnosť, svařitelnost a leštitelnost. Hodnota pevnosti v tahu je $R_m = 267 \text{ MPa}$ a tvrdost 78 HB. Procentuální zastoupení dalších prvků je uvedeno v atestu materiálu, který je součástí přílohy 1 [12].

4.2 Volba strojů

4.2.1 Trimill VU 3019

Doposud se frézování tvarových ploch provádělo na 5-ti osém centru Trimill VU 3019. 5-ti osé frézování se stalo běžnou činností ve většině společností, zabývajících se obráběním. Český výrobce strojů Trimill, a.s., nabízí ve svém sortimentu několik variant tohoto způsobu frézování.

Firma pořídila v roce 2014 5-ti osé obráběcí centrum, typ Trimill VU 3019 (obr. 4.5), které má otočný stůl a naklápěcí hlavu. Použití tohoto typu strojů je výhodné, tam kde je vyžadováno časté frézování ze stran obrobku. Umístění otočného stolu na strojích není přímo ve středu pojezdu podélné osy X, ale stůl je posunut dále od středu pojezdu. Tím vzniká dostatečný prostor před obrobkem u obsluhy pro frézování dlouhými nástroji z boku obrobku, případně pro vrtání dlouhých šikmých otvorů. Otáčením stolu lze tento prostor využít pro všechny boční stěny obrobku. Kombinací otáčení stolu a naklápění hlavy lze samozřejmě plnohodnotně 5ti-ose obrábět také vnitřní tvary „shora“ [13].



Obr. 4.5 Trimill VU 3019.

Parametry stroje jsou popsány v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Parametry Trimill VU 3019 [14].

Pracovní pojezd	osa X – příčnick		3000 mm
	osa Y – křížové saně		1950 mm
	osa Z – svislý suport		1000 mm
	osa C – otočný stůl		n x 360°
	osa B – vidlicová frézovací hlava T30U		+100° - 100°
Posuvy	Rychlost	Max.posuv v osách X, Y, Z	30 m/min
	Zrychlení v osách X,Y,Z		3 m/s ²
Přesnost	Přesnost polohování v ose X, Y, Z		0,008 mm
	Opakovaná přesnost v ose X, Y, Z		0,006 mm
Otočný stůl MRT 1250	Upínací plocha		2300 x 2300 mm
	Počet T – drážek x šířka		11 x 22H12
	Rozteč T – drážek		200 mm
Zásobník nástrojů	Nástrojový držák		DIN 68 873 – HSK – A100
	Počet nástrojů v zásobníku		10 ks

4.2.2 MCFV 1680

3 osé frézování je běžným způsobem výroby obrobků. V České Republice je několik firem, které vyvíjejí a vyrábějí tříosé obráběcí centra. Mezi tyto přední výrobce patří i firma Tajmac – ZPS, od které se v roce 2016 obráběcí centrum MCFV 1680 zakoupilo.

Vertikální tříosé obráběcí centrum MCFV 1680 (obr. 4.6) je vysoce produktivní stroj pro komplexní třískové obrábění. Pracovní stůl, jehož horní plocha slouží pro upnutí obrobku, se pohybuje v podélném směru (osa X) po vedení na křížovém suportu. Křížový suport se pohybuje po vedení na základně v příčném směru (osa Y). Vřeteník se pohybuje ve vertikálním směru (osa Z). Všechna vedení jsou tvořena lineárními vedeními s valivými jednotkami. Jejich dimenze a umístění dovoluje vysoké zatížení stolu, suportu a vřeteníku při zachování přesnosti rozměrů a kvality obrobku i při přerušovaném řezu. Toto konstrukční řešení také zajišťuje vysokou životnost stroje. Odměrování polohy v osách X, Y, Z je prováděno přímo lineárními jednotkami. Stroj je vybaven elektronickou kompenzací teplotních dilatací. Funkce stroje jsou řízeny CNC řídicím systémem, který umožňuje obrábění i prostorově složitých tvarů, kdy nástroj sleduje dráhu vzniklou jako výstup z 3D CAD programu [15].



Obr. 4.6 MCFV 1680.

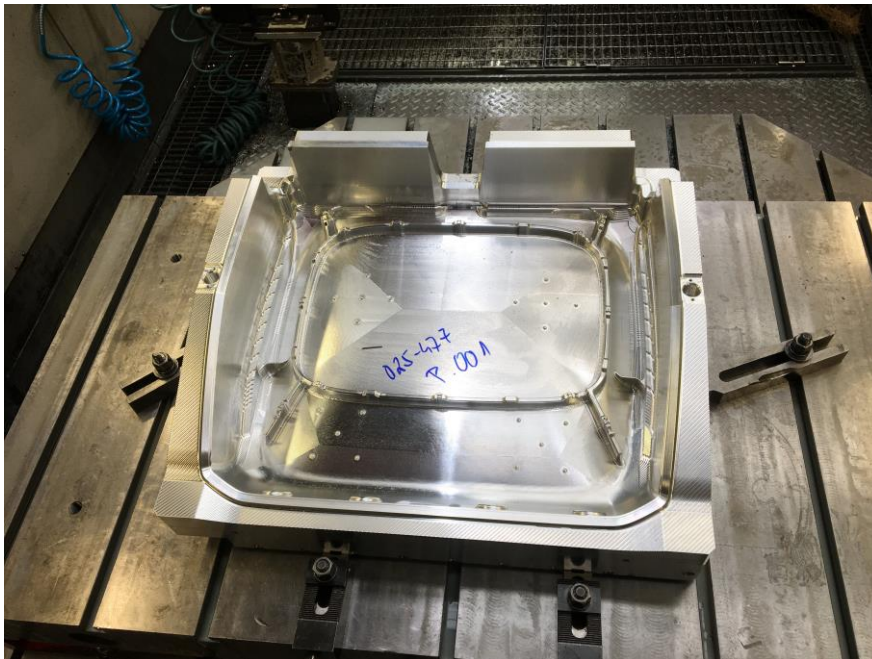
Parametry stroje jsou popsány v tabulce 4.2.

Tab. 4.2 Parametry MCFV 1680 [16].

Pojezdy	osa X (pracovní stůl)	1650 mm
	osa Y (křížový suport)	810 mm
	osa Z (vřeteník)	810 mm
	Maximální pracovní posuv	30 m/min
	Rychloposuv	30 m/min
	Zrychlení	3,5 m/s ²
Stůl	Pracovní plocha	1800 x 780 mm
	Počet T-drážek x šířka	5 x 18 mm
	Maximální zatížení	2500 kg
Přesnost	Přesnost polohování	0,009 mm
	Opakovaná přesnost	0,005 mm
Zásobník nástrojů	Počet míst v zásobníku	24
	Čas výměny nástroje	4,5 s

4.3 Upnutí obrobku

Vzhledem k rozměrům obrobku a frézování vrchního tvaru bude upnutí provedeno pomocí bočních upínek ke stolu stroje. Vyhrubovaný obrobek bude připevněn za 2 body pevně a 2 body pro dotažení z druhé strany, aby se obrobek nepohnul. Upnutí vyhrubovaného obrobku je zobrazeno na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Ukázka upnutí obrobku.

4.4 Volba nástrojů

4.4.1 Frézy pro 5-ti osé frézování

Dle předchozí technologie byly k obrábění tvarových ploch používány tyto nástroje:

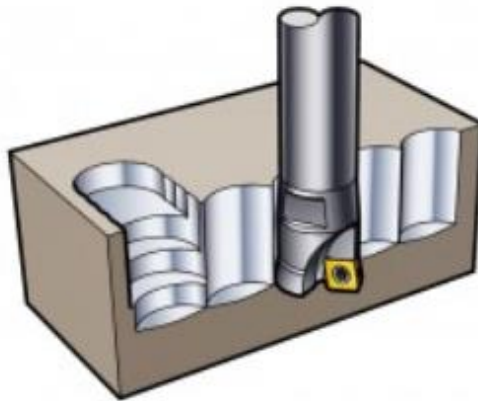
1. \varnothing 32R5;
2. \varnothing 16R0,8;
3. \varnothing 16K;
4. \varnothing 10K.

Seznam a parametry nástrojů jsou uvedeny v příloze 2.

4.4.2 Fréza pro 3 osé obrábění (ponorné frézování)

4.4.2.1 Definice ponorného frézování

Ponorné frézování (obr. 4.8) je alternativní metoda vhodná v případě, že frézování obvodem není možné použít vzhledem ke vzniku vibrací. Pro řez využívá čelo nástroje namísto jeho obvodu, což příznivým způsobem mění směr působení řezných sil z převážně radiálních na axiální. Vhodné využití ponorného frézování se uplatní v případě požadavku dlouhého vyložení nástroje. Hlučnost i nároky na výkon stroje jsou nízké. Tato metoda se uplatňuje pro 3D frézování [17].



Obr. 4.8 Ponorné frézování [18].

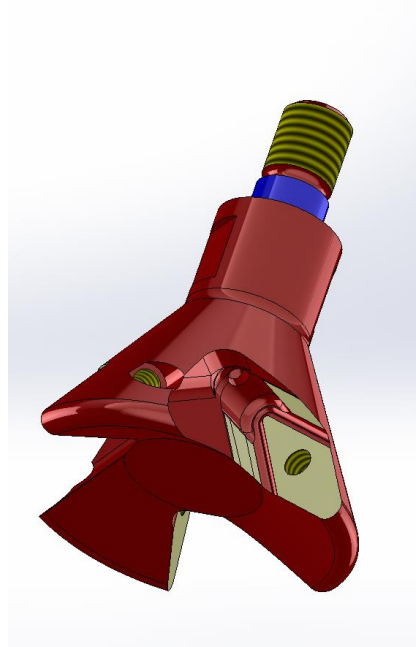
V dnešní době již některé firmy nabízejí frézy pro ponorné frézování ve svém sortimentu, avšak pro zadané účely byly nevyhovující. Především se jednalo o nevhodné rozměry dosedacích ploch pro vyměnitelné břitové destičky. Firma se tedy rozhodla na základě informací a předlohy nevyhovující ponorné frézy o zkonstruování a výrobu vlastní ponorné frézy dle svých požadavků.

Hlavní požadavky pro konstrukci ponorné frézy:

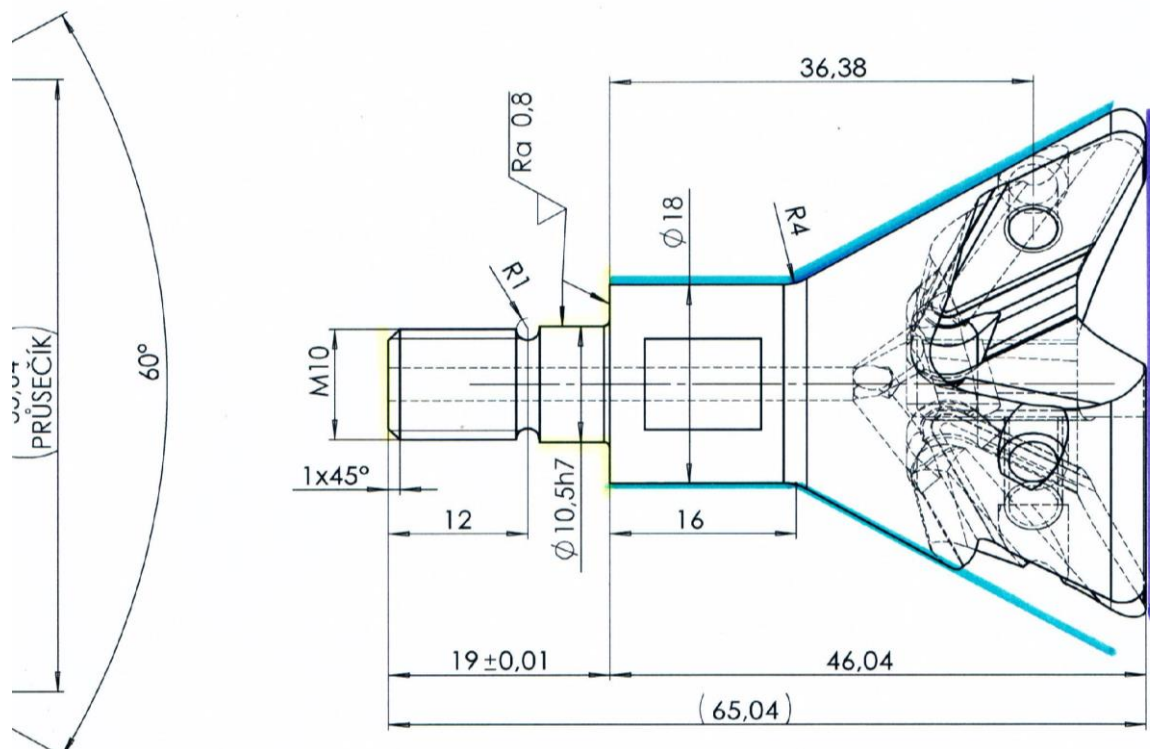
- rozměry dosedacích ploch pro konkrétní velikost vyměnitelné břitové destičky
- průměr frézy
- celková délka nástroje (šroubovitá fréza)

4.4.2.2 Výkresová dokumentace

Dle hlavních požadavků na konstrukci byl konstruktérem vytvořen model ponorné frézy (obr. 4.9) a následně výkresová dokumentace (obr. 4.10).



Obr. 4.9 Model ponorné frézy.



Obr. 4.10 Ukázka výkresové dokumentace ponorné frézy.

4.4.2.3 Technologický postup výroby ponorné frézy

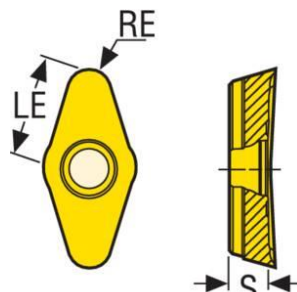
Na základě výkresové dokumentace byl zpracován technologický postup pro výrobu ponorné frézy. Ukázka technologického postupu je zobrazena na obr. 4.11, celý technologický postup je součástí přílohy 3.

EVIZ-32-02		TECHNOLOGICKÝ POSTUP		Strana: 1
19.06.2020 Zpracoval: SULCOVA		Č. zak.: 99-99-999-001	Č.v.: POMZAK	Poz.: N01
Zakázka: POMOCNA ZAKAZKA				
Pozice : FREZA PR52 R3.1 NA HLINIK			Kusů:	1
Ope	Prac	Popis XX1.2312 XX XXXR 60 X 75		
010	5981	Řezat na rozměr Datum: Provedl:		
020	9421	Popsat bílým fixem do kalení, č.zak., č.poz., CHS, 45-50HRC, mat.1.2312 Datum: Provedl:		
030	9171	Kalit, popustit na 45-50HRC, mat.1.2312 Datum: Provedl:		
040	4129	Upnout za pomocný mat., vyrovnat, počítat s příd.0.15 na plochách ozn.žlutě, soustružit délku na rozm.70.2, soustružit tvar ozn.modře hotově dle CAD dat, R2 nedělat, 1x pr.3 hl.43, 1x navrtat, 1x sedlo pro hrot Datum: Provedl:		
050	5511	VYROBIT NA SPODNÍ HRANĚ TOLERANCE V PŘÍPADĚ OTVORU (DRÁŽKY) NA HORNÍ HRANĚ TOLERANCE!!! Brousit pr.10.5h7 včetně přilehlého čela o přídavek Datum: Provedl:		

Obr. 4.11 Ukázka technologického postupu.

4.4.2.4 Vyrobenaá ponorná fréza

Ponorná fréza byla vyrobena pro konkrétní typ vyměnitelných břitových destiček od firmy SECO s označením VPGX220631EN – E10, H25, které jsou určeny k obrábění hliníku. Tyto vyměnitelné břitové destičky byly zvoleny z důvodu standartního využívání ve firmě k hrubovacím operacím. Vyměnitelná břitová destička je zobrazena na obr. 4.12 a její parametry jsou uvedeny v tab. 4.3.



Obr. 4.12 Břitová destička VPGX220631EN – E10, H25 [18].

Tab. 4.3 Parametry břitové destičky [18].

LE	14,2 mm
RE	3,18 mm
S	6,35 mm

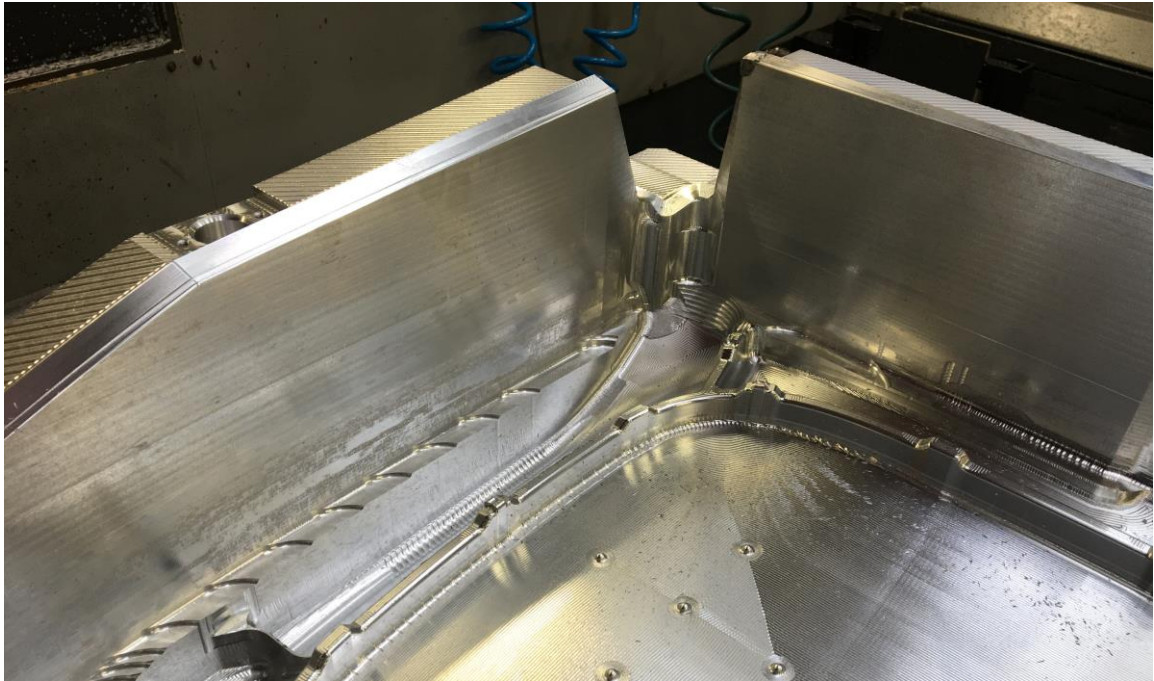
Na obr. 4.14 je zobrazena již vyrobená ponorná fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami.



Obr. 4.14 Ponorná fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami.

5 REALIZACE PROJEKTU

Podkosové plochy bývají častým problémem při frézování. Nelze je vyrobit na 3 osém CNC centru, jelikož plocha z pohledu nástroje není viditelná. Proto se v běžné praxi setkáme s obráběním na 5-ti osém CNC centru. Při realizaci projektu byla jedna polovina formy frézovaná již odzkoušenou metodou řádkování a druhá polovina metodou ponorného frézování. Na obr. 5.1 je zobrazen vyhrubovaný tvar na 3 osém CNC centru bez podkosu.



Obr. 5.1 Vyhrubovaný tvar bez podkosu.

5.1 5-ti osé obrábění

Pěti-osé frézování bylo realizováno metodou 3+2D. Tato metoda je založena na principu, kdy sklon osy nástroje je dán pevným nastavením vřeteníku s nástrojem nebo stolu frézy o určitý úhel. Z tohoto důvodu můžeme toto obrábění označit za metodu řádkování. Vřeteno s nástrojem je pevně nastaveno o určitý úhel, čímž dochází k otevření tvaru a obrábění tvarové plochy 3D metodou. Hrubování tvaru je zobrazeno na obr. 5.2, finální dokončení obrobení tvaru je zobrazeno na obr. 5.3 [6].

Výhody této strategie:

- vyšší otáčky
- běžně dostupné nástroje pro frézování

Nevýhody této strategie:

- výměna nástrojů
- vyšší provozní cena stroje



Obr. 5.2 Hrubování tvaru.



Obr. 5.3 Finální dokončení obráběného tvaru.

5.2 3 osé frézování

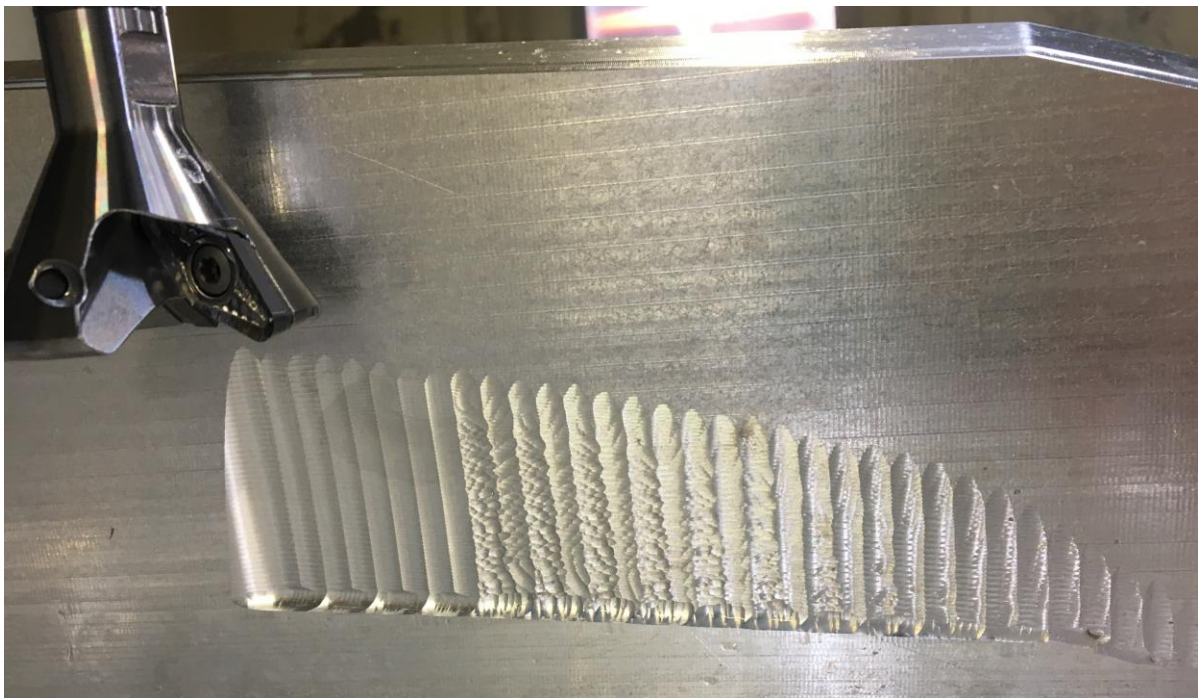
Při 3 osém frézování byla zvolena metoda ponorného frézování. Použitím této metody dochází k odebrání materiálu plynule nahoře i dole při velkém kroku. Vzhledem k typu šroubovací frézy lze použít karbidový držák, kterým se docílí požadované celkové délky frézy a mohou se obrábět velké hloubky. Další pozitivní vlastností karbidového vrtáku je tlumení vibrací. Na obr. 5.4 je zobrazen úběr první špony, na obr. 5.5 a 5.6 hrubovací a dokončovací operace.

Výhody této strategie:

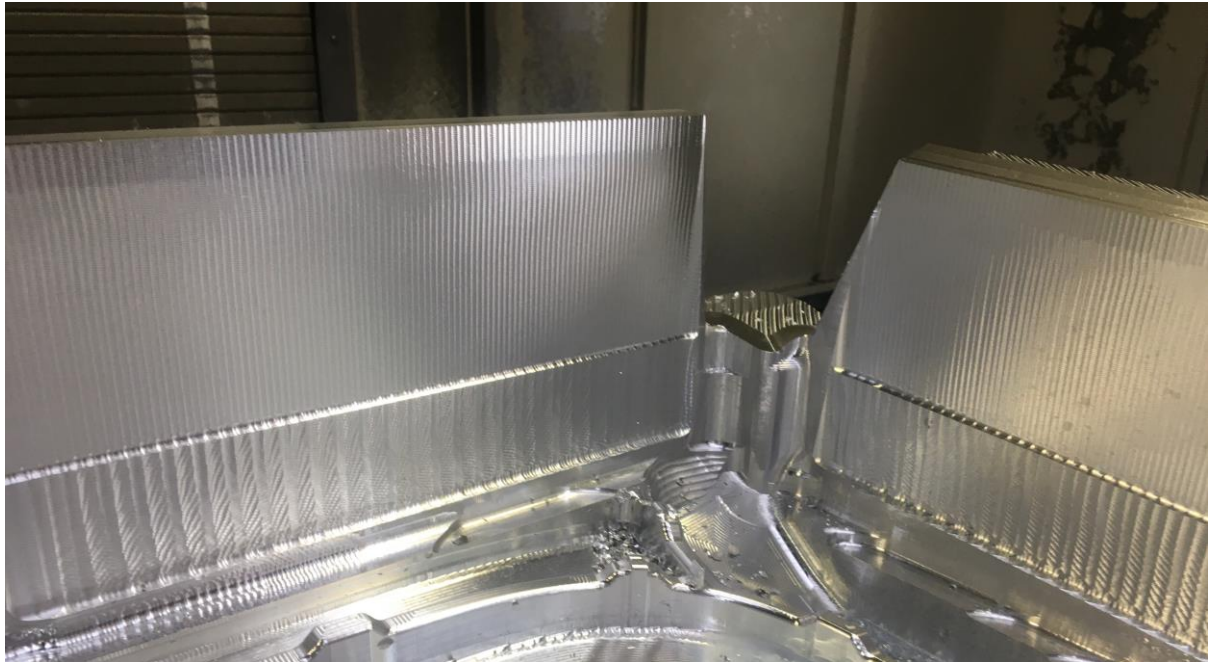
- 3 osé obrábění
- jeden nástroj

Nevýhody této strategie:

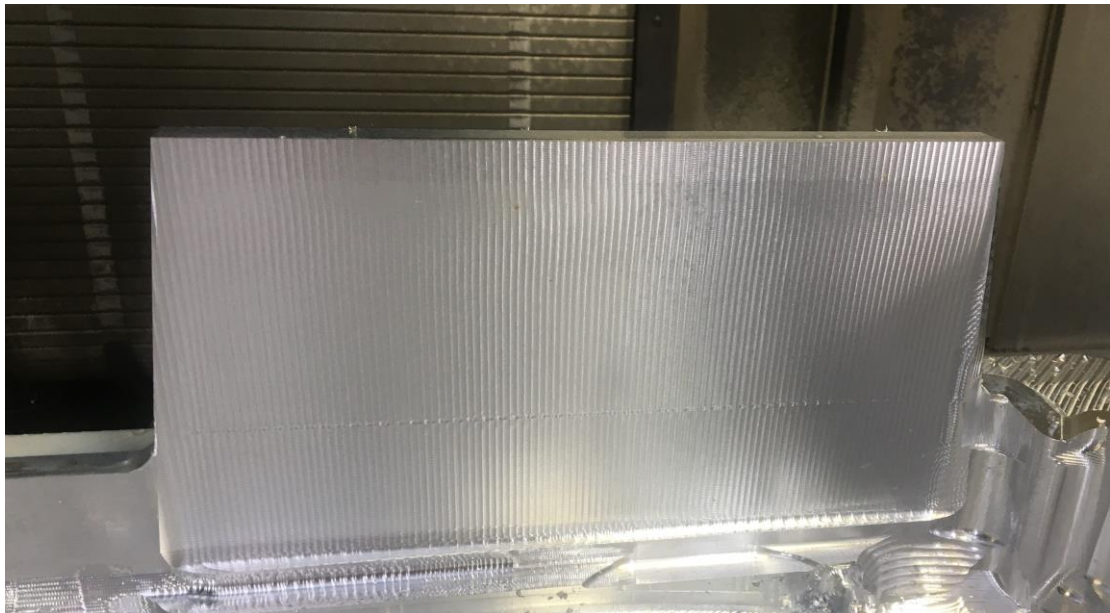
- náročná konstrukce a výroba nástroje
- nedofrézovaná špatně přístupná místa



Obr. 5.4 První špona.



Obr. 5.5 Vyhrubovaný tvar.



Obr. 5.6 Dokončený povrch.

TECHNICKÁ ZPRÁVA

Cílem bakalářské práce bylo odzkoušení dvou technologií frézování tvarových ploch. Na zadaném modelu spodního dílu vypěňovací formy se nacházely podkosové plochy. Tyto plochy se doposud obráběly na 5-ti osém CNC centru Trimill VU 3019, jehož rozměry stolu vyhovovaly rozměrům obrobku. Vzhledem k vytíženosti, provozním nákladům a přítomnosti pouze jednoho tohoto typu stroje ve firmě se přistoupilo k hledání nové obráběcí strategie. Hlavním požadavkem nové strategie bylo obrábění na 3 osém centru. Tento požadavek splňovala metoda ponorného frézování.

Pro ponorné frézování bylo zapotřebí použít frézu, která je na takové obrábění uzpůsobená. V dnešní době někteří výrobci náradí nabízejí ponorné frézy ve svém sortimentu, avšak pouze jen pro určité typy a velikosti vyměnitelných břitových destiček. Firma již několik let standardně používá vyměnitelné břitové destičky na hliník od firmy SECO a chtěla jejich používání zachovat i při tomto obrábění. Pro tyto vyměnitelné břitové destičky však nebyly vyhovující nabízené ponorné frézy. Firma se rozhodla na základě předlohy o zkonstruování a výrobu ponorné frézy, která by měla požadovanou velikost dosedacích ploch pro VBD.

Jelikož byly metody frézování porovnávány, byla první polovina dílu obráběná na 3 osém CNC centru MCFV 1680. Na tomto centru byla již zhotovena předchozí operace hrubování tvaru bez podkosu, proto mohla plynule navázat operace obrábění podkosových ploch ponorným frézováním. Program musel být zhotoven v novější verzi Powermill 2020, která již disponuje funkcemi pro tuto metodu obrábění. Za nástroj byla použita vyrobená ponorná fréza a řezné podmínky byly stanoveny na základě doporučení výrobce.

Druhá polovina dílu byla obráběná na 5-ti osém CNC centru běžnou metodou 3+2D, která se ve firmě používá pro obrábění tvarových ploch. Na základě předešlých zkušeností s touto metodou obrábění byl zhotoven program v Powermill 2018. Volba nástrojů a řezných podmínek byla ponechána v závislosti na tvaru podkosu a znalostech tohoto typu obrábění.

Hlavním kritériem pro výběr vhodnější metody byla časová úspora. Z výpisu 3D programu je patrný rozdíl, kdy obrábění metodou ponorného frézování bylo o 30 minut rychlejší než obrábění metodou řádkování. Problémem, který se vyskytl u ponorného frézování, jsou nedofrézované části, které se poté musejí dofrezovávat na 5-ti osém CNC centru. Požadovaná kvalita povrchu byla dodržena u obou metod. Pokud se tedy bude nahlížet na výběr dle časové úspory ušetří se na 5-ti osém CNC centru 90 minut a tak se sníží částečně vytíženost stroje. V takovém případě metoda ponorného frézování nahradí metodu řádkování. Tato metoda je vhodná i pro obrábění rovných šikmých ploch, proto se ve firmě využívá i na jiné obrobky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ -1. část* [online]. 2003 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO1cast.pdf.
2. *Skripta Technologie II.* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.
3. HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie 2.* Scientia, 2013. ISBN 978-80-7183-244-7.
4. *Řezné podmínky pro obrábění* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf.
5. *Definice 5-ti osého a 3-osého frézování* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/24817-cam-express>.
6. ŠTULPA, Miloslav. *CNC obráběcí stroje a jejich programování.* Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0207-8.
7. *Režimy práce řídicího systému* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/poznejte-rezimy-prace-ridiciho-systemu-jak-se-ovladaji-cnc-stroje/>.
8. *CNC příručka* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/upload/CNC%20prirucka_CZ.pdf.
9. POLEZER, Aleš. *Akademie CNC obrábění (7)* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-7_8542.html.
10. SVOBODA, Rostislav. *Nulové a další vztažné body na CNC strojích. Vyznáte se v nich ?* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/nulove-a-dalsi-vztazne-body-na-cnc-strojich-vyznate-se-v-nich/>.
11. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
12. *Hliník* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-5083/>.
13. ČOŽÍK, Zdeněk. *Pětiosé frézování na portálových strojích* [online]. 2011 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/petiose-frezovani-na-portalovych-strojich.html>.
14. Interní dokument firmy Chotěbořské strojírny, a.s. – *Manuál Trimill VU 3019.*
15. *Vertikální obráběcí centrum MCFV 1680* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.tajmac-zps.cz/mcfv-1680>.
16. Interní dokument firmy Chotěbořské strojírny, a.s. – *Manuál MCFV 1680.*
17. *Ponorné frézování* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/plunge-milling.aspx>.

-
18. *Destičky VPGX220631EN-E10 H25* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_00035401?language=en.
 19. *Katalog ISCAR* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Applications.aspx?mapp=ML>.
 20. *Produkty CERATIZIT* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://e-techstore.com/?fcode=m_home.
 21. *DHF* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <http://www.endmill.com.tw/products-detail/en/142/UBT-2T>.

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 ATEST MATERIÁLU 3.3547
- Příloha 2 NÁSTROJE PRO 5TI-OSÉ FRÉZOVÁNÍ
- Příloha 3 TECHNOLOGICKÝ POSTUP PRO VÝROBU PONORNÉ FRÉZY