

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace a porovnání technologie obrábění prototypové
vstříkovací formy

Autor: **Bc. Luděk HOLUB**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Karel JANDEČKA, CSc.**

Akademický rok 2011/2012

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Karlu Janděčkovi, CSc. a konzultantovi Patricku Hauserovi z firmy *MBtech Bohemia s.r.o.* za cenné rady a připomínky.

Děkuji také svým rodičům za plnou podporu při studiu.

Hiermit möchte ich mich beim Konsultanten dieser Diplomarbeit Patrick Hauser bedanken, für wertvolle Ratschläge und Bemerkungen.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Holub		Jméno Luděk	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“			
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Jandečka, CSc.		Jméno Karel	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace a porovnání technologie obrábění prototypové vstřikovací formy			

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	86	TEXTOVÁ ČÁST	70	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Cílem diplomové práce je zefektivnění procesu výroby prototypových vstřikovacích forem, tj. snížení strojních časů a zvýšení kvality obrobeneho povrchu. Diplomová práce je zaměřena experimentálně, její součástí je analýza procesu výroby, nalezení možností optimalizace stávající technologie, provedení řady experimentů obrábění pomocí různých strategií, vyhodnocení výsledků a jejich následná aplikace ve výrobě – zhotovení vlastní prototypové vstřikovací formy.
KLÍČOVÁ SLOVA	optimalizace, prototypová vstřikovací forma, CAD/CAM, Tebis, frézování, tvarová plocha, hluboké kapsy, žebra, drážky, vtokový kanál, vyjiskřování, nástrojová elektroda

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Holub	Name Luděk
FIELD OF STUDY	2303T004 “Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Janděčka, CSc.	Name Karel
INSTITUTION	ZČU - FST – KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Optimization and comparison of machining technology of prototype injection mold	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	86	TEXT PART	70	GRAPHICAL PART	16
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of this thesis is optimization of production of prototype injection mold, it means reduction of machine time and improvement of surface quality. This diploma thesis is focused experimentally, its part is the analysis of the production process, finding the optimization potential of today's technology, execution of many milling experiments using different machining strategies and their application in the real production – manufacturing of the experimental prototype injection mold.
KEY WORDS	optimization, prototype injection mold, CAD/CAM, Tebis, milling, shape contour, deep pockets, ribs, grooves, inflow canal, sparking, tooling electrode

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Řešená problematika a cíle diplomové práce.....	9
1.2	O společnosti.....	10
1.3	Prototypová vstřikovací forma.....	11
2	Popis současného stavu ve firmě, teoretická část	13
2.1	Postup při zhotovení nové zakázky	13
2.2	CAD konstrukce nástrojů.....	13
2.3	Příprava výroby, volba stroje a nástrojů	14
2.4	CAM programování	14
2.4.1	O programu Tebis.....	15
2.5	Výroba, frézování	16
2.5.1	Materiál používaný na výrobu prototypové vstřikovací formy.....	16
2.5.2	Elektroerozivní obrábění	17
3	Hledání možností optimalizace	18
3.1	CAD konstrukce nástrojů.....	18
3.2	CAM programování	18
3.3	Výroba, frézování	19
4	Provedení experimentů v oblasti technologie obrábění.....	21
4.1	První fáze experimentů	21
4.1.1	Experiment č. 1 - dokončovací strategie	23
4.1.2	Experiment č. 2 – dokončovací strategie.....	24
4.1.3	Experiment č. 3 – zvlněný povrch.....	25
4.1.4	Experiment č. 4 – kónické kapsy.....	26
4.1.5	Experiment č. 5 – vypuklá a vydutá plocha tříose.....	28
4.1.6	Experiment č. 6 – vypuklá a vydutá plocha pětiose	28
4.1.7	Experiment č. 7 – frézování kapes pro hliníkové vložky	30
4.1.8	Experiment č. 8 – frézování kruhových kapes	32
4.1.9	Experiment č. 9 – frézování hluboké členité kapsy.....	33
4.1.10	Ukázka (demo) – frézování pětiosé těsnící drážky.....	34
4.2	Druhá fáze experimentů.....	34
4.2.1	Experiment č. 10 – frézování různě hlubokých kapes.....	35
4.2.2	Experiment č. 11 – frézování torzních kanálů.....	41
4.2.3	Experiment č. 12 – frézování žeber a drážek.....	43
4.2.3.1	Frézování drážek	43
4.2.3.2	Frézování stojatých žeber	45
4.2.4	Experiment č. 13 – frézování a elektroerozivní obrábění tvarových drážek	48
4.2.4.1	Výroba vložky frézováním	48

4.2.4.2	Výroba vložky vyjiskřováním	48
4.2.5	Experiment č. 14 – frézování vtokových kanálů	51
4.2.6	Experiment č. 15 – frézování tvarové plochy	55
5	Zhotovení experimentální prototypové vstříkovací formy	57
5.1	Konstrukce výlisku	57
5.2	Konstrukce prototypové vstříkovací formy	58
5.3	Výroba prototypové vstříkovací formy	58
5.3.1	Frézování vyhadzovací strany vstříkovací formy	60
5.3.2	Frézování pohledové strany vstříkovací formy	63
6	Technicko-ekonomické zhodnocení a výsledky	66
7	Shrnutí a závěr	68
8	Seznam použitých zdrojů a informací	70
9	Seznam příloh diplomové práce	71

Seznam zkratk a symbolů

CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované projektování)
CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporované obrábění)
ap	hloubka řezu [mm]
S	otáčky vřetene [1/min]
F	posuv nástroje [mm/min]
VBD	vyměnitelná břitová destička
Pf52r3	frézovací hlava s VBD o průměru 52 mm, poloměr rohu VBD 3 mm
Pf42r3	frézovací hlava s VBD o průměru 42 mm, poloměr rohu VBD 3 mm
Pf25r2	frézovací hlava s VBD o průměru 25 mm, poloměr rohu VBD 2 mm
Sf 16	Čelní válcová fréza monolitní o průměru 16 mm
Sf 8	Čelní válcová fréza monolitní o průměru 8 mm
Sf 4	Čelní válcová fréza monolitní o průměru 4 mm
Sf 0,8	Čelní válcová fréza monolitní o průměru 0,8 mm
Tf16r2	Toroidní fréza monolitní o průměru 16 mm, poloměr rohu 2 mm
Tf16r7	Toroidní fréza monolitní o průměru 16 mm, poloměr rohu 7 mm
Tf12r2	Toroidní fréza monolitní o průměru 12 mm, poloměr rohu 2 mm
Tf8r1	Toroidní fréza monolitní o průměru 8 mm, poloměr rohu 1 mm
Tf4r0,5	Toroidní fréza monolitní o průměru 4 mm, poloměr rohu 0,5 mm
Kf16	kulová fréza monolitní o průměru 16 mm
Kf6	kulová fréza monolitní o průměru 6 mm
Kf5	kulová fréza monolitní o průměru 5 mm
Kf1 8-20	kulová fréza monolitní o průměru 1 mm, osazená 8 mm, vyložená 20 mm + ostatní kombinace různých hodnot osazení a vyložení frézy
Kf0,6	kulová fréza monolitní o průměru 0,6 mm
R2	rádus (poloměr) velikosti 2 mm

1 Úvod

1.1 Řešená problematika a cíle diplomové práce

Tato diplomová práce se zabývá zefektivněním výroby prototypových vstřikovacích forem ve firmě *MBtech Bohemia s.r.o.* Diplomová práce se zaměřuje převážně na oblast výrobní, tzn. CAM programování a třískové obrábění frézováním.

V první části práce je provedena analýza současného stavu výrobního procesu. Na základě provedené analýzy jsou specifikovány možnosti optimalizace, která spočívá především ve zkrácení strojních časů, zvýšení jakosti obrobeneho povrchu a snížení vícepráce.

Druhá část diplomové práce je zaměřena experimentálně. Z portfolia firmy byly vybrány typové prvky a kontury, které jsou téměř denně obráběny, zefektivnění jejich výroby je tedy stěžejní (jedná se např. o kapsy pro vložky, vypuklé a vyduté plochy, drážky, žebra, vtokové kanály, tvarové plochy). Za účelem porovnání jednotlivých technologií frézování s různými parametry a pomocí různých strategií byl zkonstruován model a naprogramovány programy pro obrábění testovací desky (rozměr 625 x 500 x 100 mm, foto viz příloha č. 2) obsahující následující prvky: vyduté a vypuklé plochy, kónické kapsy, plochy určené pro dokončovací frézování, těsnící drážku a různě hluboké kapsy pro vložky. Tato deska byla obráběna na portálové frézce a při obrábění každého prvku pečlivě měřen strojní čas. Na závěr byla vyhodnocena optimální varianta programu a strategie frézování.

Stejným způsobem byly zkonstruovány, naprogramovány a vyrobeny hliníkové vložky obsahující následující prvky: různě hluboké kapsy, torzní kanály, žebra, úzké drážky, vtokové kanály a tvarové plochy. Při frézování těchto vložek byl kladen důraz na měření strojního času a kvalitu a průběh obrábění v závislosti na ostatních parametrech (např. délka vyložení nástroje, řezné podmínky, použitá strategie obrábění). Výroba dvou kruhových vložek s drážkami proběhla jak frézováním, tak vyjiskřováním. Na závěr byla u každého prvku stanovena optimální varianta obrábění. Vložky byly přišroubovány do kapes testovací desky a tvoří tak jeden celek.

Třetí část diplomové práce vychází z výsledků provedených experimentů obrábění ve druhé části diplomové práce. Byla zkonstruována experimentální prototypová vstřikovací forma určena pro výrobu dvou zrcadlových výlisků. Jedna polovina formy byla obráběna klasicky, tj. stávající zavedenou technologií, druhá polovina formy byla obráběna optimalizovanou technologií. Obě technologie byly porovnány z hlediska strojního času, kvality obrobeneho a nutnosti dokončovacích prací.

Na závěr byly shrnuty a porovnány výsledky dosažené v této diplomové práci.

1.2 O společnosti

MBtech Bohemia s.r.o. je dceřinou společností *MBtech Group*, která je součástí německého koncernu *Daimler AG* a francouzské společnosti *AKKA Technologies*. Společnost s pobočkami v Evropě, Jižní Americe a Asii má kolem 2900 zaměstnanců a patří mezi deset největších inženýrských a poradenských firem v automobilovém průmyslu. Inženýrské a poradenské služby společnosti *MBtech Group* pokrývají celý vývojový proces a životní cyklus jejích produktů.

V České republice působí firma *MBtech Bohemia s.r.o.* v Praze, Plzni a Mladé Boleslavi a zaměstnává kolem 300 pracovníků. Tato diplomová práce byla zpracována v plzeňské pobočce, která se nachází v průmyslové zóně Borská pole a je prototypovým a výrobním střediskem pro Českou republiku.

Plzeňská pobočka *MBtech Bohemia s.r.o.* vyvíjí, konstruuje a zhotovuje prototypy, nástroje, přípravky a zařízení. Je rozdělena na tři části. Jedná se o oddělení testovacích řídiců (*Dauerlauf*), oddělení konstrukce a výroby přípravků (*Vorrichtungsbau*) a oddělení konstrukce a výroby nástrojů včetně modelárny (*Werkzeugbau und Modellbau*). V současné době zde pracuje 90 zaměstnanců, strojní park firmy je rozmanitý, disponuje tříosými frézkami menších rozměrů (rozměry stolu 800 x 650 x 550), pětiosými frézkami středních rozměrů (rozměry stolu 1250 x 1000 x 1000), horizontální vyvrtávačkou, portálovou frézku (rozměry stolu 6800 x 3500 x 2000) či strojem pro elektroerozivní obrábění (rozměry stolu 800 x 600 x 400). K výrobě plastových výlisků slouží vstříkovací lis a k jejich následné kontrole třísouřadnicový měřicí stroj (rozměry stolu 6500 x 3500 x 200).

Společnost *MBtech Bohemia s.r.o.* je certifikována dle EN ISO 9001:2008.



Obr. 1.1: MBtech Bohemia s.r.o. – pohled na hlavní budovu [5]

1.3 Prototypová vstřikovací forma

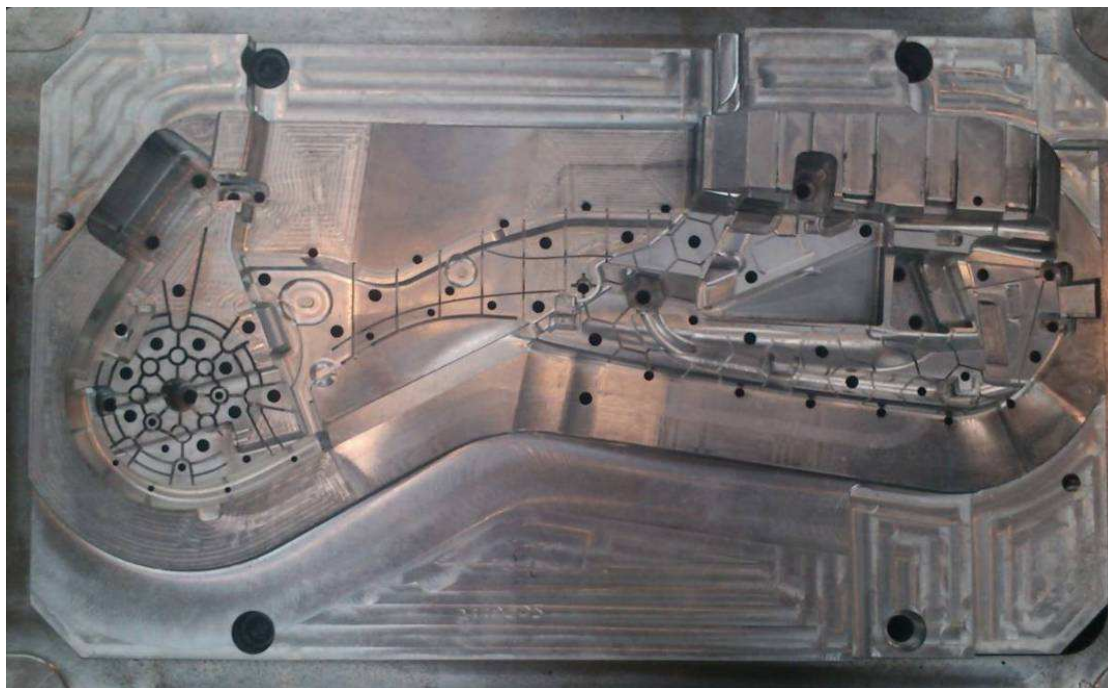
Většina produktů firmy *MBtech Bohemia s.r.o.* je určena pro automobilový průmysl. Uvedení nového modelu každého automobilu na trh předchází náročný vývoj a testování. Před zahájením sériové výroby se staví předvýrobní automobily na testy, tzv. prototypy. Na výrobu jejich komponent je použita náhradní (prototypová) technologie, která dostatečně pokryje prvotní poptávku po několika stech kusech prototypových plastových dílů. Zatímco v sériové výrobě jsou používány odladěné ocelové formy, které jsou schopny vyprodukovat několik desítek až stovek tisíc kusů výlisků, v prototypové výrobě jsou používány formy z různých slitin hliníku, které jsou schopny vyprodukovat několik set až tisíc kusů plastových výlisků.

Hlavní výhody prototypových forem jsou následující:

- Velmi krátká doba výroby formy. Jedná se o kusovou výrobu, doba od zadání poptávky zákazníkem do vyrobení hotového plastového dílu se pohybuje v týdnech (většinou 8 až 10 týdnů dle náročnosti a momentální kapacity výroby).
- Několikanásobně nižší náklady na pořízení formy. U jednoduchých dílů se cena prototypové a ocelové formy příliš neliší, u složitějších forem je však cenový poměr výrazný.
- Možnost výroby prototypového dílu z materiálu, který bude použit později v sériové výrobě. Toho lze využít například při náběhu nové sériové výroby, kdy ještě není hotová ocelová forma, ale zákazník již žádá výlisky.
- Možnost častého a operativního provedení změn geometrie výlisku v kombinaci s časovým tlakem na jeho výrobu. Změny geometrie lze provést například vložkováním či odfrézováním.
- Uplatnění i v jiných oborech, kde prioritou je čas, nízká cena a menší série plastových dílů.

Mezi nevýhody patří relativně velké náklady na výrobu jednoho kusu, ty jsou však při malé sérii v porovnání s cenou formy zanedbatelné.

Z těchto aspektů vyplývá, že pro výrobu prototypové vstřikovací formy je nejdůležitější co nejkratší doba výroby, cena výroby, proveditelnost výroby a také snadná a rychlá realizace změn tvaru a parametrů formy. V porovnání se sériovou výrobou nehraje stěžejní roli rozměrová přesnost, tolerance výlisků jsou vyšší než u sériových produktů.



Obr. 1.2: Ukázka prototypové vstříkovací formy [5]

2 Popis současného stavu ve firmě, teoretická část

Tato diplomová práce je zaměřena na optimalizaci technologie obrábění prototypové vstřikovací formy a byla zpracována v oddělení konstrukce a výroby forem včetně modelárny (*Werkzeugbau und Modellbau*). V první části práce je potřeba provést analýzu současného stavu výrobního procesu ve firmě, na jejímž základě budou nalezeny možnosti optimalizace. Obecně lze výrobní proces rozdělit na následující části: CAD konstrukce nástrojů, příprava výroby a volba vhodného stroje, CAM programování a vlastní výroba (tj. frézování), která zahrnuje i ruční dokončovací operace (leštění, pasování, zámečnick).

2.1 Postup při zhotovení nové zakázky

Protože je každá zakázka odlišná, nelze přesně stanovit univerzální postup jejího provedení. V některých případech se jedná pouze o zakázkové obrábění či tlakové lití, jindy o vývoj, konstrukci i výrobu kompletní vstřikovací formy. Obecně lze však říci, že základní postup průběhu nové zakázky je vždy podobný.

Na základě předchozí domluvy zákazník pošle v elektronické podobě data požadovaného dílu. Oddělení konstrukce nástrojů vytvoří CAD návrh kompletní vstřikovací formy, přičemž konzultuje s oddělením CAM programování případné komplikace při následném obrábění. Oddělení přípravy výroby určí technologii výroby a stroje, na kterých se bude obrábět. Vychází při tom z mnoha faktorů, např. momentální kapacity strojů, dodacího termínu požadovaného zákazником, rozměrů polotovaru, náročnosti obrábění. Úplná CAD data včetně kusovníku a dokumentace jsou poté předány oddělení CAM programování, které vypracuje dle zadaných parametrů a technologie programy pro obrábění. Hotové programy včetně výrobní dokumentace a seřizovacích listů jsou předány do výroby, kde po přípravě potřebných nástrojů a vybavení začíná frézování jednotlivých pozic budoucí vstřikovací formy. Po vyfrézování všech pozic následuje ruční dokončování, tzn. leštění (je-li to nutné, tak i zámečnick) a pasování formy. Pokud je vše v pořádku, následuje zhotovení výlisků na vstřikovacím lisu. Hotové plastové díly jsou zkontrolovány, přeměřeny, zabaleny a připraveny k expedici.

2.2 CAD konstrukce nástrojů

Konstrukce nástrojů je realizována pomocí CAD softwaru *Catia*, který velmi dobře komunikuje s CAM softwarem *Tebis* pomocí formátů dat CATpart, IGES, STEP apod. Hlavním úkolem konstruktérů je na základě dat finálního výlisku racionálně zhotovit model prototypové vstřikovací formy. Tento úkol obnáší mimo jiné stanovení rozměrů a materiálu polotovaru, určení polohy dělicí roviny, počtu, tvaru a materiálu potřebných vložek a vyhazovačů, polohy a rozměrů vtokových kanálů, odvodu formy, případné umístění horkých vtoků a chladicí soustavy – k tomu slouží simulace vstřikování, tzn.

molflow analýza. Z hlediska manipulace a následného upínání na frézce a vstřikovacím lisu nelze při konstrukci zapomenout na pomocné závity a upínací otvory, popř. otvory pro najetí nulového bodu.

2.3 Příprava výroby, volba stroje a nástrojů

Oddělení přípravy výroby je úzce napojeno na oddělení konstrukce. Po dokončení CAD modelu prototypové vstřikovací formy a určení všech požadavků a parametrů budoucí formy jsou veškeré podklady předány oddělení přípravy výroby. To má za úkol objednat příslušný polotovár, popř. ostatní komponenty (např. vyhazovače či horké vtoky), naplánovat průběh CAM programování a vlastní výroby. S tím souvisí i správná volba stroje dle momentální kapacity výroby, složitosti obráběné formy a rozměrů polotovaru. Vzhledem k převládající obsazenosti pětiosých frézek je vhodné frézovat jednodušší kusy na tříosých frézách (i za cenu více upnutí), popř. zde hrubovat složitější kusy a ty následně dokončovat na pětiosé frézce.

Paleta nástrojů používaných k obrábění je široká, jedná se o přední výrobce nástrojů pro třískové obrábění, např. Iscar, WNT, Pokolm, Hoffmann Group či Meusburger.

2.4 CAM programování

Programování je realizováno pomocí CAM softwaru *Tebis*, který velmi dobře komunikuje s CAD softwarem *Catia* pomocí formátů dat CATpart, IGES, STEP apod. Hlavním úkolem programátorů je tvorba racionálních NC programů za použití vhodné technologie, nástrojů a parametrů. Hlavními ukazateli správnosti zhotovených programů jsou strojní čas a kvalita obrobeneho povrchu. Mezi největší problémy spojené s CAM programováním patří:

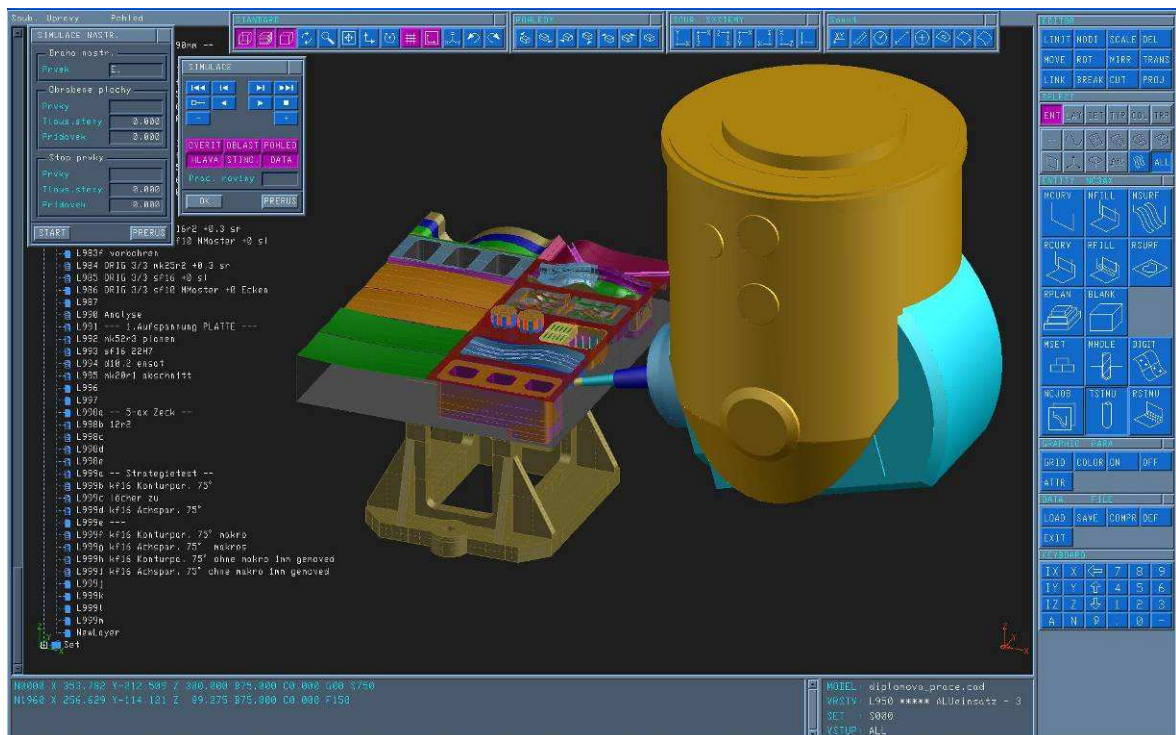
- příliš dlouhé strojní časy (způsobené např. špatnou CAM strategií či nevhodnými parametry frézování),
- nevyhovující kvalita obrobeneho povrchu (způsobená např. nedostatečným předhrubováním či použitím příliš dlouhého nástroje),
- nadbytečná práce (řídít se požadavky zákazníka a frézovat jen to, co je nutné, např. rozlišovat kvalitu pohledových ploch od kvality povrchu manipulačních drážek),
- chyby způsobené lidským faktorem (nelze je zcela eliminovat, lze jim však předcházet, např. důsledným používáním kontroly kolize).

Pozn.: V současné době firma uvažuje o pořízení souvislého pětiosého CAM modulu (momentálně je k dispozici pouze tříosý a pětiosý 3+2 CAM modul), proto je část experimentů v této práci zaměřena na porovnání současné klasické technologie se

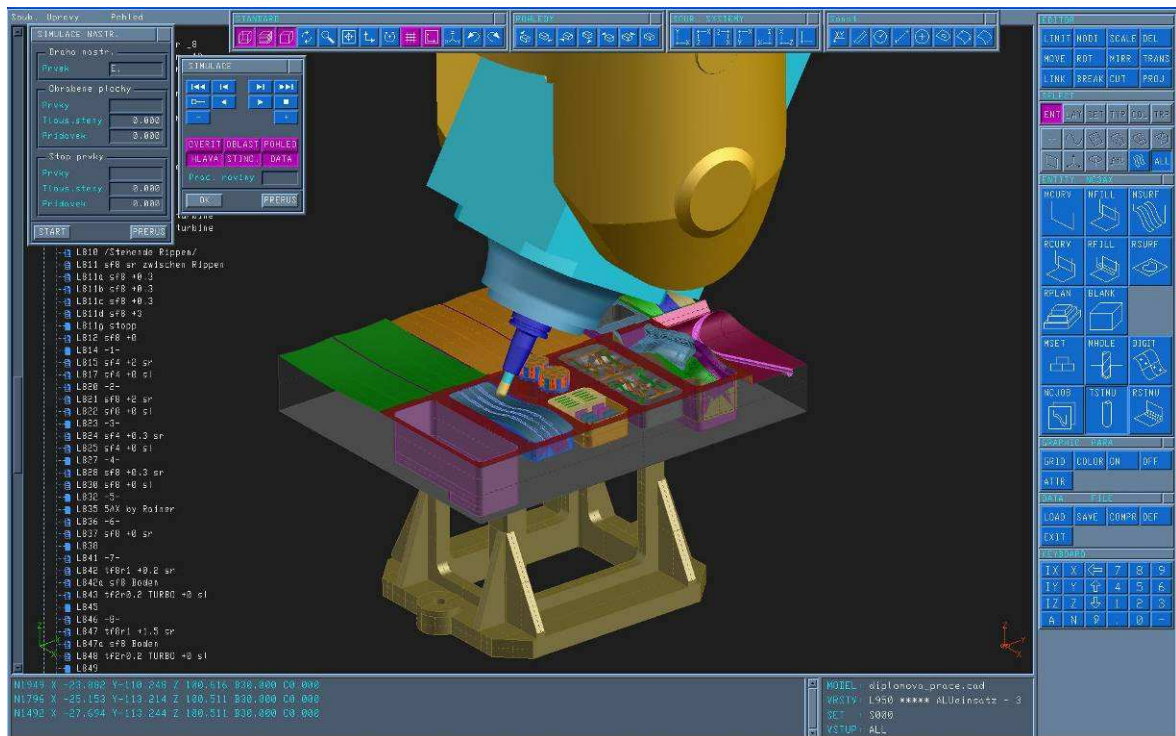
souvislým pětiosým frézováním. Souvislé pětiosé programy použité v této diplomové práci byly zhotoveny externě.

2.4.1 O programu Tebis

Software od německé firmy *Tebis AG* poskytuje komplexní řešení při tvorbě NC programů. Umožňuje komunikaci s CAD softwarem (např. Catia), přenos geometrie modelu, její analýzu a následnou editaci, tvorbu a generování NC programů, vizualizaci a simulaci pracovních drah nástroje, zhotovení výrobní dokumentace, správu knihoven a postprocesorů atd. CAM software *Tebis* je nejčastěji využíván v automobilovém, popř. leteckém průmyslu, v oblastech výroby forem a modelů. Mezi jeho přednosti se řadí přehlednost, rychlé generování NC kódu, rozšířené knihovny nástrojů a konstrukčních prvků, nevýhodou je relativně vysoká pořizovací cena.



Obr. 2.1: Prostředí CAM softwaru Tebis [5]



Obr. 2.2: Prostředí CAM softwaru Tebis [5]

2.5 Výroba, frézování

Vlastní výroba (tj. především frézování) je finální a velmi důležitou částí celého procesu zhotovení prototypové vstřikovací formy. Je zpětnou vazbou úzce napojena jak na CAD konstrukci, tak na CAM programování. Je zřejmé, že výslednou kvalitu obrobeneho povrchu a strojní čas kromě CAM programátora velkým dílem ovlivňuje právě obsluha frézky (např. hodnotou řezných parametrů, použitým nástrojem, vhodným upnutím obrobku apod.). V prototypové výrobě je od obsluhy očekáván flexibilní a racionální přístup, protože se jedná zpravidla o kusovou výrobu, kdy je třeba každému vyráběnému kusu věnovat zvláštní pozornost.

2.5.1 Materiál používaný na výrobu prototypové vstřikovací formy

- vypracováno s použitím [2]

Na výrobu prototypových vstřikovacích forem jsou ve firmě *MBtech Bohemia s.r.o.* nejčastěji používány dva druhy hliníkových slitin, a sice EN AW 5083 a EN AW 7075. Základní parametry a vlastnosti těchto slitin udává tabulka 2.1.

Mezinárodní označení	EN AW 5083	EN AW 7075
Chemické označení	AlMg4,5Mn0,7	AlZn5,5MgCu
Pevnost v tahu [MPa]	270	520
Mez v kluzu [MPa]	120	450
Tažnost [%]	12	6
Vnitřní pnutí ¹	2	5
Obrobitelnost ¹	2	2
Svařitelnost ¹	2	6
Odolnost vůči korozi ¹	1	5

1) Relativní hodnoty hliníkových slitin od 1 (velmi dobrý) do 6 (nevhodný)

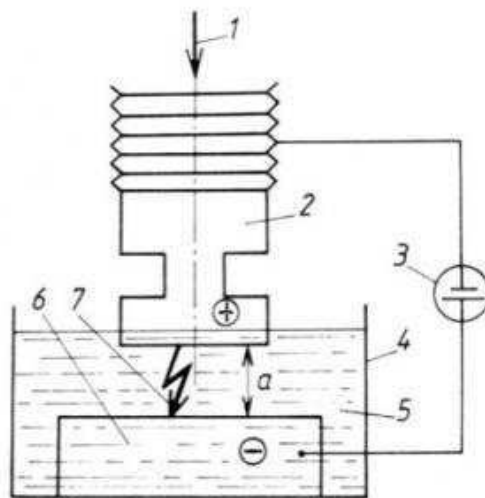
Tabulka 2.1: Základní parametry a vlastnosti hliníkových slitin [2]

2.5.2 Elektroerozivní obrábění

- vypracováno s použitím [7]

Strojní park firmy *MBtech Bohemia s.r.o.* disponuje kromě frézek také strojem pro elektroerozivní obrábění, které je v diplomové práci také zmiňováno a v kapitole 4.2.4 dokonce porovnáváno s technologií frézováním.

Základním principem elektroerozivního obrábění je působení vysoké koncentrace energie na obráběný materiál, který následně taje a odpařuje se. Vysoká energie vzniká působením elektrického výboje mezi anodou (tj. nejčastěji nástrojová elektroda) a katodou (tj. nejčastěji obrobek) ponořenými do tekutého dielektrika, což je zpravidla kapalina s vysokým elektrickým odporem. Je zřejmé, že pomocí této technologie lze obrábět pouze elektricky vodivé materiály.



Obr. 2.3: Princip elektroerozivního obrábění; 1 – směr posuvu nástrojové elektrody, 2 – nástrojová elektroda, 3 – generátor, 4 – pracovní vana, 5 – tekuté dielektrikum, 6 – obrobek, 7 – elektrický výboj [7]

3 Hledání možností optimalizace

Při hledání možností optimalizace se vychází ze současného stavu ve firmě. Protože jsou všechny stupně výroby od konstrukce až po leštění formy velmi úzce provázané, je třeba se věnovat každé z těchto činností jednotlivě. Z komplexního pohledu na výrobu vstříkovací formy je však zřejmé, že výsledná kvalita zhotovení nejvíce závisí na zvolené technologii a parametrech obrábění, tedy obecně na CAM programování. (Konstrukce je totiž velmi úzce spjata s požadavky zákazníka a ty bývají předem dány.) Z tohoto důvodu je při hledání možností optimalizace kladen hlavní důraz na oblast CAM programování, protože zde se skrývá největší potenciál pro zlepšování.

3.1 CAD konstrukce nástrojů

Konstrukce prototypové vstříkovací formy závisí na parametrech výlisku požadovaného zákazníkem. Je nezbytné během konstrukce zohlednit požadavky a nároky kladené ze strany výroby a CAM programování a řídit se zásadami technologičnosti konstrukce. Takto lze docílit efektivnější výroby, např. značného snížení pracnosti při obrábění. Je třeba se zaměřit převážně na následující případy:

- volit rozumný počet, umístění, tvar a materiál vložek (samozřejmě dle možností),
- omezit výskyt hlubokých kapes s malým poloměrem rohů (vyšší strojní čas),
- zaoblovat hrany, rohy a kouty (méně zbytkového materiálu při obrábění, zvýšení pevnosti a tuhosti, snížení vnitřního pnutí),
- zamezit výskytu podkosů (tj. negativní sklon ploch – brání vyjmutí výlisku z formy),
- kvalita konstruovaných ploch (např. plochy kontrolních modelů či plochy pro souvislé pětiosé frézování by měly mít kvalitu „Class A“).

3.2 CAM programování

CAM programátor tvorbou NC programů přímo ovlivňuje výrobu vstříkovací formy, tzn. i výslednou kvalitu obrobeného povrchu a strojní čas. Základním předpokladem pro tvorbu optimální technologie je dostatečné množství zkušeností, racionální a logické myšlení a schopnost udržet pozornost.

Z hlediska optimalizace je třeba se zaměřit převážně na následující případy:

- Obráběnou sestavu vhodně rozdělit a podobné kusy frézovat společně z jednoho polotovaru, popř. druhé upnutí vložek dokončovat již ve složeném stavu ve formě (lepší kvalita obrobení, nižší čas na upínání).

- Rovinné plochy frézovat čelní válcovou, popř. toroidní frézou a neřádkovat kulovou frézou (dosažení výborné kvality povrchu za použití až 20x vyššího přířuvu, ostré hrany v rozích, nižší nebo žádné nároky na zbytkový materiál).
- Používat vhodnou strategii pro dokončování, pro delší rovné plochy je určena strategie podél osy, pro plochy s vodícím prvkem je určena strategie podél kontury s vodícím prvkem. Pokud je to možné, využívat pendlování nástroje.
- Používat vhodné přířuvy na dokončování (příliš malé přířuvy = zvýšení strojního času), je třeba rozeznávat „důležité“ pohledové plochy (tzn. nižší přířuv) od méně důležitých či nedůležitých ploch (tj. různá odlehčení, manipulační otvory apod.).
- Vždy používat nejkratší možný nástroj, poté lze frézovat vyšším posuvem, zkrátit tak strojní čas a docílit vyšší kvality obrobeneho povrchu (nedochází k vibracím a chvění nástroje).
- Výpočet programu s přepočítáním polotovaru trvá znatelně déle. Je nutné vždy rozmyslet, je-li výpočet polotovaru nutný, resp. nechat dlouhé programy počítat přes noc.
- V budoucnu používat souvislý pětiosý modul (v mnoha případech lze docílit značné úspory času).

3.3 Výroba, frézování

Optimalizací vlastní výroby vstřikovací formy lze docílit značných časových i finančních úspor, popř. docílit vyšší kvality obrobeneho povrchu. Velmi důležitým faktorem jsou zkušenosti a přístup obsluhy, flexibilita a racionální myšlení. Ve výrobě je třeba se zaměřit na následující případy:

- Obecně příliš „opatrné“ frézování (v rámci prototypové výroby lze často např. zvýšit posuvy).
- Dokončování tupým nástrojem (negativně se projeví na průběhu obrábění a na výsledné kvalitě povrchu).
- Použití příliš dlouhého nástroje, který má tendenci k vibracím a ke chvění (např. frézování hluboké kapsy je programátorem rozděleno na tři úrovně, tzn. použití tří různě dlouhých nástrojů, obsluha však frézuje rovnou tím nejdelším).
- Nečinnost stroje např. během polední pauzy; vhodnou přípravou a načasováním lze např. již odladěné či dokončovací programy nechat běžet bez obsluhy přes pauzu, popř. přes noc.

- Podobné kusy frézovat společně z jednoho polotovaru, popř. druhé upnutí vložek dokončovat již ve složeném stavu ve formě (lepší kvalita obrobení, nižší čas na upínání).
- Konzervativní přístup k novinkám (zaměřit se na novou generaci produktivnějších nástrojů na obrábění, např. obměnit stávající dokončovací monolitní nástroje např. nástroji s VBD, vyzkoušet více různých nástrojů na hrubování, testovat dokončování toroidní frézou 16r7, popř. 10r4).

4 Provedení experimentů v oblasti technologie obrábění

Základní podmínkou pro dosažení cíle diplomové práce a stanovení optimalizované technologie je provedení experimentů obrábění, na jejichž základě budou vyhodnoceny nejvhodnější strategie a parametry obrábění.

Experimenty jsou rozděleny do tří fází. První fáze je zaměřena především na měření strojního času a porovnání různých strategií frézování. Je obráběna polyuretanová testovací deska (hliníková deska by byla finančně nákladná, pro tuto fázi experimentů stačí tato náhražka – měří se hlavně strojní časy), která obsahuje vedle testovaných prvků a kontur (vyduté a vypuklé plochy, kónické kapsy, plochy určené pro dokončovací frézování, těsnící drážku) také různě hluboké kapsy pro hliníkové vložky. Při konstrukci testovací desky byly použity a zohledněny prvky a kontury vycházející z prototypové výroby firmy *MBtech Bohemia s.r.o.* (tj. výroba forem pro tlakové lití a také výroba modelů). Tyto prvky se ve výrobě vyskytují téměř denně, správně provedenou optimalizací lze proto docílit značného zefektivnění výroby v podobě snížení strojních časů, menšího opotřebení nástrojů či zlepšení jakosti produktu (kvalita obrobeneho povrchu, rozměrová přesnost).

Druhá fáze experimentů se zabývá obráběním hliníkových vložek, které obsahují následující prvky: různě hluboké kapsy, torzní kanály, žebra, úzké drážky, vtokové kanály a tvarové kontury. Kromě měření strojních časů je kladen důraz především na proveditelnost a porovnání dané strategie frézování a kvalitu výsledného povrchu. Z tohoto důvodu nelze k obrábění použít polyuretanovou desku jako v první fázi experimentů, pro dosažení reálně vypovídajících výsledků je nutno obrábět skutečný materiál, z kterého jsou zhotovovány vstřikovací formy, tzn. slitinu hliníku. Hotové hliníkové vložky budou na závěr upevněny pomocí kolíků a šroubu do kapes polyuretanové desky, bude tak vytvořen jeden celek shrnující veškeré výsledky první a druhé fáze provedených experimentů.

Třetí fáze experimentů (viz kapitola 5) vychází z dílčích výsledků první a druhé části a je zaměřena na zkonstruování a následné vyrobení experimentální prototypové vstřikovací formy. Tato forma je určena pro výrobu dvou zrcadlových výlisků, jedna polovina formy je frézována původní technologií, druhá polovina optimalizovanou technologií vycházející z výsledků předchozích experimentů. Po zhotovení formy jsou porovnány obě technologie z hlediska strojních časů, kvality obrobení a nutnosti dokončovacích prací.

4.1 První fáze experimentů

V první fázi experimentů byla obráběna polyuretanová deska o rozměrech 625 x 500 x 100 mm, specifické označení materiálu výrobcem je RAKU TOOL WB-1222 (technický list viz příloha č. 7 [6]). Jedná se o blokový materiál pro formy a nástroje vyznačující se dobrou obrobiteľností a vysokou otěruvzdorností. Tento materiál byl zvolen s ohledem na pořizovací cenu, jedná se o ekonomicky dostupnou alternativu k hliníkovým slitinám.

Protože je první fáze experimentů zaměřena na měření strojního času v závislosti na zvolené strategii, není druh použitého materiálu rozhodující.

Vzhledem k upínání a rozměrům obráběné desky (viz obr. 4.2) byla pro první fázi experimentů použita portálová frézka Forest-Line o rozměrech pracovního prostoru 6800 x 3500 x 2000 mm (foto viz obr. 4.1). Vzhledem k druhu obráběného materiálu nebylo při frézování použito chlazení. Volba řezných podmínek a parametrů obrábění vycházela z hodnot doporučených výrobcí nástrojů [3] a také z praktických zkušeností obsluhy stroje.



Obr. 4.1: Portálová frézka Forest-Line [5]

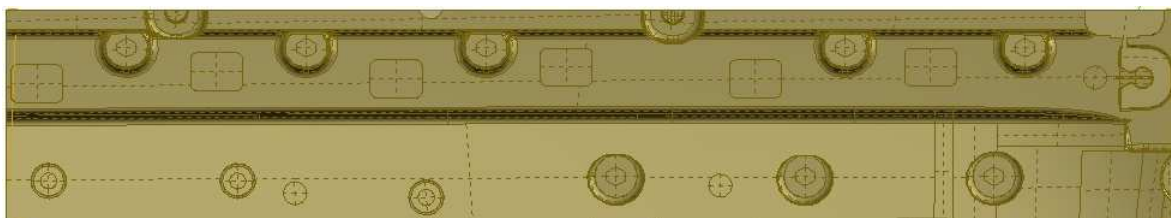


Obr. 4.2: Upnutí testovací desky na stole portálové frézky [5]

Následuje popis provedení jednotlivých experimentů č. 1 až 9 frézování polyuretanové testovací desky.

4.1.1 Experiment č. 1 - dokončovací strategie

Testováno bylo dokončovací frézování kulovou frérou o průměru 16 mm (parametry experimentu viz tabulka 4.1) na dvou kratších protilehlých bocích testovací desky (obráběná kontura viz obr. 4.3). Obráběný povrch obsahuje větší množství překážek (ostrůvků), které jsou od sebe nepříliš vzdáleny, nabízí se tedy užití CAM programátory často používané strategie frézování podél kontury. Strategie podél osy bude frézovat zbytečně dlouho ve vzduchu (vlivem zalepení otvorů a kapes). Každý program byl testován ve dvou provedeních, a sice jednou s použitím nájezdového makra (nájezd kolmo k ploše, radius 2) a podruhé bez nájezdového makra. Veškeré ostatní parametry zůstaly pro oba experimenty nezměněny, změnila se tedy pouze strategie frézování a použití nájezdového makra.



Obr. 4.3: Experiment č. 1 – kontura obráběná pomocí dokončovací strategie

Tabulka parametrů frézování:

EXPERIMENT č. 1	Podél kontury bez nájezdů	Podél kontury s nájezdy (R2 90°)	Podél osy bez nájezdů	Podél osy s nájezdy (R2 90°)
Použitá fréza	kf 16			
Přídavek [mm]	načisto			
Přísuv [mm]	0,45			
Posuv [mm/min]	11000			
Otáčky [1/min]	15000			
Směr frézování	pendlování			
Kvalita povrchu	8/10	9/10	9/10	9/10
Strojní čas [min]	36:19	45:14	24:22	36:33

Tab. 4.1: Experiment č. 1 – parametry frézování dokončovací strategií

Výsledek č. 1: Ukázalo se, že ačkoliv je strategie podél osy nepatrně náročnější na programování (zalepení otvorů a kapes), na portálové frézce je v daném případě o 33 % rychlejší než strategie podél kontury.

Frézováním strategií podél kontury dochází k neustálým změnám záběrových podmínek frézy, výsledný obrobený povrch je mírně zvlňený a na pohled jsou viditelné dráhy nástroje ve formě „psaniček“. Frézováním strategií podél osy je docíleno konstantní řezné rychlosti; přestože je frézovaná větší plocha (vlivem zalepení otvorů a kapes), je strategie podél osy výhodnější i přes členitost kontury. Ve většině případů frézování rovných ploch je výhodné použít strategii podél osy. Pro frézování oblouků (např. podběhy automobilu) je výhodnější použít strategii podél kontury.

Vlivem použití nájezdových maker (R2) došlo ke zvýšení strojního času o 20 % u strategie podél kontury a o 33 % u strategie podél osy. Je nutné používat nájezdová makra jen v nutných případech u složitých ploch, u jednoduchých ploch mají minimální vliv na kvalitu povrchu a značně prodlužují výsledný strojní čas.

4.1.2 Experiment č. 2 – dokončovací strategie

Testováno bylo dokončovací frézování kulovou frézou o průměru 16 mm (parametry experimentu viz tabulka 4.2) na zbylých dvou protilehlých bocích testovací desky (obráběná kontura viz obrázek 4.4). Obráběný povrch obsahuje malé množství překážek (ostrůvků), které jsou od sebe značně vzdáleny, nabízí se tedy použití strategie frézování podél osy (se zalepením otvorů a kapes v CAM softwaru). Tato strategie bude porovnána se strategií frézování podél kontury (není nutno nic zalepovat). Veškeré parametry zůstaly pro oba experimenty nezměněny, změnila se pouze strategie frézování (tj. frézování podél kontury a frézování podél osy).



Obr. 4.4: Experiment č. 2 – kontura obráběná pomocí dokončovací strategie

Tabulka parametrů frézování:

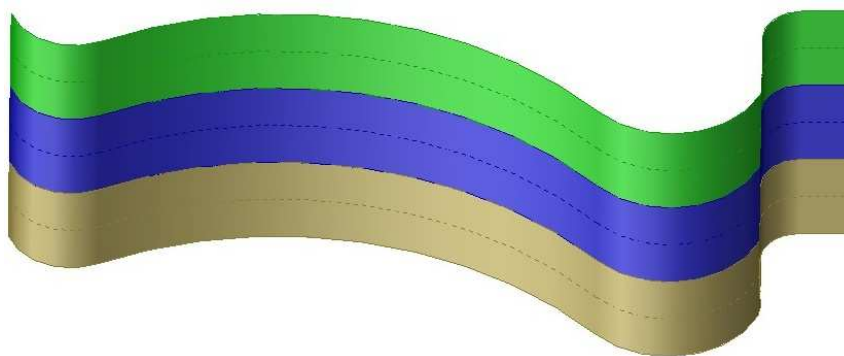
EXPERIMENT č. 2	Podél osy bez nájezdů	Podél kontury bez nájezdů
Použitá fréza	kf 16	
Přídavek [mm]	načisto	
Přisuv [mm]	0,45	
Posuv [mm/min]	11000	
Otáčky [1/min]	15000	
Směr frézování	pendlování	
Kvalita povrchu	9/10	8/10
Strojní čas [min]	20:34	47:55

Tab. 4.2: Experiment č. 2 – parametry frézování dokončovací strategií

Výsledek č. 2: Podobně jako v experimentu č. 1, i v tomto případě bylo dosaženo rychlejšího a kvalitnějšího obrobení pomocí strategie podél osy. V daném případě bylo frézování strategií podél osy rychlejší o 57 % než pomocí strategie podél kontury.

4.1.3 Experiment č. 3 – zvlněný povrch

V tomto experimentu bylo testováno frézování zvlněné plochy (viz obr. 4.5) kulovou a čelní válcovou frézou o průměrech 16 mm (parametry experimentu viz tabulka 4.3). Experiment je rozdělen do tří částí: v první části obrábí zvlněnou plochu kulová fréza pod nakloněním 30°, ve druhé části obrábí totožná kulová fréza bez naklonění tříose a ve třetí části obrábí čelní válcová fréza s nakloněním 90°.



Obr. 4.5: Experiment č. 3 – frézování zvlněného povrchu

Tabulka parametrů frézování zvlněného povrchu:

EXPERIMENT č. 3	Kulová 30°	Kulová 0°	Čelní válcová 90°
Použitá fréza	kf 16	kf 16	sf 16
Přídavek [mm]	0,3 + načisto		
Přísuv [mm]	3 + 0,55	3 + 0,55	5 + 10
Posuv [mm/min]	5000		
Otáčky [1/min]	13500		
Směr frézování	pendlování	pendlování	sousledně
Strojní čas [min]	7:38	7:18	0:57

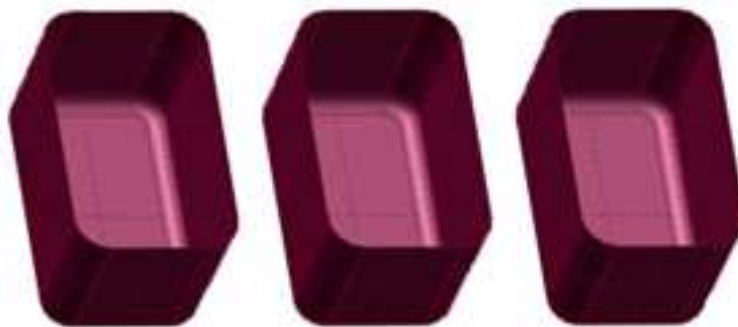
Tab. 4.3: Experiment č. 3 – parametry frézování zvlněného povrchu

Výsledek č. 3: Náročnost programování je ve všech třech případech srovnatelná. Nejlepší kvality a nejrychlejšího obrobení bylo dosaženo pomocí třetí varianty, tj. čelní válcovou frézou pod nakloněním 90°. Vzhledem k tomu, že není vždy technologicky možné použít takové naklonění nástroje, je často nutné dokončovat povrch kulovou frézou řádkováním.

V takovém případě je nutné frézovat pod naklopením, aby nedocházelo k obrábění středem kulové frézy (tj. oblastí s nulovou řeznou rychlostí).

4.1.4 Experiment č. 4 – kónické kapsy

V první části tohoto experimentu bylo testováno hrubování tří totožných kónických kapes (viz obr. 4.6) toroidní frézou 16r2 (parametry experimentu viz tabulka 4.4). Veškeré parametry obrábění zůstaly pro všechny případy stejné, měnily se pouze hrubovací parametry v CAM softwaru (tzn. šířka pole, poloměr kontury, poloměr dráhy a vyhlazení dráhy, viz CAM software Tebis).



Obr. 4.6: Experiment č. 4 – frézování kónických kapes

Tabulka parametrů pro hrubování kónických kapes:

EXPERIMENT č. 4a	Kapsa č. 1	Kapsa č. 2	Kapsa č. 3
Použitá fréza	tf 16r2		
Přídavek [mm]	0,3		
Hloubka řezu [mm]	1,5		
Překrytí dráhy [mm]	10		
Posuv [mm/min]	15000		
Otáčky [1/min]	13500		
Směr frézování	sousledně		
Šířka pole	3	0	0
Poloměr kontury	0	0	0
Poloměr dráhy	0	0	0
Vyhazení dráhy	3	3	0
Strojní čas [min]	2:15	2:10	1:56

Tab. 4.4: Experiment č. 4a – parametry hrubování kónických kapes

Výsledek č. 4a: Vzhledem k malé velikosti a značné jednoduchosti testovaných kapes nelze z experimentu vyvodit obecný závěr. Přesto byly demonstrovány značné časové rozdíly v závislosti na použitých parametrech hrubování.

Ve druhé části tohoto experimentu bylo porovnáno frézování kónických kapes načisto za použití tří následujících strategií:

- 1. kapsa: toroidní fréza – strategie 1° tříose,
- 2. kapsa: kulové frézy – klasická strategie tříose (načisto + zbytkový materiál),
- 3. kapsa: toroidní fréza – boky pětiose, dno a spodní rádius tříose.

Ad 1) Frézování strategií 1° tříose. Kónická kapsa byla pomyslně rozdělena na 3 oblasti: bok, spodní rádius a dno. Bok a spodní radius je nutno řádkovat, u dna lze využít čelo nástroje a frézovat s větším přísuvem. Byla použita toroidní fréza 16r2.

Ad 2) Frézování klasickou dokončovací strategií tříose. Dokončení načisto proběhlo kulovou frézou o průměru 16 mm, spodní rádius kapsy zbytkovým materiálem kulovou frézou o průměru 6 mm.

Ad 3) Frézování boků pětiose, dno a spodní rádius tříose. Byla použita toroidní fréza 12r2, boky pětiose – použití větší hloubky řezu, spodní rádius a dno bylo nutno dokončit tříose.

Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1,5 minuty.

Tabulka parametrů pro dokončování kónických kapes:

EXPERIMENT č. 4b	Strategie 1°	Klasické dokončování		Boky kapsy pětiose	
		Dokončování	Zbytkový mat.	Bok pětiose	Dno tříose
Použitá fréza	tf 16r2	kf 16	kf 6	tf 12r2	
Přídavek [mm]	načisto				
Přísuv [mm]	bok 0,4; dno 6	0,55	0,3	4	0,4 + 6
Posuv [mm/min]	10000				
Otáčky [1/min]	13500				
Směr frézování	pendlování				
Celkový strojní čas [min]	5:58	4:38	3:47	2:06	0:45
		9:55		2:51	

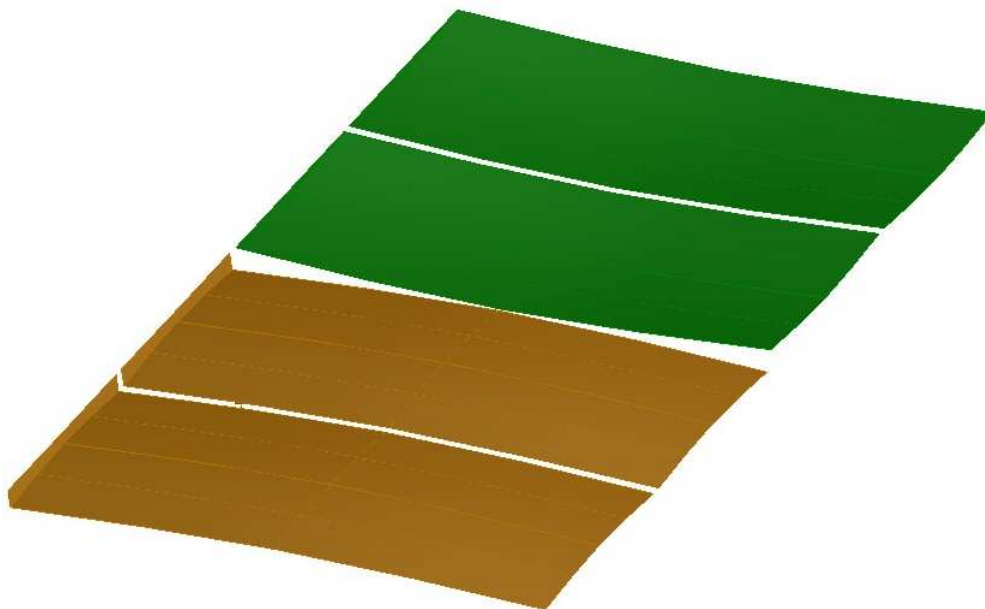
Tab. 4.5: Experiment č. 4b – parametry dokončování kónických kapes

Výsledek č. 4b: V současné době je pro firmu nejvhodnější používat strategii 1°, kterou je dosaženo výborného povrchu za použití jednoho nástroje. Dojde-li k pořízení souvislého pětiosého modulu, je třeba kapsy tohoto typu frézovat pětiose – je dosaženo nižšího

strojního času a zachována výborná kvalita obrobeného povrchu. Dokončování kulovou frézou se vzhledem k nutnosti výměny nástroje a zbytkovému materiálu z časových důvodů neosvědčilo.

4.1.5 Experiment č. 5 – vypuklá a vydutá plocha tříose

V tomto experimentu bylo testováno frézování vypuklé a vyduté plochy (viz obr. 4.7) tříose kulovou frézou o průměru 16 mm. Vypuklá plocha charakterizuje střechu automobilu, která občas bývá v oddělení modelárny frézována. Kromě měření strojního času byla pozorována také kvalita povrchu v oblasti frézování středem nástroje. Tabulka parametrů, vyhodnocení výsledků a porovnání s pětiosým frézováním viz následující kapitola 4.1.6.



Obr. 4.7: Experiment č. 5 + 6 – frézování vypuklé a vyduté plochy

4.1.6 Experiment č. 6 – vypuklá a vydutá plocha pětiose

V tomto experimentu bylo testováno frézování totožné vypuklé a vyduté plochy jako v předcházejícím experimentu č. 5, tentokrát však pětiosou toroidní frézou 12r2. Jedná se o rovnoměrně vypuklou plochu bez překážek, nabízí se tedy použití souvislého pětiosého obrábění.

Tabulka parametrů pro experimenty č. 5 a 6:

EXPERIMENT č. 5 + 6a	Vypuklá tříose	Vydutá tříose	Vypuklá pětiose	Vydutá pětiose
Použitá fréza	kf 16		tf 12r2	
Přídavek [mm]	0,5 + načisto			
Přísuv [mm]	3 + 0,55		4 + 1,6	
Posuv [mm/min]	12000		8000	
Otáčky [1/min]	13500			
Směr frézování	pendlování			
Kvalita povrchu				
Strojní čas [min]	5:36	5:36	7:40	6:49

Tab. 4.6: Experimenty č. 5 a 6a – parametry frézování vypuklé a vyduté plochy

Výsledek č. 5 a 6a: Z hlediska kvality obrobeneho povrchu je vhodnější souvislé pětiosé frézování, přestože v daném případě trvalo déle. Z hlediska strojního času je pro danou plochu výhodnější varianta řádkováním kulovou frézou. Protože je testovaná plocha příliš malá, nelze z výsledků experimentu stanovit obecný závěr.

Z tohoto důvodu byl dodatečně proveden experiment frézování souvislých vypuklých ploch větších rozměrů, a sice:

- 4 x 2 m,
- 3 x 1,5 m,
- 2 x 1 m.

Opět byly porovnány dvě strategie: souvislé pětiosé frézování frézovací hlavou 52r3 a tříosé frézování kulovou frézou o průměru 16 mm. Parametry frézování byly totožné, přísuv nastaven pro obě strategie dle hodnoty drsnosti 0,01 mm v CAM softwaru Tebis, tzn. pro kf16 0,8 mm a pro pf52r3 4,8 mm.

Tabulka parametrů frézování velkých ploch:

EXPERIMENT č. 6b	Plocha 4 x 2 m		Plocha 3 x 1,5 m		Plocha 2 x 1 m	
Použitá fréza	kf 16	pf 52r3	kf 16	pf 52r3	kf 16	pf 52r3
Posuv [mm/min]	15000					
Směr frézování	pendlování					
Strojní čas [h:min:s]	11:27:30	1:15:20	6:26:53	0:41:55	2:57:05	0:20:26

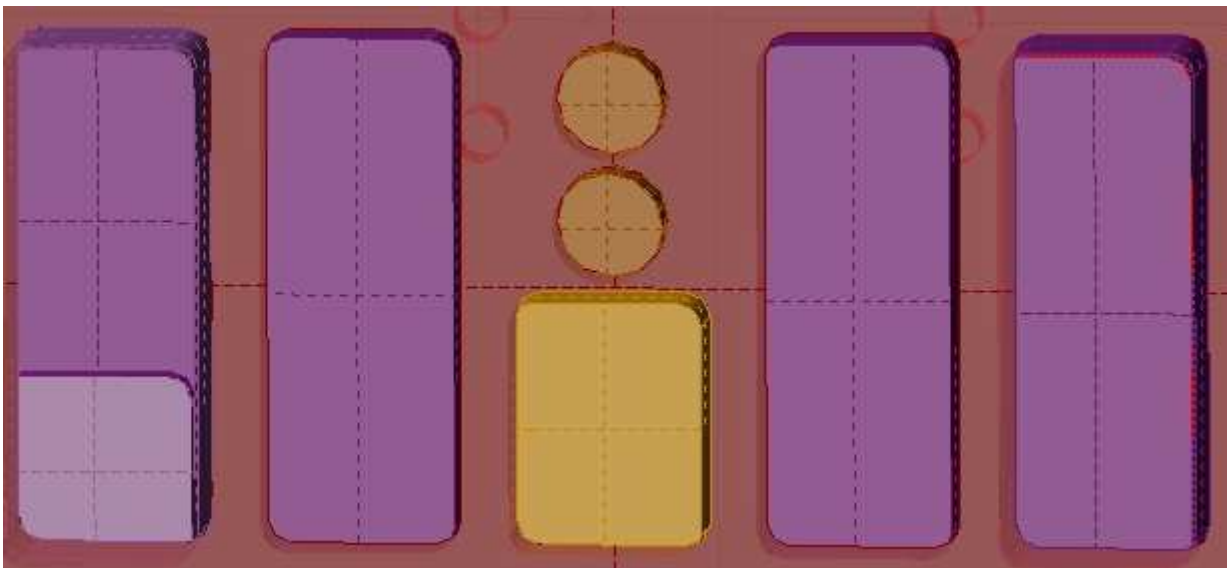
Tab. 4.7: Experiment č. 6b – parametry frézování velkých ploch

Výsledek č. 6b: Z dosažených výsledků je zřetelná mnohonásobná úspora strojního času u pětiosé varianty oproti variantě řádkováním kulovou frézou. Zásadní podmínkou pro možnost použití souvislého pětiosého frézování je vhodný druh obráběné plochy (např. souvislá vypuklá plocha bez překážek) a vysoká kvalita modelu CAD, tzv. Class-A plochy.

4.1.7 Experiment č. 7 – frézování kapes pro hliníkové vložky

Tento experiment je rozdělen na dvě části. V první části experimentu byly frézovány různě hluboké kapsy pro hliníkové vložky o rozměrech 217 x 81,5 mm a 107 x 81,5 mm, boční rádius 10 mm. Pro obrábění byly použity následující strategie:

- varianta 1: hrubování rovnou načisto s nulovým přídavkem (sf16),
- varianta 2: hrubování s přídavkem a dokončení jedním nástrojem (sf16),
- varianta 3: hrubování s přídavkem jedním nástrojem (pf42r3) a dokončení druhým nástrojem (sf16).



Obr. 4.8: Experiment č. 7 – frézování kapes pro hliníkové vložky

Vzhledem k různým rozměrům jednotlivých kapes byly naměřené výsledky přepočteny na kapsu o rozměru 217 x 81,5 x 40 mm a následně porovnány. Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1,5 minuty.

Tabulka parametrů frézování kapes pro hliníkové vložky:

EXPERIMENT č.7a	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	
Použitá fréza	sf 16	sf 16	pf 42r3	sf 16
Vyložení nástroje [mm]	60	60	123	60
Přídavek obrábění [mm]	načisto	0,3 + načisto	0,3	načisto
Hloubka řezu [mm]	3,5	3,5 + 5	5	5
Posuv [mm/min]	20000			
Otáčky [1/min]	15000			
Směr frézování	sousledně			
Celkový strojní čas [min]	3:24	3:32	0:41	1:23
			3:34	

Tab. 4.8: Experiment č. 7a – parametry frézování kapes pro hliníkové vložky

Výsledek č. 7a: Z hlediska programování a strojního času se jako nejrychlejší ukázala varianta č. 1, tj. hrubování rovnou načisto s nulovým přídavkem. Z hlediska kvality obrobeneho povrchu a dodržení přesnosti rozměrů kapsy je ovšem tato varianta zcela nevhodná, lze ji tedy používat pouze k frézování např. různých odlehčení či manipulačních otvorů. Nejvhodnější varianta pro frézování kapes pro hliníkové vložky je varianta č. 3, která se vzhledem k nutné výměně nástroje vyplatí již od druhé obráběné kapsy.

Druhá část experimentu je zaměřena na porovnání strojního času v závislosti na použitém dokončovacím makru v řídicím systému portálové frézky. K dispozici jsou tři základní makra: hrubovací (fast-mill), předdokončovací (half-mill) a dokončovací (fine-mill). Strojní časy byly porovnány pro frézování kapsy o rozměrech 107 x 81,5 x 40 mm za konstantních řezných parametrů.

Tabulka parametrů frézování různými dokončovacími makry:

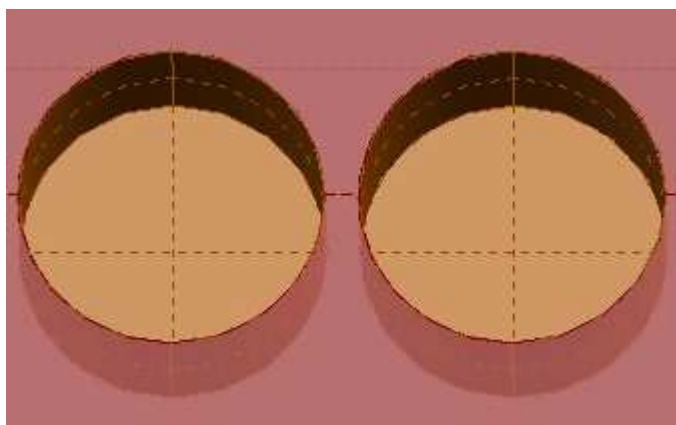
EXPERIMENT č.7b	Hrubovací makro FASTmill	Předdokončovací makro HALFmill	Dokončovací makro FINEmill
Použitá fréza	sf 16		
Přídavek [mm]	načisto		
Hloubka řezu [mm]	3,5		
Posuv [mm/min]	20000		
Otáčky [1/min]	15000		
Celk. strojní čas [min]	2:51	2:26	1:44

Tab. 4.9: Experiment č. 7b – parametry frézování různými dokončovacími makry

Výsledek č. 7b: Z výsledků je patrné, že nejen CAM programátor, ale i obsluha stroje může zásadně ovlivnit strojní čas a průběh obrábění např. volbou vhodného dokončovacího makra. Dokončovací makro FINEmill je nutné zpravidla jen na dokončování a zbytkový materiál pro obrábění hliníkových slitin. Pro dokončování např. modelů z umělých hmot či ureolu je většinou (v závislosti na kvalitě požadované zákazníkem) dostačující makro HALFmill, jehož použitím lze docílit časové úspory.

4.1.8 Experiment č. 8 – frézování kruhových kapes

V tomto experimentu bylo testováno frézování dvou totožných kruhových kapes o průměru 47 mm a hloubce 26 mm čelní válcovou frézou o průměru 16 mm (parametry experimentu viz tabulka 4.10). Veškeré parametry obrábění zůstaly pro oba případy stejné. Pro obrobení první kapsy byla použita strategie frézování po spirále (rovnou načisto), pro druhou kapsu byla použita strategie hrubování s přídavkem 0,3 mm a poté načisto, jedním nástrojem.



Obr. 4.9: Experiment č. 8 – frézování kruhových kapes

Tabulka parametrů frézování kruhových kapes:

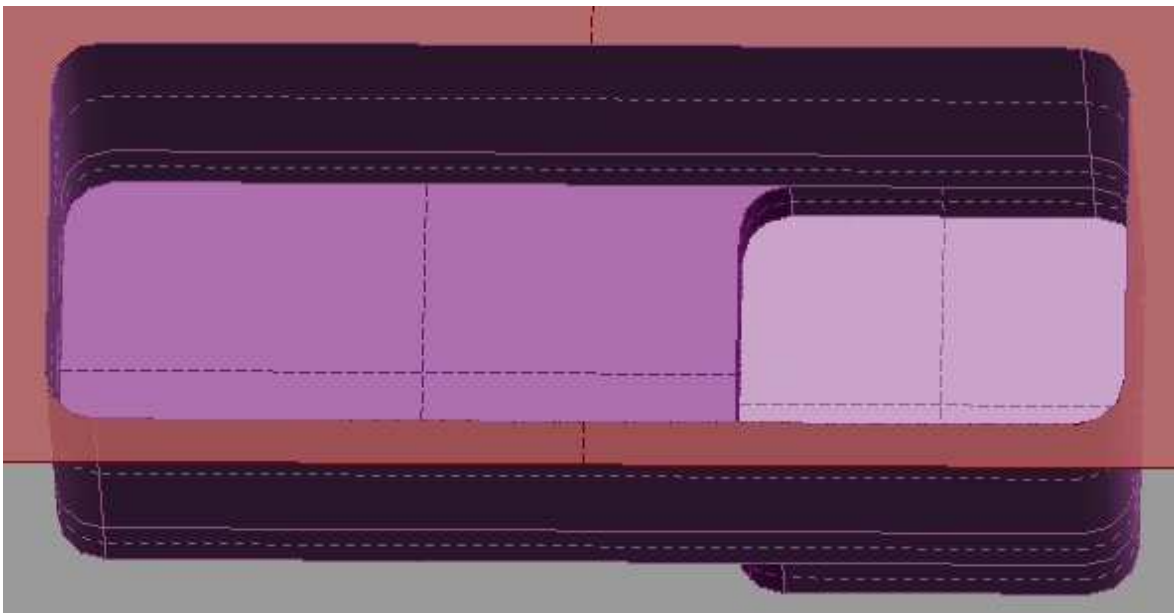
EXPERIMENT č. 8	Spirála	Hrubování + načisto
Použitá fréza	sf 16	
Přídavek [mm]	načisto	0,3 + načisto
Hloubka řezu [mm]	2	
Překrytí dráhy [mm]	12	
Posuv [mm/min]	9000	
Otáčky [1/min]	15000	
Směr frézování	sousledně	
Kvalita povrchu	10/10	9/10
Strojní čas [min]	0:55	0:58

Tab. 4.10: Experiment č. 8 – parametry frézování kruhových kapes

Výsledek č. 8: Z hlediska strojního času a kvality obrobeného povrchu je výhodnější první varianta frézování po spirále načisto, která je i z hlediska programování jednodušší. Protože se však ve výrobě nejčastěji vyskytují jiné než kruhové kapsy, pozbývá strategie frézování po spirále svoji výhodu. Pak je nutné používat klasickou strategii hrubování s přídavkem a poté načisto.

4.1.9 Experiment č. 9 – frézování hluboké členité kapsy

Testováno bylo frézování hluboké členité kapsy pro hliníkovou vložku o rozměrech 217 x 81,5 mm, bočním radiusu 10 mm a hloubkách 76 a 96 mm, jejíž rohy byly na jedné straně předvrtány (jeden roh dokonce vystružen na rozměr 20H7) a na druhé straně ponechány plné. Byly pozorovány vibrace vyložené frézy a vliv předvrtání rohů a vyložení nástroje na výslednou kvalitu obrobeného povrchu.



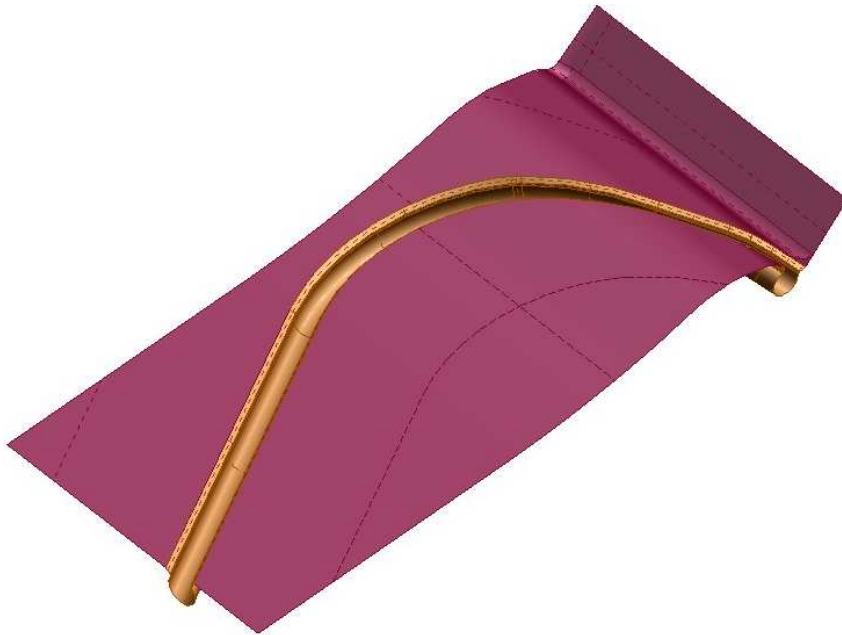
Obr. 4.10: Experiment č. 9 – frézování hluboké členité kapsy

K dokončení kapsy byla použita čelní válcová fréza o průměru 16 mm a vyložení nejprve 61 mm a poté 97 mm. S první variantou bylo frézováno do hloubky 60 mm, zbytek byl dokončen delší variantou.

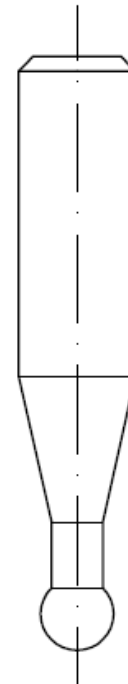
Výsledek č. 9: Průběh frézování byl v obou případech stabilní, byly pozorovány minimální vibrace nástroje. Bylo dosaženo velmi dobré kvality obrobeného povrchu, pro frézování modelů např. z ureolu či umělých hmot není potřeba z hlediska stability řezu předvrtávat rohy hlubokých kapes.

4.1.10 Ukázka (demo) – frézování pětiosé těsnící drážky

Tento příklad ukazuje nezbytnost nasazení souvislé pětiosé technologie v některých případech. Pro obrobení této těsnící drážky (viz obr. 4.11) byla použita speciálně vyrobená kulová fréza o poloměru 10 mm (profil frézy viz obr. 4.12). Drážka byla předhrubována toroidní frézou 4r0,5 pod několika různými naklopeními.



Obr. 4.11: Ukázka frézování pětiosé těsnící drážky



Obr. 4.12: Profil speciální kulové frézy

4.2 Druhá fáze experimentů

Ve druhé fázi experimentů byly obráběny hliníkové vložky (označení materiálu EN AW 5083) obsahující následující prvky: různě hluboké kapsy, torzní kanály, žebra, úzké drážky, vtokové kanály a tvarové plochy. Během experimentů byly měřeny strojní časy, sledována kvalita obrobeneho povrchu a porovnány různé strategie frézování daného prvku.

Vzhledem k velikosti hliníkových vložek a technologii obrábění byly k jejich výrobě použity následující stroje:

- Tříosá frézka DMU 63V, rozměr stolu 633 x 503 x 503,
- Pětiosá frézka Deckel Maho DMU 80T, rozměr stolu 880 x 630 x 630,
- Portálová frézka Forest Line, rozměr stolu 6800 x 3500 x 2000,
- Stroj pro elektroerozivní obrábění Agie Integral Senk, rozměr stolu 800 x 600 x 400.

Obrábění na frézkách DMU probíhalo s chlazením kapalinou, na portálové frézce Forest Line s chlazením olejovou emulzí, výjimku tvoří frézování drážek a žeber, kde byla nasazena zrychlovací hlava. V tomto případě probíhalo chlazení vzduchem.

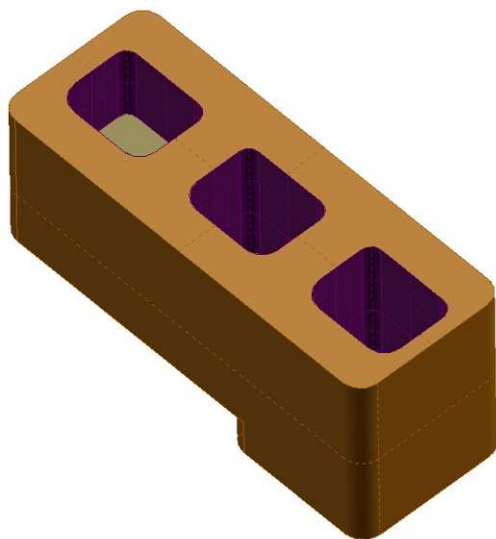
Volba řezných podmínek a parametrů obrábění vycházela z hodnot doporučených výrobcí nástrojů [3] a také z praktických zkušeností obsluhy stroje.

Následuje popis provedení jednotlivých experimentů č. 10 až 15 frézování hliníkových vložek.

4.2.1 Experiment č. 10 – frézování různě hlubokých kapes

Velmi důležitou součástí prototypové vstřikovací formy jsou rozměrově přesné kapsy pro tvarové vložky. Tyto kapsy mají různou hloubku, resp. různé rádiusy v rozích. Velikost rádiusu v rohu je rozhodující pro volbu průměru frézy, pro zachování plynulého chodu je nutné, aby byl poloměr frézy menší než poloměr obráběného rohu. To bohužel nelze vzhledem k hloubce kapsy vždy dodržet, čím hlubší kapsa, tím omezenější je výběr nástrojů vzhledem k jejich délce (tzn. delší nástroj má zpravidla větší průměr a není schopen obrobit plynule všechny rohy kapsy). Platí, že větší vyložení frézy (většinou v kombinaci s malým průměrem frézy) má velmi negativní vliv na stabilitu řezného procesu, a to především v rozích, kde je nejvyšší úhel záběru frézy. Dochází k vibracím, chvění a akustickým projevům, obrobený povrch je nekvalitní a odrnčený, v krajním případě může dojít i ke zlomení frézy.

Tento experiment demonstruje technologii a výslednou kvalitu obrobení kapes v závislosti na jejich hloubce a použitých nástrojích. Testovací hliníková vložka (viz obr. 4.13 a 4.14) obsahuje celkem tři různě hluboké kapsy (40, 65 a 90 mm) s různými poloměry v rozích (R5,5, R7, R9 a R11). Pro dosažení maximálního využití experimentu byla každá kapsa frézována nadvakrát dvěma různými variantami (nejprve s přídatkem 2 mm – varianta 1 a poté bez přídatku – varianta 2), parametry kapes (tj. hloubka a poloměry rohů) však zůstaly nezměněny. Kapsy byly frézovány po částech, tzn. nejprve všechny tři do hloubky 40 mm, poté druhá a třetí do hloubky 65 mm a nakonec třetí do hloubky 90 mm. U hloubek 40 a 65 mm byly u každé následující kapsy změněny a optimalizovány výchozí řezné parametry (zpravidla větší hloubka řezu) a sledována kvalita a průběh obrábění. Parametry frézování jsou shrnuty v tabulkách 4.11 až 4.16.



Obr. 4.13: CAD model hliníkové vložky s různě hlubokými kapsami



Obr. 4.14: Vyrobená hliníková vložka s různě hlubokými kapsami

Pro první variantu byly použity následující nástroje:

- čelní válcová fréza o průměru 16 mm pro hrubování s přídávkem 0,3 mm,
- fréza 25r2 s VBD pro hrubování s přídávkem 0,3 mm (pouze pro nejhlubší kapsu),
- čelní válcová fréza o průměru 10 mm pro boky a dno načisto.

Pro druhou variantu byly použity následující nástroje:

- fréza 25r2 s VBD pro hrubování s přídávkem 0,3 mm,
- čelní válcová fréza o průměru 16 mm pro boky a dno načisto,
- čelní válcová fréza o průměru 20 mm pro boky a dno načisto (pouze pro nejhlubší kapsu),
- čelní válcová fréza o průměru 10 mm pro rohy o poloměrech R5,5, R7 a R9 načisto.

Vzhledem ke hloubce třetí kapsy musela být použita na dokončení čelní válcová fréza o průměru 20 mm místo průměru 16 mm, což se negativně projevilo na kvalitě obrobení rohů kapsy. Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1 minutu. Výsledná kvalita je hodnocena subjektivně známkou jako ve škole.

Tabulka parametrů frézování první kapsy o hloubce 40 mm:

KAPSA č.1, HLOUBKA 40 mm	Varianta 1		Varianta 2		
Použitá fréza	sf 16	sf 10	pf 25r2	sf 16	sf 10
Vyložení nástroje [mm]	45		97	45	
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	1,5	5	1,5	10	5
Posuv [mm/min]	2500	2500	3600	2500	2500
Otáčky [1/min]	7500	9000	7500	7500	9000
Směr frézování	sousledně				
Celkový strojní čas [min]	3:01	0:32 boky 0:14 dno	1:05	0:15 boky 0:10 dno	0:16 rohy
	4:47		3:46		
Výsledná kvalita	zvuk 1, povrch 1		zvuk 1-, povrch 1		

Tab. 4.11: Experiment č. 10 – parametry frézování kapsy č. 1 do hloubky 40 mm

Tabulky parametrů frézování druhé kapsy o hloubce 65 mm:

KAPSA č.2, HLOUBKA 40 mm	Varianta 1		Varianta 2		
Použitá fréza	sf 16	sf 10	pf 25r2	sf 16	sf 10
Vyložení nástroje [mm]	45		97	45	
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	1,5	10	1,5	10	5
Posuv [mm/min]	2500	2500	3600	2500	2500
Otáčky [1/min]	7500	9000	7500	7500	9000
Směr frézování	sousledně				
Celkový strojní čas [min]	3:01	0:19 boky 0:14 dno	1:05	0:15 boky 0:10 dno	0:16 rohy
	4:34		3:46		
Výsledná kvalita	zvuk 2, povrch 2		zvuk 1-, povrch 1		

Tab. 4.12: Experiment č. 10 – parametry frézování kapsy č. 2 do hloubky 40 mm

KAPSA č.2, HLOUBKA 65 mm	Varianta 1		Varianta 2		
Použitá fréza	sf 16	sf 10	pf 25r2	sf 16	sf 10
Vyložení nástroje [mm]	70		97	70	
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	1	2	1,5	5	2
Posuv [mm/min]	2500	2500	3600	2500	2500
Otáčky [1/min]	7500	9000	7500	7500	9000
Směr frézování	sousledně				
Celkový strojní čas [min]	2:49	0:47 boky 0:14 dno	0:43	0:23 boky 0:10 dno	0:26 rohy
	4:50		3:42		
Výsledná kvalita	zvuk 1-, povrch 2		zvuk 2-, povrch 2		

Tab. 4.13: Experiment č. 10 – parametry frézování kapsy č. 2 do hloubky 65 mm

Tabulky parametrů frézování třetí kapsy o hloubce 90 mm:

KAPSA č.3, HLOUBKA 40 mm	Varianta 1		Varianta 2		
Použitá fréza	sf 16	sf 10	pf 25r2	sf 16	sf 10
Vyložení nástroje [mm]	45		97	45	
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	1,5	15	1,5	15	10
Posuv [mm/min]	2500	2500	3600	2500	2500
Otáčky [1/min]	7500	9000	7500	7500	9000
Směr frézování	sousledně				
Celkový strojní čas [min]	3:01	0:12 boky 0:14 dno	1:05	0:18 boky 0:10 dno	0:12 rohy
	4:27		3:45		
Výsledná kvalita	zvuk 2, povrch 3		zvuk 4, povrch 4		

Tab. 4.14: Experiment č. 10 – parametry frézování kapsy č. 3 do hloubky 40 mm

KAPSA č.3, HLOUBKA 65 mm	Varianta 1		Varianta 2		
Použitá fréza	sf 16	sf 10	pf 25r2	sf 16	sf 10
Vyložení nástroje [mm]	70		97	70	
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	1	5	1,5	10	5
Posuv [mm/min]	2500	2500	3600	2500	2500
Otáčky [1/min]	7500	9000	7500	7500	9000
Směr frézování	sousledně				
Celkový strojní čas [min]	2:49	0:32 boky 0:14 dno	0:43	0:15 boky 0:10 dno	0:16 rohy
	4:35		3:24		
Výsledná kvalita	zvuk 2, povrch 2		zvuk 4, povrch 4		

Tab. 4.15: Experiment č. 10 – parametry frézování kapsy č. 3 do hloubky 65 mm

KAPSA č.3, HLOUBKA 90 mm	Varianta 1		Varianta 2		
Použitá fréza	pf 25r2	sf 10	pf 25r2	sf 16	sf 10
Vyložení nástroje [mm]	97	91	97	100	91
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	1,5	1	1,5	5	0,3
Posuv [mm/min]	3600	2500	3600	1500	1000
Otáčky [1/min]	7500	9000	7500	6000	6000
Směr frézování	sousledně				
Celkový strojní čas [min]	0:43	1:58 boky 0:14 dno	0:43	1:16 boky 0:13 dno	2:18 rohy
	3:55		6:30		
Výsledná kvalita	zvuk 4-, povrch 4		zvuk 3, povrch 4		zvuk 2, povrch 2

Tab. 4.16: Experiment č. 10 – parametry frézování kapsy č. 3 do hloubky 90 mm

Výsledek č. 10: Z hlediska strojních časů je ve všech případech výhodnější druhá varianta, kdy je frézováno sice více nástroji, ale zato větších průměrů, lze tedy docílit vyššího úběru materiálu. Nevýhodou této varianty je nutnost dokončování rohů o poloměrech menších než je poloměr dokončovacího nástroje (vzhledem k napojení je nutno frézovat s korekcí) a neplynulý průběh dráhy nástroje v rozích, což se může negativně projevit na obrobeném povrchu (vtažení frézy do materiálu v rozích, chvění, vibrace).

Frézování první kapsy o hloubce 40 mm: určení velikosti hloubky řezu vycházelo ze stávající technologie. Protože oběma variantami frézování bylo v tomto případě dosaženo velmi dobré kvality povrchu, byla velikost hloubky řezu pro frézování dalších kapes zvětšena a pozorovány kvalitativní rozdíly. Vzhledem k malému vyložení nástrojů (45 mm) nedocházelo v rozích kapsy k výše zmiňovanému chvění a vibracím ani při neplynulém průběhu dráhy nástroje. V takových případech je tedy možné obrábět kapsy s malým poloměrem rohů i frézou většího průměru.

Frézování druhé kapsy o hloubce 65 mm: na základě výsledků obrábění první kapsy byla zvýšena hloubka řezu při dokončování, což se v kombinaci s větším vyložení frézy (70 mm) projevilo na průběhu obrábění a nepatrně i na kvalitě obrobeného povrchu. K akustickým projevům a vibracím docházelo v nejmenších rozích kapsy, celkový výsledek obrobení je však stále únosný. Celkový strojní čas na obrobení této kapsy pomocí kombinace různě vyložených nástrojů (první část do 40 mm + druhá část do 65 mm) byl **9 min 24 s**. Kdyby byla kapsa obráběna rovnou nástroji z druhé části (tj. vyložení 70 mm), trvalo by obrobení dle teoretického výpočtu **12 min 36 s**.

Frézování třetí kapsy o hloubce 90 mm: vlivem použitých řezných parametrů (např. hloubka řezu 1 mm pro dokončování čelní válcovou frézou o průměru 10 mm) došlo k nepřijatelné kvalitě obrobeného povrchu. Během frézování bylo vzhledem k vibracím a chvění nástroje nutné snižovat posuv. Po snížení hloubky řezu na 0,3 mm byl průběh znatelně tišší, ovšem úměrně tomu došlo ke zvýšení strojního času. Celkový strojní čas na obrobení této kapsy pomocí kombinace různě vyložených nástrojů byl **13 min 39 s**. Kdyby byla kapsa obráběna rovnou nástroji z třetí části (tj. vyložení 90 mm), trvalo by obrobení dle teoretického výpočtu **23 min 24 s**.

Vzhledem k malé velikosti frézovaných kapes nebyly časové rozdíly frézování s různou hloubkou řezu tak markantní. V případě frézování většího množství kapes větších rozměrů by byla volba velikosti nástroje stěžejní (nástrojem o větším průměru lze docílit větších úběrů materiálu při stabilnějším průběhu obrábění) a čas pro výměnu nástroje (např. z hrubovací frézy s VBD na dokončovací čelní válcovou atd.) by byl zanedbatelný.

Obecně lze říci, že je třeba omezit konstrukci hlubokých kapes, jejichž obrábění značně komplikuje výrobu prototypové vstříkovací formy. Není-li to z technologického hlediska možné, je nutné konstruovat rohy takových kapes s největším možným poloměrem, aby bylo docíleno plynulého procesu obrábění. V opačném případě je nucen technolog (popř.

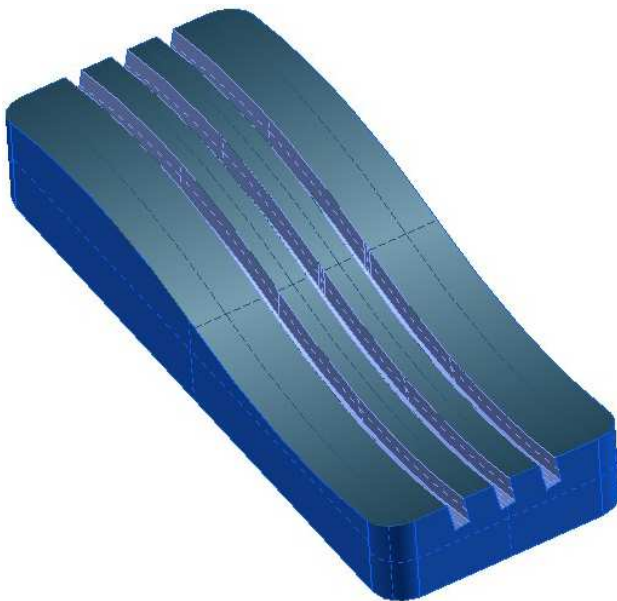
CAM programátor) snížit řezné podmínky, což vede ke značnému prodloužení strojních časů a prodražení výroby.

4.2.2 Experiment č. 11 – frézování torzních kanálů

Tento experiment je rozdělen na dvě části. V první části bylo testováno dokončování povrchu kulovou frézou o průměru 16 mm za konstantních řezných podmínek a přísuvu 0,4 mm. Jediný rozdíl byl v použitém naklopení nástroje. První třetina povrchu této vložky byla frézována pod naklopením 0° (tzn. tříose), druhá třetina pod naklopením 15° a poslední třetina pod naklopením 30° . Následně byla porovnána kvalita výsledného obrobeneho povrchu.

U první varianty (frézování bez naklopení tříose) je zřetelná nekvalita obrobeneho povrchu v místech, kde docházelo k frézování špičkou (středem) kulové frézy, tzn. oblastí s nulovou řeznou rychlostí. V těchto místech nedocházelo k řezání povrchu, nýbrž k jeho pěchování a vytrhávání. Takovým situacím je třeba se při programování dokončování povrchu vyhnout a používat naklopení nástroje (viz zbývající dvě varianty).

Pomocí druhé a třetí varianty (frézování s naklopením 15° a 30°) bylo docíleno výborného povrchu, přičemž rozdíl mezi oběma variantami byl minimální. Tento experiment ukázal, že i mírným naklopením kulové frézy lze docílit znatelně kvalitnějšího povrchu v rizikových oblastech než frézováním bez naklopení.



Obr. 4.15: CAD model hliníkové vložky s torzními kanály



Obr. 4.16: Vyrobená hliníková vložka s torzními kanály

Ve druhé části tohoto experimentu bylo testováno obrábění tří totožných torzních kanálů (viz obr. 4.15 a 4.16) s následujícími parametry: šířka 5,5 mm, hloubka 10 mm, délka podél celé vložky, rovnoměrné zkroucení profilu od -10° do $+10^\circ$. Prostřední torzní kanál byl frézován klasickou technologií (tzn. hrubování toroidní frézou 4r0,5, dokončování kulovou frézou o průměru 4 mm a zbytkový materiál kulovou frézou o průměru 2 mm) pod několika různými naklopeními, zbylé dva torzní kanály souvisle pětiose čelní válcovou frézou o průměru 4 mm – první kanál rovnou načisto a druhý s pětiosým předhrubováním.

Tabulka parametrů frézování torzních kanálů:

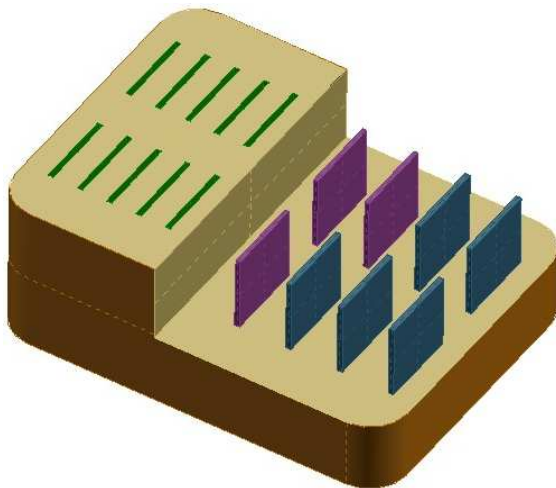
TORZNÍ KANÁLY	1. kanál - pětiose načisto	2. kanál – klasicky s naklápěním			3. kanál – pětiose s předhrubováním
Použitá fréza	sf 4	tf 4r0,5	kf 4	kf 2	sf 4
Vyložení nástroje [mm]	20	20	25	20	20
Přídavek obrábění [mm]	načisto	0,2	načisto	načisto	0,2 + načisto
Hloubka řezu [mm]	1	0,25	0,25	0,1	0,9
Posuv [mm/min]	600	7000	6000	5000	1000
Otáčky [1/min]	12000				
Směr frézování	sousledně	sousledně	pendlování	sousledně	sousledně
Celkový strojní čas [min]	6:04	6:02	4:58	4:40	16:10
		17:40			

Tab. 4.17: Experiment č. 11 – parametry frézování torzních kanálů

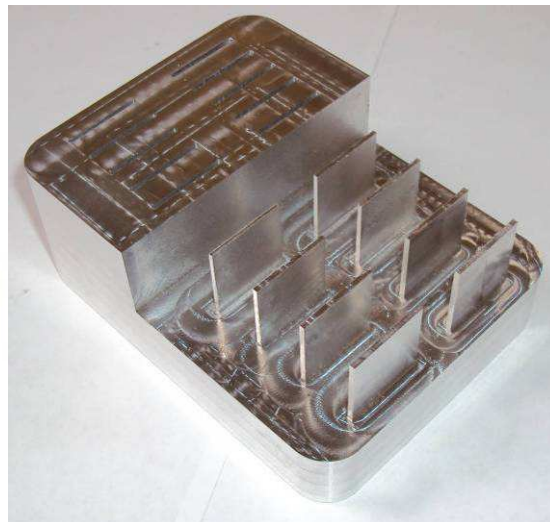
Výsledek č. 11: Nejvhodnější varianta pro tento případ je frézování čelní válcovou frézou pětiose rovnou načisto, bylo docíleno třetinového strojního času oproti klasické technologii, kvalita obrobeného povrchu je srovnatelná. Bez použití pětiosého modulu lze bohužel použít pouze klasickou technologii, která je kvůli častému naklápění a dvěma výměnám nástroje časově nejnáročnější. Je třeba zdůraznit, že klasickou technologií nelze docílit ostrých rohů na dně kanálu, proto je v některých případech nasazení souvislé pětiosé technologie nezbytné.

4.2.3 Experiment č. 12 – frézování žeber a drážek

Tento experiment je rozdělen na dvě části. V první části bylo testováno frézování drážek o šířce 1,1 mm, délce 21 mm a hloubce až 20 mm a ve druhé části frézování stojatých žeber o šířce 1,4 mm, délce 21 mm a výšce 20 mm do plného materiálu.



Obr. 4.17: CAD model hliníkové vložky se žebry a drážkami



Obr. 4.18: Vyrobená hliníková vložka se žebry a drážkami

4.2.3.1 Frézování drážek

Frézování různě hlubokých drážek (zpravidla o šířce mezi 1 a 1,5 mm) je ve výrobě prototypových forem velmi časté, protože žebra vzniklá na vyrobeném výlisku slouží jako zpevnění a vyztužení dílu. Frézování drážek je časově i technologicky velmi náročné, proto byla k obrábění použita zrychlovací hlava firmy IMT (viz obr. 4.19 a 4.20), díky níž lze zvýšit otáčky kulové frézy o průměru 1 mm až na 70000 otáček za minutu, tzn. lze adekvátně k otáčkám zvýšit posuv a dosáhnout tak vyšší produktivity obrábění.



Obr. 4.19: Zrychlovací hlava firmy IMT [1]



Obr. 4.20: Zrychlovací hlava upnutá ve vřeteni tříosé frézy [5]

Z hlediska CAM programování byly porovnávány dvě strategie obrábění, a sice zbytkovým materiálem RSURF (označení v tabulce písmenem A) a hrubovací strategií RPLAN (označení v tabulce písmenem B).

Z hlediska závislosti strojního času na hloubce obráběné drážky a použitých nástrojů bylo porovnáváno obrábění drážek o hloubkách 8 mm, 12 mm, 16 mm a 20 mm, přičemž hloubka 20 mm byla obráběna pomocí dvou variant kombinace různě dlouhých fréz. V první variantě je použita fréza délky 12 mm a poté 20 mm, ve druhé variantě fréza délky 12 mm, poté 16 mm a 20 mm.

Vzhledem k jednoduchosti obráběných prvků byla použita tříosá frézka. Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1 minutu.

Tabulky parametrů frézování různě hlubokých drážek:

FRÉZOVÁNÍ DRÁŽEK (8, 12 a 16 mm)	Hloubka drážky 8 mm		Hloubka drážky 12 mm		Hloubka drážky 16 mm				
	A	B	A	B	A		B		
Použitá CAM strategie									
Použitá fréza	kf 1, 8-20		kf 1, 12-25		kf 1, 12-25	kf 1, 16-25	kf 1, 12-25		kf 1,16-25
Přisuv [mm]	0,06		0,045		0,045	0,035	0,045		0,035
Posuv [mm/min]	2300		2300		2300	1800	2300		1800
Otáčky [1/min]	70000								
Směr frézování	sousledně								
Dílčí strojní čas [min]	3:02	3:07	5:31	5:56	5:31	3:02	5:56	3:12	
Celkový strojní čas včetně výměny nástroje [min]	3:02	3:07	5:31	5:56	9:33		10:06		

Tab. 4.18: Experiment č. 12a – parametry frézování drážek o hloubce 8, 12 a 16 mm

FRÉZOVÁNÍ DRÁŽEK (20 mm)	Hloubka drážky 20 mm				Hloubka drážky 20 mm					
	A		B		A			B		
Použitá CAM strategie										
Použitá fréza	kf1 12- 20	kf1 20- 30	kf1 12- 20	kf1 20- 30	kf1 12- 20	kf1 16- 25	kf1 20- 30	kf1 12- 20	kf1 16- 25	kf1 20- 30
Hloubka řezu [mm]	0,045	0,03	0,045	0,03	0,045	0,035	0,03	0,045	0,035	0,03
Posuv [mm/min]	2300	1400	2300	1400	2300	1800	1400	2300	1800	1400
Otáčky [1/min]	70000									
Směr frézování	sousedně									
Dílčí strojní čas [min]	5:31	8:41	5:56	8:47	5:31	3:02	4:30	5:56	3:12	4:31
Celkový strojní čas [min]	15:12		15:43		15:03			15:39		

Tab. 4.19: Experiment č. 12a – parametry frézování drážek o hloubce 20 mm

Výsledek č. 12a: Díky použití zrychlovací hlavy lze frézovat několikrát vyšším posuvem než za běžných podmínek. Jako vhodnější se pro frézování drážek v daném případě ukázala strategie zbytkového materiálu RSURF, která vykazuje nižší strojní čas, výpočet programu v CAM je rychlejší, ale občas je nutno ořezat a domodelovat plochy v modelu. Oproti tomu hrubovací strategie RPLAN je z hlediska programování jednodušší, je potřeba pouze namodelovat potřebný polotovár, výpočet však trvá déle. Také strojní čas byl v tomto případě delší. Pro složité soustavy drážek může být celkově vhodnější hrubovací strategie, která však vzhledem k propočítávání polotovaru enormně prodlužuje čas programování.

Při frézování drážky o hloubce 20 mm za použití různých dlouhých fréz je již při obrábění pouze jedné hluboké drážky patrné, že se vyplatí v závislosti na hloubce drážky použít více různě osazených nástrojů i přes relativní zdržení jejich výměnou ve vřetení frézky. Toto zdržení je kompenzováno možností využití vyššího posuvu než při první variantě (tj. nejprve krátká fréza a poté rovnou nejdelší).

4.2.3.2 Frézování stojatých žeber

Výroba prototypových forem a dílů z hliníku pro automobilový průmysl obsahuje občas také frézování velmi úzkých stěn a profilů (např. ochranná lišta). V tomto experimentu

byly porovnávány různé strategie frézování osmi stojatých žeber (šířka 1,4 mm, délka 21 mm a výška 20 mm). Stěny prvních pěti žeber jsou kolmé na dno, lze tedy použít čelní válcové frézy tříose. Zbývá tři žebra jsou kónická (sklon stěn 0,5°), je nutno použít buď toroidní frézu tříose nebo čelní válcovou pětiose.

U prvních čtyř kolmých žeber bylo porovnáno frézování čelní válcovou frézou menšího průměru (4 mm) a většího průměru (8 mm) s různými přídávky na dokončení (2 mm a 0,3 mm). Poslední kolmé žebro bylo frézováno čelní válcovou frézou o průměru 8 mm rovnou načisto do plného materiálu.

První kónické žebro bylo frézováno pětiose čelní válcovou frézou o průměru 4 mm rovnou načisto do plného materiálu. Zbývají dvě kónická žebra byla nejprve hrubována toroidní frézou 8r1 s různým přídávkem (0,2 mm a 1,5 mm), pro dokončení byla použita toroidní fréza 2r0,2 upnutá ve zrychlovací hlavě.

Pro tříosé frézování byla použita totožná tříosá frézka jako v případě frézování drážek. Pětiosé frézování proběhlo na portálovém centru Forest Line.

Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1 minutu a nasazení zrychlovací hlavy včetně zapojení příslušenství 5 minut.

Tabulky parametrů frézování stojatých žeber:

FRÉZOVÁNÍ KOLMÝCH STOJATÝCH ŽEBER	Žebro č.1		Žebro č.2		Žebro č.3		Žebro č.4		Žebro č.5
Použitá fréza	sf 8		sf 4		sf 8		sf 4		sf 8
Přídavek obrábění [mm]	2	načisto	2	načisto	0,3	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	0,8	1	0,5		0,8	1	0,5		0,5
Posuv [mm/min]	2200		1230		2200		1230		2200
Otáčky [1/min]	9000								
Směr frézování	sousedně								
Dílčí strojní čas [min]	1:19	0:55	2:54	2:22	1:16	0:55	2:38	2:22	1:43
Celkový strojní čas včetně výměny nástroje [min]	2:14		5:16		2:11		5:00		1:43

Tab. 4.20: Experiment č. 12b – parametry frézování kolmých stojatých žeber

FRÉZOVÁNÍ KÓNICKÝCH STOJATÝCH ŽEBER	Žebro č.6	Žebro č.7		Žebro č.8	
Použitá fréza	sf 4	tf 8r1	tf 2r0,2	tf 8r1	tf 2r0,2
Přídavek obrábění [mm]	načisto	1,5	načisto	0,2	Načisto
Hloubka řezu [mm]	0,5	0,8	0,05	0,8	0,05
Posuv [mm/min]	500	2000			
Otáčky [1/min]	14000	9000	40000	9000	40000
Směr frézování	sousledně				
Dílčí strojní čas [min]	18:25	2:40	17:40	2:40	17:40
Celkový strojní čas včetně výměny nástroje [min]	18:25	25:20		25:20	

Tab. 4.21: Experiment č. 12b – parametry frézování kónických stojatých žeber

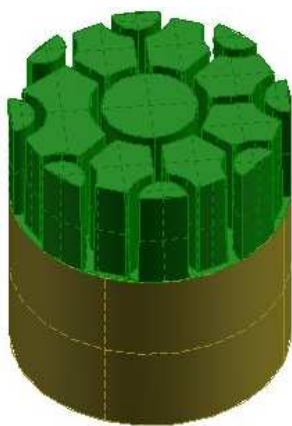
Výsledek č. 12b: Pro frézování kolmých stojatých žeber byly použity čelní válcové frézy o průměrech 4 a 8 mm, žebra byla dokončována několika způsoby (s přídavkem 0,3 a 2 mm či rovnou načisto). Z hlediska strojního času dopadly lépe varianty frézování čelní válcovou frézou o průměru 8 mm, nejlépe pak hrubování rovnou načisto. Z hlediska průběhu frézování byly ovšem tyto varianty nevhodné, docházelo ke chvění a akustickým projevům. Proto je vhodnější frézovat podobné kontury nástrojem o menším průměru, protože vykazuje nižší řezný odpor než nástroj většího průměru. Frézování čelní válcovou frézou o průměru 4 mm mělo velmi tichý a klidný průběh, kvalitativně nejlépe dopadla varianta s přídavkem 2 mm (je zde více materiálu na dokončovací řez, tudíž stabilnější průběh), nevýhodou byl delší strojní čas.

Pro frézování kónických stojatých žeber bylo použito souvislé pětiosé frézování čelní válcovou frézou o průměru 4 mm a tříosé frézování toroidními frézami 8r1 a 2r0,2. Z hlediska strojního času a průběhu obrábění je nejvýhodnější pětiosá varianta rovnou načisto. Zbylá dvě kónická žebra byla dokončována toroidní frézou 2r0,2 ve zrychlovací hlavě za totožných řezných podmínek, lišily se jen přídavky na dokončení. Průběh obrábění byl tichý a plynulý, prakticky žádný pohledový rozdíl v kvalitě povrchu – zde velikost přídavku na dokončení nehrál roli, nevýhodou však byl strojní čas.

4.2.4 Experiment č. 13 – frézování a elektroerozivní obrábění tvarových drážek

Podobně jako u rovných drážek (viz kapitola 4.2.3.1) je také frézování tvarových drážek při výrobě prototypové vstříkovací formy poměrně časté. Opět rozhoduje rozměr, rozsah a především hloubka výsledné drážky. Jsou-li požadované kontury vzhledem ke své hloubce nefrézovatelné, popř. nachází-li se v rozích kontury ostré rohy, je nutno použít technologii elektroerozivního obrábění (vyjiskřování).

V tomto experimentu byla porovnána technologie frézování a technologie elektroerozivního obrábění na dvou totožných kruhových vložkách (viz obr. 4.21 a 4.22), z technických a časových důvodů pouze do hloubky 15 mm. Sledována byla opět proveditelnost výroby a výsledný strojní, popř. vedlejší čas. Oba polotovary vložek byly nejprve vysoustruženy na průměr 47 mm a výšku 50 mm a poté obráběny.



Obr. 4.21: CAD model hliníkové vložky s tvarovými drážkami



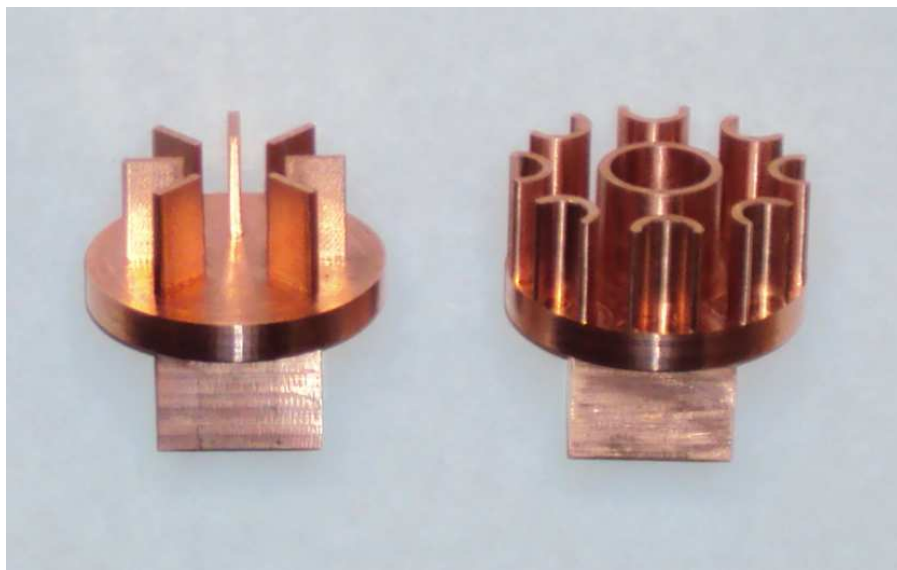
Obr. 4.22: Vyrobená hliníková vložka s tvarovými drážkami

4.2.4.1 Výroba vložky frézováním

První vložka byla vyrobena frézováním kulovou frézou o průměru 1,5 mm, ke zvýšení produktivity frézování byla použita zrychlovací hlava (40000 ot./min, hloubka řezu 0,05 mm). Výroba vložky včetně vedlejších časů trvala 3,5 hodiny.

4.2.4.2 Výroba vložky vyjiskřováním

Druhá vložka byla vyrobena vyjiskřováním pomocí dvou měděných nástrojových elektrod (viz obr. 4.23). Vzhledem k minimálnímu rádiusu (R0,5) na bocích tvarových žebër by bylo vyrobení jedné elektrody příliš složité a nákladné, proto byla rozdělena na dvě tvarově jednodušší elektrody, které jsou vyrobitelné tříose čelní vřlcovou frézou.



Obr. 4.23: Měděné nástrojové elektrody – elektroda č. 1 (vlevo) a elektroda č. 2

První upnutí obou elektrod bylo totožné, z polotovaru bylo nutno zhotovit upínací část pro upínací přípravek elektrody (rozměr 26,7 x 26,7 mm, výška 22 mm - viz obr. 4.24). Při druhém upnutí byl zhotoven finální tvar elektrody (viz obr. 4.26). První elektroda byla frézována čelní válcovou frézou o průměru 4 mm (strojní čas 23 min, 10000 ot./min, hloubka řezu 0,5 mm, posuv 2000 mm/min), druhá elektroda čelní válcovou frézou o průměru 5 mm při totožných řezných podmínkách (strojní čas 17 min). Výroba obou elektrod včetně vedlejších časů trvala 3 hodiny.



Obr. 4.24: Zhotovení upínací části elektrody



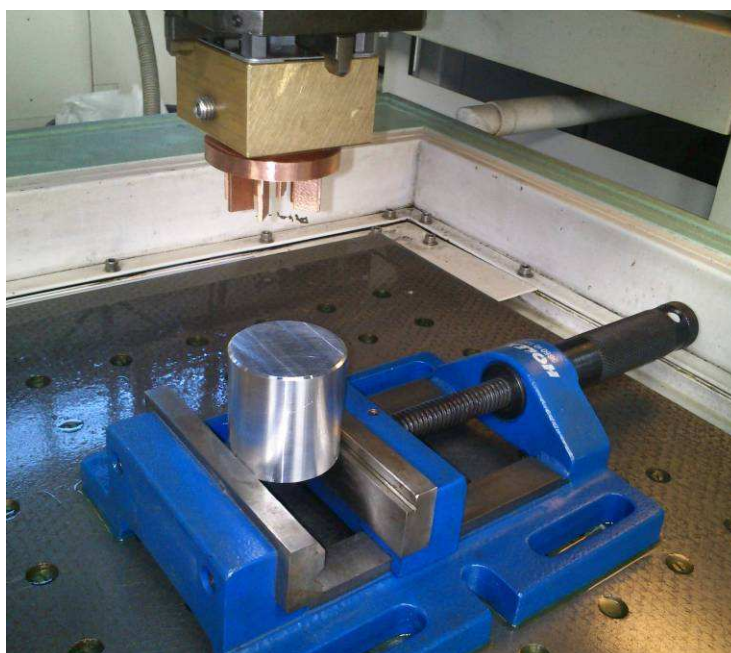
Obr. 4.25: Najetí nulového bodu přípravku s elektrodou [5]

Vlastní vyjiskřování probíhalo na stroji Agie Integral Senk. Po upnutí obrobku a přípravy lázně bylo obráběno nejprve elektrodou č. 1 a následně elektrodou č. 2. Strojní čas potřebný pro obrobení první elektrodou činil 1 hod 56 min, pro obrobení druhou elektrodou 3 hod 15 min.

Celkový čas pro zhotovení tvarových žeber vyjiskřováním činil 5,5 hodiny (viz tabulka 4.22).



Obr. 4.26: Frézování elektrody č. 2 v přípravku [5]



Obr. 4.27: Příprava hliníkové vložky na vyjiskřování [5]

Výroba vložky frézováním	Výroba elektrod + vložky jiskřením
3:30 [hod]	3:00 + 5:30 = 8:30 [hod]

Tab. 4.22: Experiment č. 13 – doba výroby dvou kruhových vložek s tvarovými drážkami

Výsledek č. 13: Dvěma různými technologiemi byly vyrobeny dvě stejné hliníkové vložky. Potvrdilo se, že technologie frézováním je několikanásobně rychlejší a ekonomičtější, s využitím zrychlovací hlavy ještě stoupá produktivita frézování.

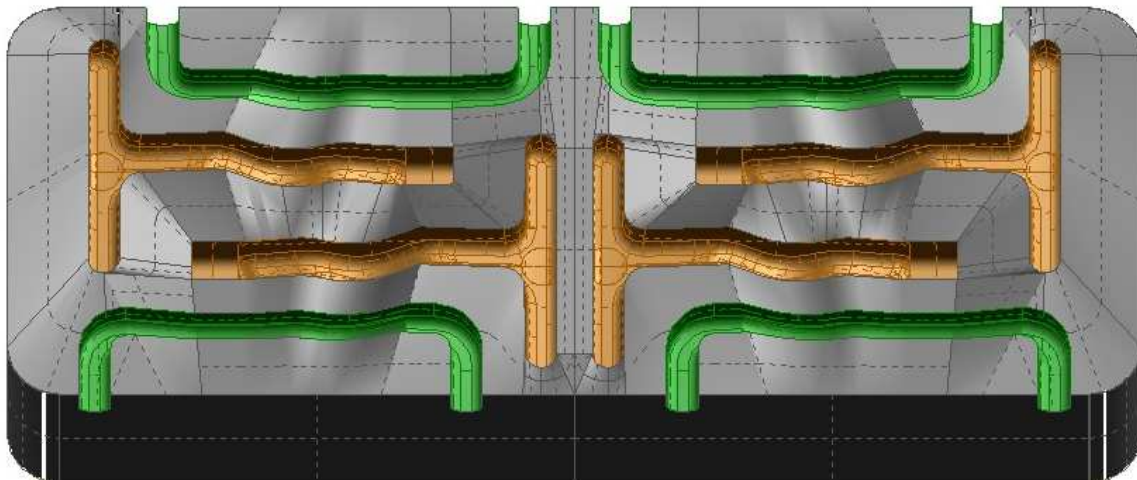
Výroba frézováním trvala 3,5 hodiny, výroba vyjiskřováním 8,5 hodiny, což je téměř trojnásobek. Je proto nutné frézovat vždy do největší možné hloubky (limit pro kulovou frézu o průměru 1 mm je 20 mm) a až poté použít elektroerozivní obrábění. Tím se docílí nejehospodárnější varianta výroby tvarových hlubokých drážek.

V prototypové výrobě se veškeré kontury prioritně frézují, v sériové výrobě jsou zhotoveny elektrody zaručující opakovatelnost a ekonomičnost v rámci série. Frézuje se zpravidla do průměru nástroje 6 mm, menší rozměry jsou vyjiskřovány.

4.2.5 Experiment č. 14 – frézování vtokových kanálů

Každá prototypová vstřikovací forma obsahuje vhodně nadimenzovaný vtokový kanál, který zajistí dopravu tekutého materiálu do formy. Vzhledem k průtoku materiálu musí mít vtokový kanál po celé své délce konstantní průřez a musí plně zajistit svou funkci bezproblémové dopravy tekutého materiálu. Protože se nejedná o pohledové plochy, nehraje pohledová kvalita povrchu zásadní roli. Vstřikovací formy větších rozměrů obsahují většinou delší vtokové kanály, proto lze použitím vhodné strategie frézování značně zkrátit strojní čas.

V první fázi tohoto experimentu byly obráběny čtyři vtokové kanály tvaru T, nacházející se uvnitř tvarové kontury (viz obr. 4.28). Programování vycházelo z klasického postupu ve firmě – předhrubování toroidní frézou s přídavkem a následné dokončení kulovou frézou (popř. ještě předdokončení, zejména u složitějších tvarů) – tj. první kanál. Další používanou variantou je hrubování kanálu toroidní frézou rovnou načisto, s použitím nižší hloubky řezu a menší chyby tětiny dráhy nástroje – druhý kanál. Vzhledem k nižším nárokům na kvalitu obrobeneho povrchu je možno kanál frézovat rovnou kulovou frézou do plného materiálu, a sice nejprve s přídavkem a poté načisto – třetí kanál. Stejná strategie je použita i pro čtvrtý kanál, je ovšem frézováno rovnou načisto do plného materiálu a s větší hloubkou řezu než u předchozího případu. Nezbytným předpokladem pro frézování posledních dvou T-kanálů je použití velmi krátké frézy a vhodného nájezdového makra, aby nedošlo k „zavrtávání“ frézy do plného materiálu.



Obr. 4.28: CAD model hliníkové vložky s vtokovými kanály



Obr. 4.29: Vyrobená hliníková vložka s vtokovými kanály

Na základě výsledků obrábění prvních čtyř kanálů byly zkonstruovány další čtyři vtokové kanály, tentokrát tvaru U, mající podobnou délku a průřez jako předchozí kanály tvaru T. Zde byla dále testována a optimalizována technologie frézování kulovou frézou rovnou načisto do plného materiálu, přičemž byla sledována kvalita obrobení v závislosti na vyložení frézy a hloubce řezu.

Všechny vtokové kanály byly obráběny na tříosé frézce za použití chladicí kapaliny. Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1 minutu.

Tabulky parametrů frézování vtokových kanálů:

FREZOVÁNÍ VTOKOVÝCH KANÁLŮ TVARU T	Kanál č.1 (klasicky)			Kanál č.2 (hrubování načisto)	Kanál č. 3 (kf s přídavkem + načisto)		Kanál č. 4 (kf rovnou načisto)
Použitá fréza	tf 4r0,5	kf 5		tf 4r0,5	kf 5		kf 5
Vyložení nástroje [mm]	30	30		30	17		17
Přídavek [mm]	0,5	0,2	načisto	načisto	0,3	načisto	načisto
Hloubka řezu [mm]	0,25	1	0,4	0,15	1	0,4	2
Posuv [mm/min]	2000	4800		2000	2000	2500	2000
Otáčky [1/min]	9000						
Směr frézování	sousledně						
Dílčí strojní čas [min]	6:36	0:46	1:30	15:15	1:58	2:08	1:10
Celkový strojní čas [min]	9:52			15:15	4:06		1:10

Tab. 4.23: Experiment č. 14 – parametry frézování vtokových kanálů č. 1 až 4 (typ „T“)

FREZOVÁNÍ VTOKOVÝCH KANÁLŮ TVARU U	Kanál č.5 (krátká kf)	Kanál č.6 (krátká kf)	Kanál č.7 (dlouhá kf)	Kanál č.8 (dlouhá kf)
Použitá fréza	kf 5			
Vyložení nástroje [mm]	17		32	
Přídavek [mm]	načisto			
Hloubka řezu [mm]	2	2,5	2	1
Přísuv na dně kanálu [mm]	0,5			
Posuv [mm/min]	2000			
Otáčky [1/min]	9000			
Směr frézování	sousledně			
Celkový strojní čas [min]	0:55	0:48	1:18	1:36

Tab. 4.24: Experiment č. 14 – parametry frézování vtokových kanálů č. 5 až 6 (typ „U“)

Výsledek č. 14: Zjištěné výsledky a poznatky jsou rozepsány pro jednotlivé případy obrábění vtokových kanálů:

Kanál č. 1 – byla použita klasická odzkoušená technologie, výborná kvalita obrobeného povrchu (na vtokový kanál příliš kvalitní), tichý chod, nutná jedna výměna nástroje, druhý nejdelší strojní čas.

Kanál č. 2 – hrubování načisto – jednoduché na programování, výborná kvalita obrobeného povrchu, bez výměny nástroje, tichý chod, nejdelší strojní čas, toroidní fréza nechává na dně kontury „schody“ – nevyhovující pro průtok tekutého materiálu.

Kanál č. 3 – krátká kulová fréza do plného materiálu nejprve s přídavkem 0,3 a poté načisto, značně skřípe, kvalita povrchu po vyhrubování vyhovující, po dokončení o stupeň lepší, přibližně poloviční strojní čas oproti klasické technologii.

Kanál č. 4 – krátká kulová fréza rovnou načisto do plného materiálu po 2 mm, krátká fréza, velmi skřípe, povrch je hrubý, ale kvalita ještě únosná a v mezích, takřka desetinový strojní čas oproti klasické technologii, z hlediska strojního času ve vztahu ke kvalitě obrobení nejvýhodnější varianta.

Kanál č. 5 – vtokový kanál typu „U“, podmínky i výsledky obrobení jako u kanálu č.4, kvalita obrobení ještě únosná.

Kanál č. 6 – krátká kulová fréza načisto do plného materiálu po 2,5 mm, velmi skřípe, povrch nepatrně horší než u předchozích dvou variant, časově nejrychlejší varianta.

Kanál č. 7 – delší kulová fréza načisto do plného materiálu, podmínky obrábění jako u kanálu č. 5, nepatrně hrubší povrch, což je vzhledem k většímu vyložení frézy zanedbatelné.

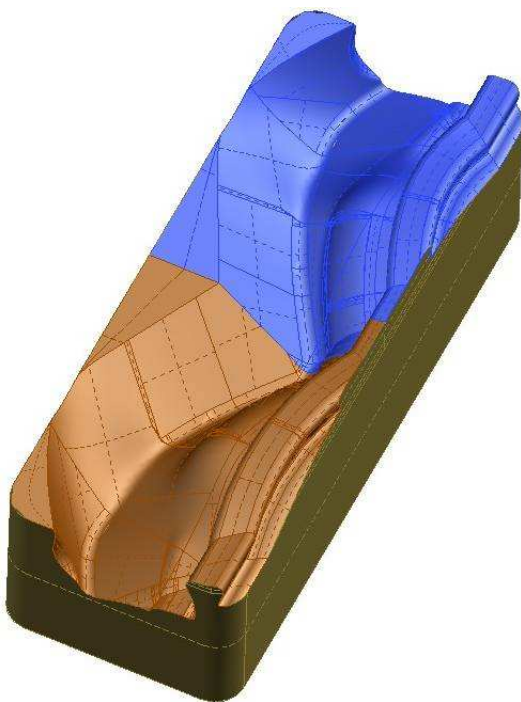
Kanál č. 8 - delší kulová fréza načisto do plného materiálu po 1 mm, kvalita povrchu je srovnatelná s vtokovým kanálem č. 7.

Závěr č. 14: Odzkoušená klasická, popř. hrubovací technologie zaručují top povrch a tichý chod stroje, avšak na úkor strojního času. Oproti tomu druhý extrém – krátká kulová fréza rovnou načisto do plného materiálu vykazuje téměř až desetinásobně nižší strojní čas oproti klasické technologii a čtyřnásobně nižší oproti variantě hrubování + načisto, za stejných řezných podmínek. Kvalita obrobeného povrchu je viditelně horší, proces frézování je doprovázen akustickými projevy a chvěním nástroje, dochází také pravděpodobně k vyššímu opotřebením nástroje. Pro vtokový kanál se ovšem jedná o dostačující kvalitu povrchu, jeho funkce by měla být i za takových podmínek zachována. Na 20 cm dlouhém vtokovém kanálu je dosažená úspora 9 minut, na dvoumetrové vstříkovací formě by úspora byla mnohonásobně vyšší.

Samozřejmě je v tomto experimentu stále optimalizační potenciál (řezné podmínky, volba jiného stroje, popř. nástroje), experiment však dokázal možnost značné úspory strojního času již při nepatrné změně technologie.

4.2.6 Experiment č. 15 – frézování tvarové plochy

Dokončování tvarových ploch patří mezi nejdůležitější části výroby prototypové vstřikovací formy. Správnou volbou strategie frézování a velikostí přísuvu lze zásadně ovlivnit strojní čas, výslednou kvalitu povrchu i dobu potřebných dokončovacích prací. Je důležité rozlišovat méně důležité tvarové plochy od pohledových (funkčních) ploch, které bývají ručně dokončovány (leštěny).



Obr. 4.30: CAD model hliníkové vložky s tvarovou plochou



Obr. 4.31: Vyrobená hliníková vložka s tvarovou plochou

V tomto experimentu je porovnáno dokončování dvou totožných tvarových ploch za použití stejných řezných podmínek (viz obr. 4.30 a 4.31). V první variantě byla použita kulová fréza o průměru 16 mm, ve druhé variantě toroidní fréza 16r7. Po obou nástrojích následovalo frézování zbytkového materiálu kulovou frézou o průměru 10 mm a 6 mm. Vložka byla předhrubována toroidní frézou 16r2 a 8r2 s přídavkem 0,7 mm. Experiment se zaměřuje kromě strojních časů převážně na kvalitu obrobeneho povrchu.

Tabulka parametrů frézování tvarové plochy:

TVAROVÁ PLOCHA	Dokončování s kf 16				Dokončování s tf 16r7			
Použitá fréza	kf 16		kf 10	kf 6	tf 16r7		kf 10	kf 6
Vyložení nástroje [mm]	70		50	40	70		50	40
Přídavek obrábění [mm]	0,3	načisto			0,3	načisto		
Přísuv [mm]	2	0,35	0,3	0,2	2	0,35	0,3	0,2
Posuv [mm/min]	7000	5000	2500	2000	7000	5000	2500	2000
Otáčky [1/min]	12000							
Směr frézování	pendlování		sousledně		pendlování		sousledně	
Celkový strojní čas [min]	2:08	17:18	6:50	7:15	2:47	16:18	5:20	7:15
	19:26		14:05		19:05		12:35	

Tab. 4.25: Experiment č. 15 – parametry frézování tvarové plochy

Výsledek č. 15: Přestože je výsledná kvalita obrobeneho povrchu v obou případech srovnatelná, byla toroidní fréza 16r7 stabilnější v řezu než kulová fréza o průměru 16 mm. Celkový strojní čas dokončování byl v případě toroidní frézy 16r7 nepatrně nižší, to platí i pro frézování zbytkového materiálu. U toroidní frézy 16r7 se však nevyskytuje problém kulových fréz, a sice nulová řezná rychlost v oblasti špičky nástroje. Při tříosém frézování proto dosahuje zřetelně lepší kvality obrobění.

5 Zhotovení experimentální prototypové vstřikovací formy

Tato část diplomové práce je zaměřena na aplikaci výsledků experimentů dosažených v předchozích kapitolách. Cílem této části je zkonstruování a následné vyrobení experimentální prototypové vstřikovací formy. Tato forma je určena pro výrobu dvou zrcadlových výlisků, jedna polovina formy je frézována původní technologií, druhá polovina optimalizovanou technologií vycházející z výsledků předchozích experimentů. Na závěr jsou porovnány obě technologie z hlediska strojních časů, kvality obrobení a nutnosti dokončovacích prací.

5.1 Konstrukce výlisku

První krok ke zhotovení vstřikovací formy je konstrukce požadovaného výlisku. Tvar výlisku určuje parametry a tvar vstřikovací formy. Požadovaný výlisek obsahuje následující prvky:

- vypuklou a vydutou plochu (pro porovnání tříosého a pětiosého frézování),
- vyztužení v podobě žeber (pro porovnání frézování křížových drážek),
- kónické kruhové výstupky (pro porovnání frézování kruhových kónických drážek),
- podkos ve tvaru (nutno frézovat kapsu a použít vložku),
- gravuru (použití frézy o průměru 0,6 mm ve zrychlovací hlavě).



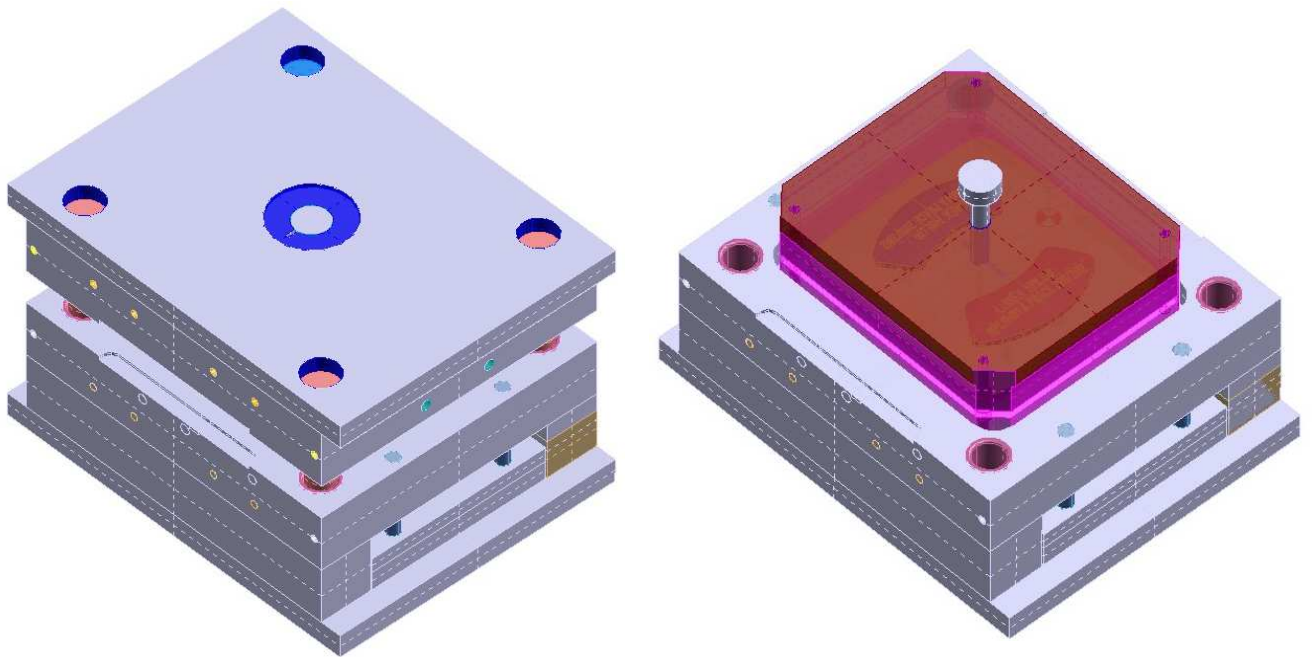
Obr. 5.1: Různé pohledy na CAD model požadovaného výlisku

Na základě těchto parametrů byl zkonstruován model výlisku o vnějších rozměrech 143 x 64 x 7 mm (viz obr. 5.1). Je zřejmé, že kromě výše zmiňovaných prvků bude vstřikovací forma obsahovat další prvky jako vtokové kanály, kapsy pro vložky či otvory pro vyhazovače.

5.2 Konstrukce prototypové vstřikovací formy

Ve druhém kroku byl model požadovaného výlisku předán do oddělení konstrukce nástrojů, kde byla zkonstruována prototypová vstřikovací forma. Vzhledem ke značným nákladům na materiál polotovaru, rám formy a ostatní příslušenství, byla tato vstřikovací forma zkonstruována jako vložka do již existujícího univerzálního rámu (viz obr. 5.2).

Na základě modelu vstřikovací formy byl stanoven rozměr obou polotovarů (310 x 260 x 70 mm) a objednan materiál (EN AW 5083).



Obr. 5.2: Vstřikovací forma vsazená do univerzálního rámu [5]

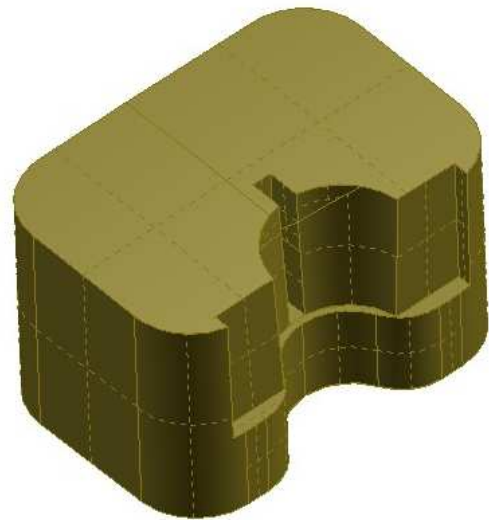
5.3 Výroba prototypové vstřikovací formy

Ve třetím kroku byly na základě CAD modelu naprogramovány programy pro frézování prototypové vstřikovací formy. Při programování byly zohledněny použité strategie (stávající x optimalizovaná) a zhotovena technologie obrábění pro obě porovnávané poloviny obráběné formy.

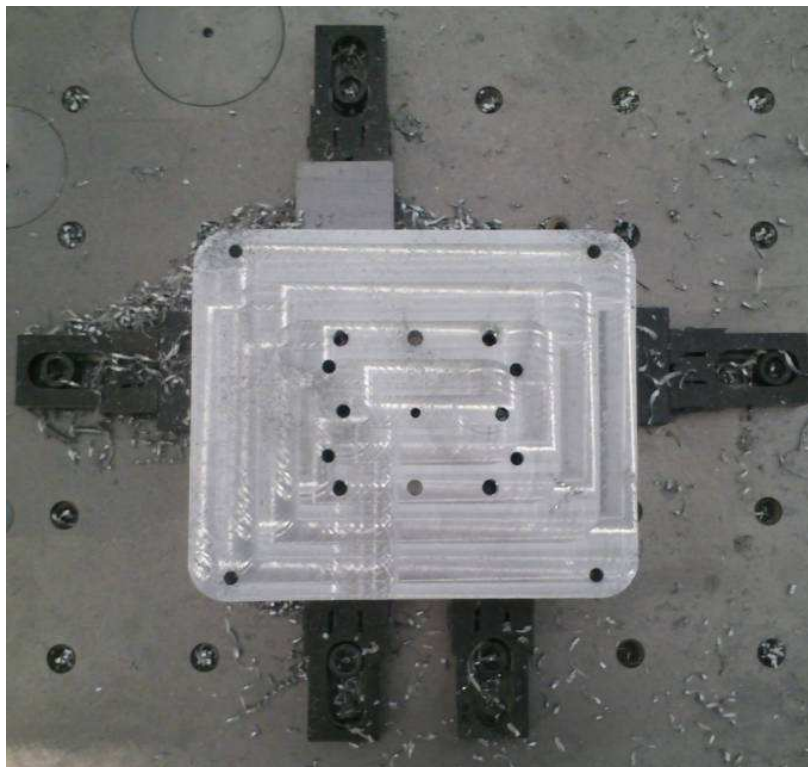
Vlastní výroba prototypové vstřikovací formy probíhala na pětiosé frézce Deckel Maho DMU 80T (frézování dvou vložek) a portálové frézce Forest Line (frézování vlastní formy, tzn. vyhazovací a pohledové strany).

Obě vložky (model viz obrázek 5.3) byly zhotoveny z polotovarů o rozměrech 34 x 28 x 26 mm na tři upnutí. Zhotovení jedné vložky trvalo 1,5 hodiny.

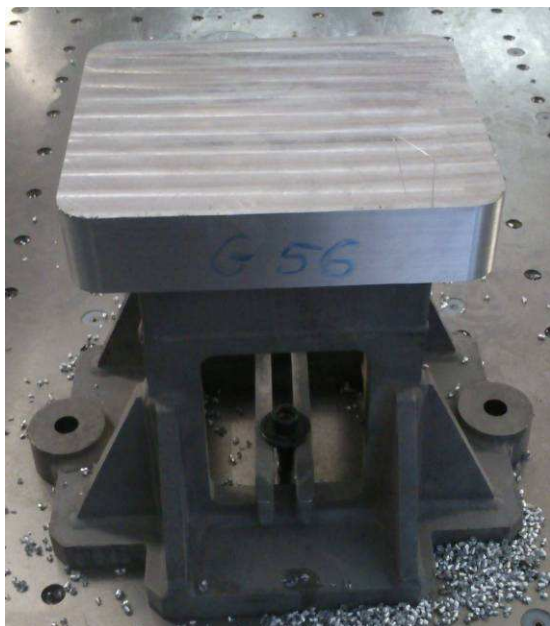
Obě části vstřikovací formy byly frézovány na dvě upnutí. V prvním upnutí bylo frézováno čelo a boky načisto, zhotoveny manipulační otvory, otvory pro vyhazovače a vtok a otvory pro najetí a upevnění kusu pro druhé upnutí (viz obr. 5.4). Strojní časy programů v prvním upnutí nebyly měřeny a porovnány, protože byly pro obě poloviny každého kusu společné, převažovaly zde operace pro přípravu na druhé upnutí. Ve druhém upnutí byl frézován finální tvar vstřikovací formy včetně kapes, drážek, zbytkového materiálu a gravírování (viz obr. 5.6).



Obr. 5.3: CAD model vložky do vyhazovací strany vstřikovací formy



Obr. 5.4: Vyhazovací strana vstřikovací formy - 1. upnutí



Obr. 5.5: Vyhazovací strana vstřikovací formy - 2. upnutí



Obr. 5.6: Vyhazovací strana vstřikovací formy – frézování finálního tvaru

U všech programů byl měřen a následně porovnán strojní čas. Pro reálné porovnání jednotlivých variant obrábění jsou ve výsledných strojních časech zahrnuty i nutné výměny nástroje, jedna výměna nástroje v tomto případě trvá 1 minutu. Volba řezných podmínek a parametrů obrábění vycházela z hodnot doporučených výrobcí nástrojů [3] a také z praktických zkušeností obsluhy stroje.

5.3.1 Frézování vyhazovací strany vstřikovací formy

Před frézováním finálního tvaru vyhazovací strany vstřikovací formy bylo nutné provést operace společné pro obě porovnávané poloviny (tj. stávající a optimalizovanou). Tyto společné operace včetně strojních časů jsou zachyceny v tabulce č. 5.1. Jedná se o hrubování frézovací hlavou, dokončení bočních ploch, zahloubení pro hlavy šroubů a otvory pro vyhazovače čelní válcovou frézou.

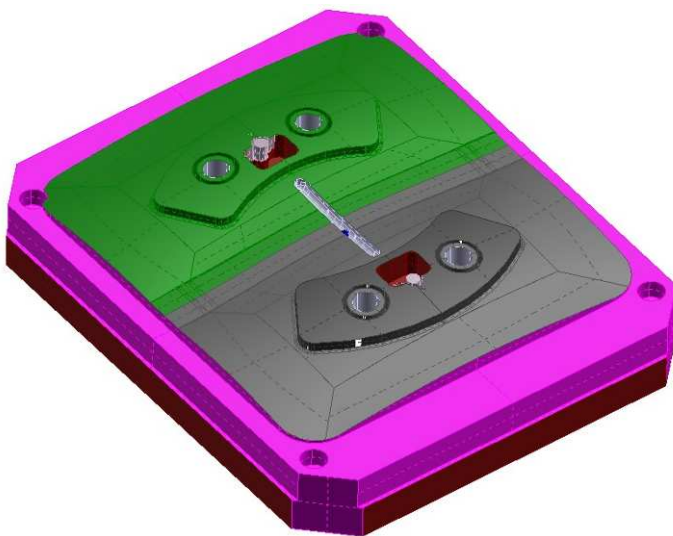
Tabulka společných operací pro zhotovení vyhazovací strany vstřikovací formy:

Popis operace	Použitý nástroj	Řezné podmínky a_p [mm], S [1/min], F [mm/min]	Strojní čas [min]
Hrubování s přídavkem 0,7 mm	pf52r3	$a_p = 2$; S = 12000 ; F = 8000	3:45
Boční plochy načisto	sf16	$a_p = 1$; S = 16000 ; F = 10000	1:43
4x zahloubení pro hlavu šroubu	sf12	$a_p = 0,8$; S = 16000 ; F = 800	1:30
4x otvor pro vyhazovač	sf10	$a_p = 0,5$; S = 16000 ; F = 600	6:00
Součet strojních časů [min]			16:48

Tab. 5.1: Společné operace pro zhotovení vyhazovací strany vstřikovací formy

Po vyhrubování s přídávkem 0,7 mm byla forma rozdělena na dvě totožné poloviny. Pro zhotovení první poloviny byla nasazena stávající technologie, tzn. dohrubování s přídávkem 0,2 mm toroidní frézou, dokončení načisto kulovou frézou (strategie podél kontury), zbytkový materiál kulovými frézami. Vtokový kanál byl hrubován toroidní frézou a poté dokončen kulovou frézou, drážky byly obráběny hrubovací strategií RPLAN (viz experiment v kapitole 4.2.3.1) toroidní a kulovou frézou ve zrychlovací hlavě. Vzhledem ke tvaru ploch obráběné formy a použití kulových fréz nebylo nutné naklápět nástroje, bylo frézováno tříose.

Pro zhotovení druhé poloviny formy byla nasazena optimalizovaná technologie, tzn. dohrubování s přídávkem 0,3 mm kulovou frézou, dokončení načisto toroidní a kulovou frézou, zbytkový materiál čelní válcovou frézou pětiosé. Vtokový kanál byl dokončen kulovou frézou rovnou do plného materiálu, drážky byly obráběny strategií zbytkového materiálu RSURF (viz experiment v kapitole 4.2.3.1) toroidní a kulovou frézou ve zrychlovací hlavě. V tomto případě bylo pro dokončení tvaru, zbytkový materiál a kruhové drážky použito souvislé pětiosé frézování. Dělicí rovina musela být obráběna tříose kulovou frézou (strategie podél osy), při pětiosém frézování by docházelo ke kolizi nástroje s tvarem. Řezné podmínky byly v obou případech obrábění totožné.



Obr. 5.7: CAD model vyhazovací strany
vstřikovací formy



Obr. 5.8: Vyrobená vyhazovací strana
vstřikovací formy

Tabulka strojních časů frézování vyhazovací strany vstříkovací formy:

Popis operace	Použitý nástroj	Řezné podmínky a_p [mm], S [1/min], F [mm/min]	Strojní čas stávající technologie [min]	Strojní čas optimalizované technologie [min]
Dohrubování +0,2 mm	tf8r2	0,3 ; 14000 ; 8000	20:11	-
Dohrubování +0,3 mm	kf16	3 ; 16000 ; 15000	-	3:16
Dokončení načisto	kf16	0,35 ; 16000 ; 10000	25:23	-
Dokončení načisto	tf12r2 + kf12	S = 16000; F = 5000	-	3:45 + 12:33
Hrubování kapsy +0,3 mm	sf6	0,2 ; 14000 ; 2500	4:20	5:55
Kapsa načisto	sf6	3 ; 16000 ; 5000	3:10	3:10
Hrubování kanálu +0,2	tf4r0,5	0,2 ; 14000 ; 4000	1:24	-
Dokončení kanálu načisto	kf5	1 ; 16000 ; 3000	0:58	0:26
Zbytkový materiál	kf6	0,2 ; 16000 ; 4000	4:54	-
Zbytkový materiál	kf3	0,15 ; 16000 ; 3500	2:42	-
Zbytkový materiál	kf2	0,1 ; 16000 ; 3000	1:30	-
Zbytkový materiál	kf1	0,05 ; 70000 ; 2000	4:11	-
Zbytkový materiál pětiosé	sf6	S = 16000; F = 1000	-	1:34
Kruhové drážky načisto	tf2r0,2	0,1 ; 16000 ; 2000	17:02	14:24
Křížová drážka načisto	kf1	0,05 ; 70000 ; 2000	45:20	23:10
Součet strojních časů [h:min:s]			2:21:05	1:16:13

Tab. 5.2: Tabulka strojních časů frézování vyhazovací strany vstříkovací formy

Z dosažených výsledků je patrná značná časová úspora optimalizované varianty obrábění. Vyšší kvalita obrobení funkčních ploch formy (tzn. tvaru výlisku) byla dosažena pětiosou technologií, nároky na ruční dokončování a leštění jsou v tomto případě minimální. Kvalita obrobení dělicí roviny byla v obou případech srovnatelná, protože bylo frézováno tříose kulovou frézou. Jelikož se nejedná o funkční plochu, není kvalita obrobení stěžejní. Porovnání stávající a optimalizované technologií je shrnuto v následujících bodech:

- Dohrubování kulovou frézou s vyšším přísuvem (4 mm) strategií podél osy je několikanásobně rychlejší než použití hrubovacího cyklu (méně přejezdů a nájezdů, rovnoměrný chod, větší průměr nástroje). Při obrábění méně členitých ploch je výsledný efekt stejný.
- Dokončení souvislým pětiosým frézováním je rychlejší a povrch kvalitnější než u dokončení kulovou frézou. Použití dokončovací strategie podél kontury kulovou frézou (viz experiment v kapitole 4.1.1 a 4.1.2) je nevhodné z hlediska strojního času i kvality povrchu.

- U optimalizované technologie nebylo nutné frézovat zbytkový materiál z důvodu použití souvislého pětiosého frézování. Stačily dva programy podél křivky tvaru výlisku čelní válcovou frézou o průměru 6 mm, zatímco u stávající technologie bylo nutné nasadit kulové frézy o průměrech 6, 3, 2 a 1 mm. Optimalizovanou technologií bylo dosaženo kromě časové úspory také požadované ostré hrany podél tvaru výlisku, což je použitím kulové frézy nedosažitelné.
- Při zhotovení vtokového kanálu byly potvrzeny výsledky z předchozích experimentů (viz kapitola 4.2.5). V obou variantách bylo dosaženo přijatelné a srovnatelné kvality obrobeného povrchu. Podstatný rozdíl byl však v dosažených strojních časech. Zatímco stávající technologie používá dva nástroje (hrubování toroidní frézou a dokončení kulovou frézou) a čistý strojní čas byl 2 min 22 s, optimalizovaná technologie frézuje rovnou načisto jedním nástrojem (kulovou frézou) za pětinosého strojního času, tj. 26 vteřin. Průběh obrábění byl v obou případech plynulý bez vibrací a akustických projevů.
- Kruhové kónické drážky byly frézovány v jednom případě tříose řádkováním a ve druhém případě pětiose. Stávající tříosou technologií bylo dosaženo vyšší kvality obrobeného povrchu, avšak nepatrně vyššího strojního času.
- Křížové drážky byly frézovány kulovou frézou o průměru 1 mm ve zrychlovací hlavě za konstantních řezných podmínek, lišily se pouze CAM strategie použité k tvorbě NC programu. V případě stávající technologie byla použita hrubovací strategie RPLAN, v případě optimalizované technologie strategie zbytkového materiálu RSURF (viz experiment v kapitole 4.2.3.1). Hrubovací strategií RPLAN bylo dosaženo dvojnásobného strojního času než strategií zbytkového materiálu RSURF, kvalita obrobeného povrchu byla srovnatelná.

5.3.2 Frézování pohledové strany vstříkovací formy

Podobně jako při zhotovení vyhazovací strany vstříkovací formy, bylo i v tomto případě nutné před frézováním finálního tvaru provést operace společné pro obě porovnávané poloviny. Tyto společné operace včetně strojních časů jsou zachyceny v tabulce č. 5.3. Jedná se o hrubování frézovací hlavou, dokončení bočních ploch a zahloubení pro hlavy šroubů čelní válcovou frézou.

Tabulka společných operací pro zhotovení pohledové strany vstřikovací formy:

Popis operace	Použitý nástroj	Řezné podmínky	Strojní čas [min]
		a_p [mm], S [1/min], F [mm/min]	
Hrubování s přídávkem 0,7 mm	pf52r3	$a_p = 2$; S = 12000 ; F = 8000	2:42
Boční plochy načisto	sf16	$a_p = 1$; S = 16000 ; F = 10000	1:43
4x zahloubení pro hlavu šroubu	sf12	$a_p = 0,8$; S = 16000 ; F = 800	1:30
Součet strojních časů [min]			8:55

Tab. 5.3: Společné operace pro zhotovení pohledové strany vstřikovací formy

Po vyhrubování s přídávkem 0,7 mm byla forma opět rozdělena na dvě totožné poloviny. Pro zhotovení první poloviny byla nasazena stávající technologie, tzn. dohrubování s přídávkem 0,2 mm toroidní frézou, dokončení načisto kulovou frézou (strategie podél kontury), zbytkový materiál kulovými frézami a gravura kulovou frézou o průměru 0,6 mm ve zrychlovací hlavě. Vzhledem ke tvaru ploch obráběné formy a použití kulových fréz nebylo nutné naklápět nástroje, bylo frézováno třiose.

Pro zhotovení druhé poloviny formy byla nasazena optimalizovaná technologie, tzn. dohrubování s přídávkem 0,3 mm toroidní a kulovou frézou, dokončení načisto toroidní a kulovou frézou, zbytkový materiál kulovými frézami a gravura. V tomto případě bylo pro dokončení ploch dělicí roviny použito souvislé pětiosé frézování. Funkční plochy (tzn. tvar výlisku) musely být obráběny třiose kulovou frézou (strategie podél kontury s vodicím prvkem), při pětiosém frézování by docházelo ke kolizi nástroje s tvarem. Řezné podmínky byly v obou případech obrábění totožné.



Obr. 5.9: CAD model pohledové strany vstřikovací formy



Obr. 5.10: Vyrobená pohledová strana vstřikovací formy

Tabulka strojních časů frézování pohledové strany vstřikovací formy:

Popis operace	Použitý nástroj	Řezné podmínky a_p [mm], S [1/min], F [mm/min]	Strojní čas stávající technologie [min]	Strojní čas optimalizovaná technologie [min]
Dohrubování +0,2 mm	tf8r2	0,3 ; 14000 ; 8000	24:31	16:47
Dohrubování +0,3 mm	kf16	3 ; 16000 ; 15000	-	3:00
Dokončení načisto	kf16	0,35 ; 16000 ; 10000	23:21	-
Dokončení načisto	tf12r2 + kf12	S = 16000; F = 5000	-	10:30 + 9:34
Zbytkový materiál	kf6	0,2 ; 16000 ; 4000	6:10	6:10
Zbytkový materiál	kf3	0,15 ; 16000 ; 3500	3:00	3:00
Zbytkový materiál	kf2	0,1 ; 16000 ; 3000	1:58	1:58
Zbytkový materiál	kf1	0,05 ; 70000 ; 2000	4:46	4:46
Gravura obrázky	kf0,6	0,03 ; 70000 ; 1000	15:00	15:00
Gravura nápis	kf0,6	0,02 ; 70000 ; 1000	89:50	-
Gravura nápis	sf0,8	0,03 ; 70000 ; 1000	-	21:28
Součet strojních časů [h:min:s]			2:56:36	1:42:13
Součet strojních časů bez gravury			1:09:46	1:03:45

Tab. 5.4: Tabulka strojních časů frézování pohledové strany vstřikovací formy

Z dosažených výsledků je patrná časová úspora optimalizované varianty obrábění, ale v případě zanedbání času na gravuru je úspora pouze v řádu několika minut. To bylo způsobeno omezením nasazení souvislé pětiosé technologie a nízkou tvarovou rozmanitostí pohledové strany vstřikovací formy. Vyšší kvalita obrobení dělicí roviny byla dosažena pětiosou technologií, vzhledem k nízké kvalitě konstruovaných ploch v CAD modelu byl průběh pětiosého frézování neplynulý a zdlouhavý; v tomto případě by bylo z hlediska strojního času vhodnější frézovat dělicí rovinu kulovou frézou pod naklopením pomocí strategie podél osy se zalepením otvorů. Dokončení funkčních ploch (tj. tvaru výlisku) proběhlo kulovou frézou za použití strategie podél kontury (stávající technologie) a strategie podél kontury s vodícím prvkem (optimalizovaná technologie), přičemž plynulejší a rychlejší chod byl dosažen optimalizovanou technologií. Frézování zbytkového materiálu bylo vzhledem ke tvaru obráběné kontury v obou případech totožné. Obrázky a nápis byly gravírovány dvěma nástroji, a sice kulovou frézou o průměru 0,6 mm a čelní válcovou frézou o průměru 0,8 mm. Zatímco nápis u stávající technologie byl frézován dle ploch v modelu kulovou frézou 0,6, nápis u optimalizované technologie byl zjednodušen a frézován čelní válcovou frézou 0,8 pouze podél křivky v několika vrstvách. Došlo tak ke značné úspoře strojního času, přičemž kvalita nápisu je vyhovující.

6 Technicko-ekonomické zhodnocení a výsledky

Cílem této diplomové práce bylo zefektivnění výroby prototypové vstříkovací formy (tj. CAM programování a frézování). Na základě analýzy současného stavu výroby ve firmě *MBtech Bohemia s.r.o.*, stanovení oblastí možné optimalizace (viz kapitola 3) a provedení experimentů v oblasti technologie obrábění (viz kapitola 4) byly nalezeny prvky a kontury, jejichž optimalizací výroby lze dosáhnout značných úspor. Pod pojmem úspory se v prototypové výrobě rozumí především zkrácení strojních časů, zvýšení jakosti obrobků a s tím související snížení nároků na ruční dokončování, popř. vícepráce. Mezi tyto prvky patří např. tvarové plochy, vtokové kanály, úzké drážky, vypuklé a vyduté plochy.

Na základě výsledků experimentů byla zkonstruována experimentální vstříkovací forma (viz kapitola 5.2), která se skládá ze dvou zrcadlových polovin a slouží k porovnání výroby pomocí stávající a optimalizované technologie. Veškeré strojní časy výroby formy byly zaznamenány a celkový strojní čas pro každou technologii přepočten na celou formu (tzn. vynásoben dvěma). Na základě celkového strojního času a času nutného k CAM programování byly vypočteny reálné náklady na zhotovení této vstříkovací formy (viz tabulka 6.1). Obě technologie byly následně porovnány z ekonomického hlediska. Hodinová sazba CAM programování činí 800,- Kč a hodinová sazba frézování 3000,- Kč. Je nutné dodat, že se jedná pouze o orientační srovnání vlastních strojních časů obrábění tvarové plochy vstříkovací formy (tzn. druhého upnutí – první upnutí bylo pro obě technologie totožné), ve výpočtech nejsou zahrnuty náklady na konstrukci formy, zpracování zakázky, materiál, příslušenství, nástroje, manipulaci a transport.

Tabulka reálných nákladů na zhotovení experimentální prototypové vstříkovací formy stávající a optimalizovanou technologií:

Kalkulované náklady [Kč]	Stávající technologie		Optimalizovaná technologie	
	Vyhazovací strana	Pohledová strana	Vyhazovací strana	Pohledová strana
CAM programování	$5,5 \times 800 = 4400$	$4,5 \times 800 = 3600$	$7 \times 800 = 5600$	$6,5 \times 800 = 5200$
Frézování	$5,263 \times 3000 = 15789$	$6,184 \times 3000 = 18552$	$3,101 \times 3000 = 9303$	$3,700 \times 3000 = 11100$
Součet CAM + frézování	20189	22152	14903	16300
Celkové náklady na formu	42.341,- Kč		31.203,- Kč	

Tab. 6.1: Tabulka nákladů na zhotovení experimentální vstříkovací formy

Z tabulky 6.1 je patrná značná finanční úspora optimalizované varianty oproti stávající technologii. V tomto případě se jedná o úsporu ve výši 26 %. Vzhledem k malým rozměrům a malé členitosti pozorovaného vzorku je jisté, že by v případě obrábění velké vstříkovací formy mohlo být dosaženo ještě větších úspor. Z tabulky je také patrné, že je ekonomičtější se pečlivě a racionálně věnovat CAM programování a přípravě technologie i za cenu delšího času. Toto je poté vykoupeno nižším strojním časem a značnou finanční úsporou, protože hodinová sazba programátora je několikanásobně nižší než hodinová sazba stroje.

Vzhledem k použití souvislých pětiosých programů v optimalizované technologii bylo dosaženo vyšší kvality obrobeného povrchu, což znamená nižší nároky na ruční dokončování vstříkovací formy a tím pádem i nižší finanční náklady na celkovou výrobu.

7 Shrnutí a závěr

Cílem diplomové práce byla analýza a následná optimalizace technologie obrábění prototypových vstřikovacích forem ve firmě *MBtech Bohemia s.r.o.* v oblasti výroby a CAM programování. Jelikož se jedná o velmi komplexní úkol, byly pro optimalizaci vybrány typové prvky a kontury s nejčastějším výskytem. Z těchto nejčtenějších prvků byla zkonstruována testovací deska, na které bylo vyzkoušeno a porovnáno značné množství různých strategií frézování s různými parametry. Každý jednotlivý experiment je detailně popsán v kapitole 4, včetně tabulky parametrů, výsledků testování a dílčího shrnutí a závěru.

Značný potenciál byl zjištěn např. u dokončovacího frézování kulovou frézou (viz kapitoly 4.1.1 a 4.1.2), kdy lze pomocí vhodně použité strategie podél osy a vynechání nájezdových maker ušetřit až 100% strojního času oproti nepatrně jednodušší programovací strategii podél kontury. Další časové úspory – zejména u forem větších rozměrů - lze docílit při frézování vtokových kanálů (viz kapitola 4.2.5), kdy je možno použít krátkou kulovou frézu k dokončování načisto rovnou do plného materiálu (za použití nájezdových maker) při docílení přijatelného povrchu obrobení. Za zmínku stojí také dokončování tvarových ploch toroidní frézou 16r7 (viz kapitola 4.2.6), která je stabilnější v řezu než kulová fréza 16, nezanechává tolik zbytkového materiálu a nevyskytuje se u ní problém kulových fréz – nulová řezná rychlost v oblasti špičky nástroje. Bylo demonstrováno, že v rámci prototypové výroby je z časových i finančních důvodů nepřijatelné používat pro zhotovení běžných drážek hned od začátku elektroerozivní obrábění (viz kapitola 4.2.4). S použitím zrychlovací hlavy lze docílit vyšší produktivity obrábění a frézovat tak nástroji malých průměrů do maximální možné hloubky (20 mm) a elektroerozivně obrábět až od této hloubky (viz kapitola 4.2.3). Dále byla demonstrována problematika frézování hlubokých kapes s malými poloměry rohů, kdy značně vyložený nástroj vibruje a dochází ke chvění a vzniku nepřijatelného povrchu (viz kapitola 4.2.1). V několika případech byla porovnána stávající technologie frézování se souvislým pětiosým frézováním, které se ve většině případech ukázalo jako výhodnější (např. kónické kapsy v kapitole 4.1.4, vypuklá a vydutá plocha v kapitolách 4.1.5 a 4.1.6, torzní kanály v kapitole 4.2.2), v některých případech dokonce jako jediné možné řešení (pětiosá těsnící drážka v kapitole 4.1.10).

Další část diplomové práce je zaměřena na výrobu experimentální vstřikovací formy, kde byly aplikovány výsledky z předchozích experimentů. První polovina vstřikovací formy byla obráběna stávajícími technologiemi, druhá polovina optimalizovanou technologiemi, ve které bylo použito také souvislé pětiosé frézování. Po pečlivém měření strojních časů a následném vyhodnocení byla prokázána značná časová úspora optimalizované technologie a ve většině případů také lepší kvalita obrobeného povrchu, tzn. nižší nároky na ruční dokončování a vícepráce. Kromě výše zmiňovaných přínosů v oblasti optimalizace

technologie obrábění bylo řešení této diplomové práce velkým přínosem také pro mě osobně, vyzkoušel jsem si plánování a řízení výroby v praxi, kompletně naprogramoval veškeré v diplomové práci uváděné programy a osvojil si obsluhu portálové frézky Forest Line.

Tato diplomová práce je zaměřena na oblast výroby a CAM programování a na zmapování nejširšího okruhu možností optimalizace technologie obrábění. Potvrzuje platnost Paretova principu 80-20, protože za 20 % potřebného času bylo analyzováno 80 % možností optimalizace. Úsilí vynaložené pro analýzu zbylých 20 % by bylo vzhledem k dosaženým výsledkům a reálné potřebě v rámci prototypové výroby značně neefektivní.

8 Seznam použitých zdrojů a informací

- [1] Direct Industry. Obrázek zrychlovací hlavy firmy IMT GmbH.
<http://www.directindustry.com/prod/imt/light-milling-motor-spindles-57694-381212.html>

- [2] GLEICH GmbH – Aluminium. Technické listy jednotlivých materiálů.
<http://www.gleich.de/de/aluminium-walzplatten/en-aw-5083-details>
<http://www.gleich.de/de/aluminium-walzplatten/en-aw-7075-details>

- [3] Katalogy řezných nástrojů firem Iscar, WNT, Pokolm, Hoffmann Group a Meusburger.

- [4] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Úvaly: Albra – pedagogické nakladatelství, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.

- [5] MBtech Bohemia s.r.o. Podklady firmy.

- [6] RAMPF Tooling GmbH & Co. KG. Technický list materiálu.
http://www.rampf-group.com/fileadmin/rampf_downloadcenter/RAMPF-Tooling/Datenblaetter/Blockmaterialien/WB-1222_TDS_GB.pdf

- [7] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 7,8, s. 60-63. ISSN 1212-2572

PŘÍLOHY K DIPLOMOVÉ PRÁCI

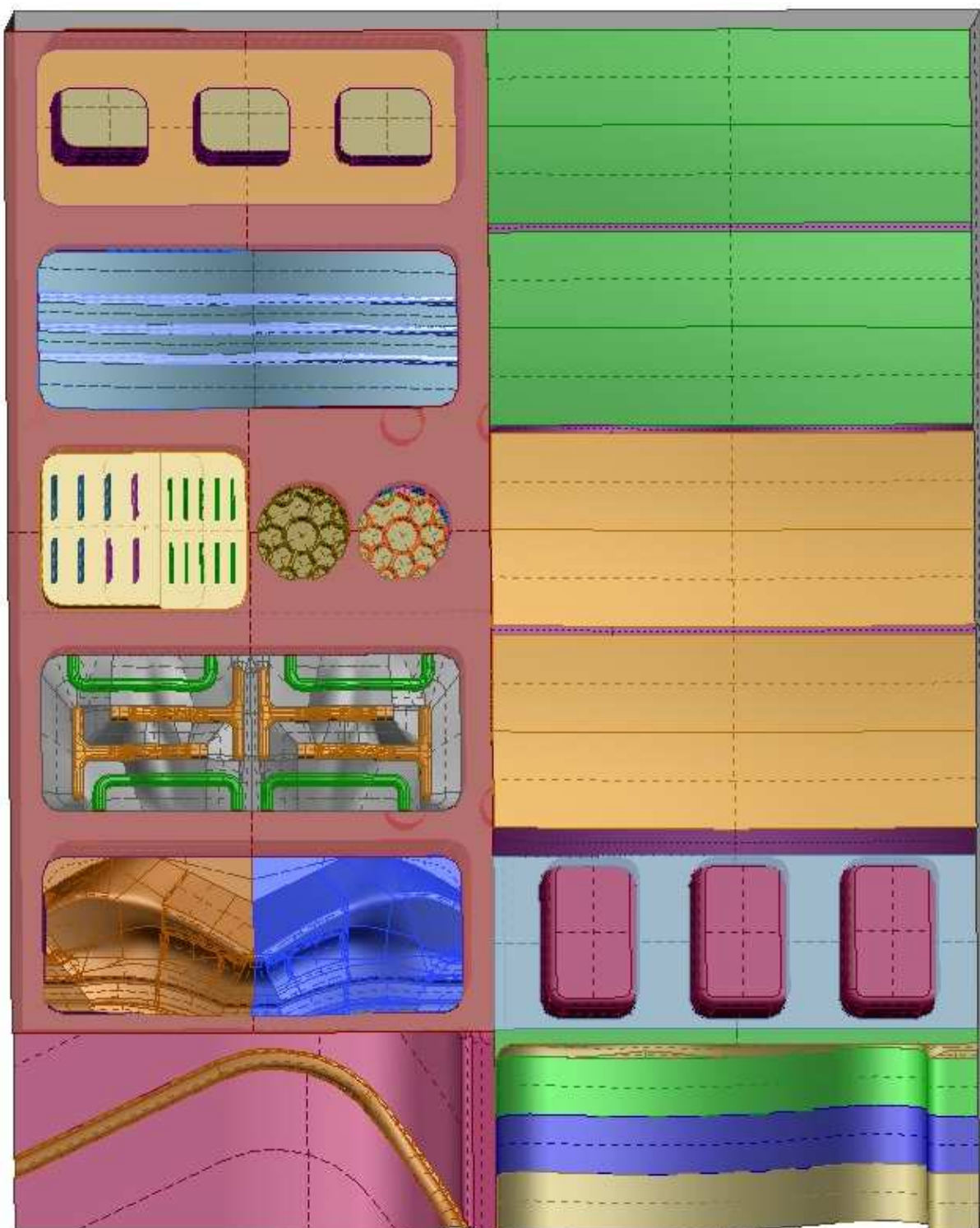
Optimalizace a porovnání technologie obrábění prototypové
vstříkovací formy

Obsah:

CAD model testovací desky včetně vložek	II až III
Foto kompletně vyfrézované testovací desky včetně hliníkových vložek	IV až V
CAD model experimentální vstříkovací formy – vyhazovací strana ...	VI až VII
Foto vyhazovací strany experimentální vstříkovací formy	VIII až IX
CAD model experimentální vstříkovací formy – pohledová strana	X až XI
Foto pohledové strany experimentální vstříkovací formy.....	XII až XIII
Technický list materiálu RAKU TOOL WB-1222	XIV až XVI

PŘÍLOHA č. 1

CAD model testovací desky včetně vložek (1. fáze experimentů)



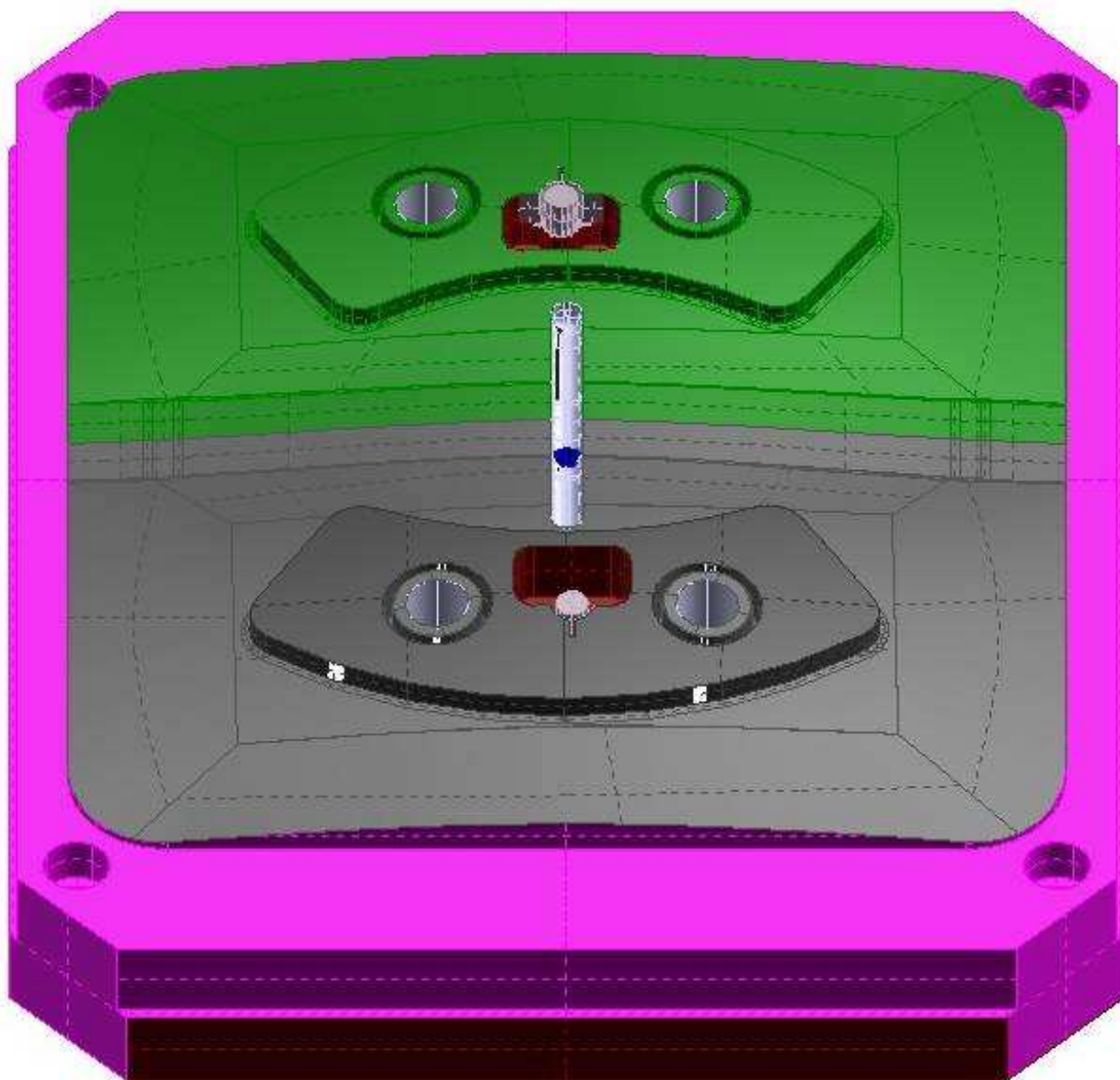
PŘÍLOHA č. 2

**Foto kompletně vyfrézované testovací desky včetně hliníkových
vloček (1. fáze experimentů)**



PŘÍLOHA č. 3

CAD model experimentální vstřikovací formy – vyhazovací strana (2. fáze experimentů)



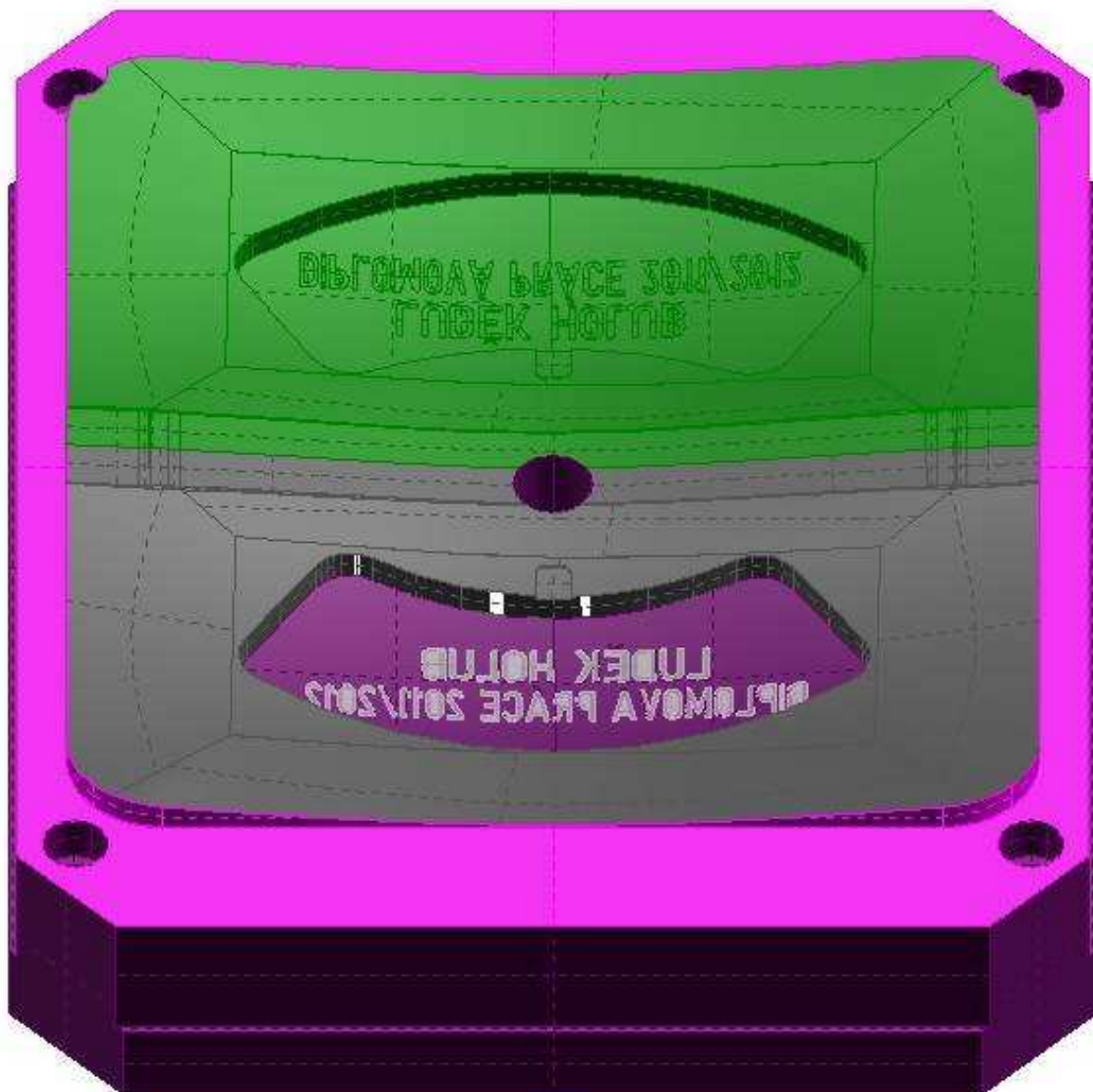
PŘÍLOHA č. 4

**Foto vyhazovací strany experimentální vstříkovací formy
(2. fáze experimentů)**



PŘÍLOHA č. 5

**CAD model experimentální vstřikovací formy – pohledová
strana (2. fáze experimentů)**



PŘÍLOHA č. 6

**Foto pohledové strany experimentální vstříkovací formy
(2. fáze experimentů)**



PŘÍLOHA č. 7

Technický list materiálu RAKU TOOL WB-1222

RAKU-TOOL® WB-1222

Board Material

Polyurethane Board for Tools and Molds

PC - Rev.-Status: 01- 2011/07/25

Page 1 of 2

Key Properties

- Very easily machined
- Good heat resistance
- High impact strength, good edge strength
- High abrasion resistance

Applications

- Pattern plates
- Core boxes
- Tooling jigs
- Hammer forms

Mechanical Properties

			WB-1222
Color	visual		Green
Density	ISO 1183	g/cm ³	1.22
Shore hardness D	ISO 868		75 – 85
Coefficient of thermal expansion	ISO 11359	10 ⁻⁵ K ⁻¹	80 – 85
Deflection temperature, HDT	ISO 75	°C	80 – 90
Compressive strength	ISO 604	MPa	60 – 70
Flexural strength	ISO 178	MPa	70 – 80

Processing

The product should have a temperature of 20°C – 25°C during processing.

Packaging

RAKU-TOOL® WB-1222	1000 x 500 x 30 mm
	1000 x 500 x 50 mm
	1000 x 500 x 75 mm
	1000 x 500 x 100 mm

Storage

The material should be stored flat and in a dry place. Temperature variations should be avoided during storage and transportation.

© RAMPF Tooling GmbH & Co. KG

RAKU-TOOL® WB-1222

Board Material

Polyurethane Board for Tools and Molds



RAMPF®
discover the future

PC - Rev.-Status: 01- 2011/07/25

Page 2 of 2

Handling Precautions

Good workplace ventilation is to be ensured during processing. At the same time, the employer's liability insurance association's industrial hygiene safety regulations regarding the handling of reaction resins and their hardeners are to be observed. Please take heed of the appropriate safety data sheets.

For information on adhesives and repair pastes see the corresponding individual technical data sheets.

RAMPF Tooling GmbH & Co. KG
Robert-Bosch-Str. 8-10 • D-72661 Grafenberg
T +49 (0) 7123 9342-1600
F +49 (0) 7123 9342-1666
E info@rampf-tooling.com

www.raku-tool.com

Our recommendations on the use of the material are based on many years of experience and current scientific and practical knowledge. They are, however, provided without any obligation on our part and do not relieve the buyer of the need for suitability tests. They do not constitute a legal relationship, nor are any protected third party rights whatsoever affected thereby.