



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## FRÉZOVÁNÍ KAPES V LETECKÝCH SLITINÁCH

CNC POCKET MILLING OF AERONAUTICAL ALLOYS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Wiecková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petra Ohništová

BRNO 2018

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	<b>Kateřina Wiecková</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petra Ohnišťová</b>
Akademický rok:	2017/18

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

## Frézování kapes v leteckých slitinách

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování technologie CNC frézování kapes pro letecký průmysl, obecný popis cyklů a interpolací pro frézování kapes, generování a optimalizace CNC programu, verifikace na konkrétní součásti.

### Cíle bakalářské práce:

1. Materiály pro letecký průmysl
2. Teoretický rozbor frézování
3. Návrh CNC programu pro frézování kapes v leteckých slitinách
4. Verifikace CNC programu

### Seznam doporučené literatury:

ROMERO, P. E. et al. Influence of Pocket Geometry and Tool Path Strategy in Pocket Milling of UNS A96063 Alloy. *Procedia Engineering*. 2013, 63, pp. 523-531.

SELVARAJ, P., RADHAKRISHNAN, P. Algorithm for Pocket Milling using Zig-zag Tool Path. *Defence Science Journal*. 2006, 52(2), pp. 117-127.

KIM, H.-C. Tool path modification for optimized pocket milling. *International Journal of Production Research*. 2007, 45(24), pp. 5715-5729.

OTKUR, M., LAZOGLU, I. Trochoidal milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, 47(9), pp. 1324-1332.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

**ABSTRAKT**

Cílem práce je generování a verifikace technologie frézování kapes v letecké slitině 7475-T7351 s ohledem na strojní čas a produktivitu obrábění. Součástí práce je nejprve teoretický rozbor cyklů frézování jednoduchých i komplexních kapes. Další část práce je zaměřena na návrh a optimalizaci strategií frézování jednoduchých i komplexních kapes v CAM programech a následné experimentální ověření zvoleného frézovacího cyklu.

**Klíčová slova**

letecký průmysl, hliníkové slitiny, titanové slitiny, frézování kapes, CAM

**ABSTRACT**

The aim of the work is to generate and verify pocket milling technology in aviation alloy 7475-T7351 with respect to machine time, surface and machining productivity. First part of the work is theoretical analysis of cycles of milling of simple and complex pockets. Next part of the work is focused on the design and optimization of strategy of milling of simple and complex pockets in CAM programs and its experimental verification.

**Key words**

aircraft industry, aluminium alloys, titanium alloys, pocket milling, CAM

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

WIECKOVÁ, Kateřina. *Frézování kapes v leteckých slitinách*. Brno 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 89 s. 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petra Ohnišřová.

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Frézování kapes v leteckých slitinách vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum.....  
Kateřina Wiecková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto své vedoucí Ing. Petře Ohnišřové za cenné připomínky, rady a podporu při vypracování bakalářské práce, dále panu prof. Ing. Miroslavovi Piškovi, CSc. za podporu a motivaci. Také děkuji panu Jiřímu Čechovi za jeho čas a pomoc při experimentech.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
ÚVOD.....	11
1 MATERIÁLY PRO LETECKÝ PRŮMYSL .....	12
1.1 Titan a jeho slitiny.....	13
1.1.1 Fyzikální vlastnosti .....	13
1.1.2 Chemické vlastnosti .....	13
1.1.3 Slitiny titanu.....	13
1.1.4 Mechanické vlastnosti.....	15
1.1.5 Technologické vlastnosti titanu .....	15
1.1.6 Využití titanu a jeho slitin v leteckém průmyslu .....	16
1.1.7 Výhody a nevýhody .....	16
1.2 Hliník a jeho slitiny.....	17
1.2.1 Fyzikální vlastnosti .....	17
1.2.2 Chemické vlastnosti a struktura.....	17
1.2.3 Slitiny hliníku .....	17
1.2.4 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin.....	19
1.2.5 Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin .....	19
1.2.6 Využití hliníku a jeho slitin v leteckém průmyslu.....	20
1.2.7 Výhody a nevýhody .....	21
2 TEORETICKÝ ROZBOR FRÉZOVÁNÍ .....	22
2.1 Stroje .....	22
2.1.1 Podle konstrukce.....	22
2.1.2 Podle osy vřetené .....	22
2.1.3 Podle řízení .....	23
2.2 Základní operace frézování .....	24
2.2.1 Frézování rovinných ploch .....	24
2.2.2 Frézování šikmých ploch .....	26
2.2.3 Frézování tvarových ploch.....	26
2.2.4 Frézování drážek.....	27
2.2.5 Frézování ozubených kol .....	28
2.2.6 Frézování závitů.....	28
2.3 Nástroje .....	29
2.3.1 Třídění nástrojů.....	29



2.3.2	Upínání nástrojů.....	30
2.3.3	Opotřebenění nástroje.....	30
2.4	Frézování kapes.....	32
2.4.1	Strategie řádkování .....	33
2.4.2	Kruhová interpolace.....	33
2.4.3	Konturování – spirálová strategie .....	34
2.4.4	Trochoidní frézování.....	35
2.4.5	Ponorné frézování .....	36
2.4.6	Způsoby zanořování nástroje do materiálu .....	37
2.4.7	Frézování rohů .....	38
2.4.8	Frézování rohů pro ponorné obrábění.....	38
3	<b>NÁVRH CNC PROGRAMU PRO FRÉZOVÁNÍ KAPES V LETECKÝCH SLITINÁCH .....</b>	<b>40</b>
3.1	Numerický řetězec .....	40
3.1.1	CAD systém .....	40
3.1.2	CAM systém .....	40
3.2	CNC programy pro jednoduché kapsy .....	42
3.2.1	Frézování válcovou frézou Aeromaster .....	43
3.2.2	Frézování monolitickou frézou JS453160E2R100.0Z3-HEMI.....	48
3.2.3	Frézování čelní frézou Plunge .....	52
3.2.4	Ponorné frézování .....	55
3.2.5	Dokončování .....	56
3.2.6	Porovnání všech strategií u jednoduché kapsy .....	58
3.3	CNC programy pro komplexní kapsy .....	59
3.3.1	Frézování válcovou frézou Aeromaster .....	60
3.3.2	Frézování monolitickou frézou JS453160E2R100.0Z3-HEMI.....	62
3.3.3	Porovnání všech strategií u komplexní kapsy.....	65
4	<b>VERIFIKACE CNC PROGRAMU .....</b>	<b>66</b>
4.1	Geometrie kapsy.....	66
4.2	Obráběný materiál .....	66
4.2.1	Mechanické vlastnosti slitiny 7475-T7351.....	66
4.3	Nástroj .....	67
4.3.1	Hrubování .....	67
4.3.2	Dokončování .....	68
4.4	Stroj.....	69
4.4.1	NC program pro hrubování.....	70

4.4.2	NC program pro dokončování .....	71
4.5	Průběh a vyhodnocení experimentu .....	73
4.5.1	Verifikace frézovací strategie – polotovar z umělého dřeva .....	73
4.5.2	Verifikace frézovací strategie – polotovar ze 7475-T7351 .....	74
5	ZÁVĚR .....	81
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	87
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

## ÚVOD

V leteckém průmyslu jsou, kvůli vysokým bezpečnostním standardům, kladeny vysoké nároky na kvalitu a přesnost vyráběných součástek [47].

S ohledem na váhové limity letadel v provozních podmínkách je mnoho součástek odlehčováno tak, aby byly zachovány jejich funkční vlastnosti, avšak objem materiálu byl co nejmenší. V případě součástek vyráběných konvenčními technologiemi frézování nebo soustružení je odebráno mnohdy až 90 % materiálu [48].

Letecké součástky jsou optimalizovány a odlehčovány pomocí kapes jednoduchých i komplexních tvarů s ohledem na koncentraci napětí a požadované mechanické vlastnosti. Při frézování kapes v primárních leteckých součástkách jako jsou panely křídel je z provozního hlediska nejdůležitějším prvkem kvalita obrobení ovlivňující mechanické a únavové vlastnosti. Z ekonomického hlediska je pak nejdůležitějším hlediskem produktivita obrábění [12, 42].

Tato práce vychází z teoretického rozboru frézovacích cyklů pro jednoduché a komplexní kapsy a je zaměřena na porovnání a optimalizaci dostupných frézovacích cyklů na reálné kapse spodního panelu křídla. Pro tuto práci byly doporučeny nástroje pro hrubování kapes firmou SECO tools.

## 1 MATERIÁLY PRO LETECKÝ PRŮMYSL

Nejvíce používané materiály v leteckém průmyslu jsou kompozitní materiály (viz. Obr. 1.1) a neželezné kovy. Z kovů jsou nejvíce zastoupeny slitiny hliníku, titanu a niklu.



Obr.1.1 Materiály používané v letounu Boeing 787 [1].

## 1.1 TITAN A JEHO SLITINY

Titan (viz Obr. 1.2) je chemický prvek, který se řadí mezi neušlechtilé kovy. Jedná se o devátý nejrozšířenější prvek v zemské kůře. Nejčastěji se vyskytuje v rudách, z nichž jsou nejdůležitější ilmenit  $\text{FeTiO}_3$ , rutil  $\text{TiO}_2$ , perovskit  $\text{CaTiO}_3$  a titanit  $\text{CaTiSiO}_5$ . Průmyslové procesy získávání titanu jsou složité a energeticky náročné. Nejčastěji se titan získává z chloridu  $\text{TiCl}_4$  pomocí Krollova procesu [9,75].



Obr. 1.2 Čistý titan [76].

### 1.1.1 Fyzikální vlastnosti

Titan je tvrdý, ale křehký prvek, který svou tvrdostí dosahuje stejné úrovně jako některé oceli. Jeho hlavní výhodou je měrná hmotnost, která je oproti zmíněným ocelím skoro o polovinu nižší. Titan není dobrým tepelným ani elektrickým vodičem [8].

Tab. 1.1 Fyzikální vlastnosti titanu [75].

Vlastnost	Hodnota
Hustota	4,506 g/cm <sup>3</sup>
Skupenství	pevné
Tvrdost (Mohsova stupnice tvrdosti)	6,0
Magnetické chování	paramagnetický
Teplota tání	1667,85 °C (1 941 K)
Teplota varu	3286,85 °C (3 560 K)
Barva	šedý až stříbřitě bílý
Elektrická a tepelná vodivost	nízká

### 1.1.2 Chemické vlastnosti

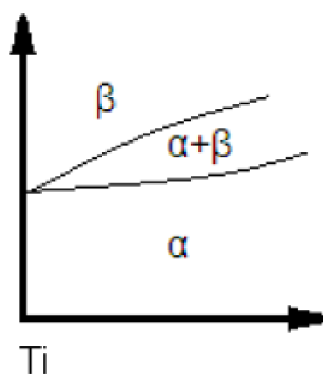
Při zvýšených teplotách je titan reaktivní s nekovy (např.: dusík, uhlík, křemík, halogeny), ale je velmi odolný vůči korozi (i elektrochemické). Pasivací titanu, vytvořením ochranné vrstvy na jeho povrchu, nejčastěji kyselinou dusičnou, dosahuje ještě lepších protikorozních vlastností, díky kterým odolává většině minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Je rozpustný v kyselině fluorovodíkové [8].

### 1.1.3 Slitiny titanu

Rozdělení titanových slitin se nejčastěji provádí podle jejich struktury, kterou mají v rovnovážném stavu, podle rozpustnosti přísad a jejich vlivu na stabilizaci dvou různých fází: alfa a beta. Největší vliv na vlastnosti titanových slitin mají kyslík, dusík, uhlík, vodík, železo a křemík. Přítomnost některých z nich může zvyšovat pevnost (O, N), mechanické vlastnosti (C), jiné mohou být spíše nežádoucí (H, Fe, Si) [2,6].

**Slitiny alfa**

Slitiny alfa (viz Obr. 1. 3), nejčastěji využívané v chemickém a strojním průmyslu, se vyznačují dobrou deformovatelností, velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Uhlík, hliník, dusík a kyslík pomáhají dosahovat vysoké strukturní stability. Tyto slitiny jsou obecně dobře svařitelné, jejich nevýhodou je omezená tvárnost za studena [3,5].



T

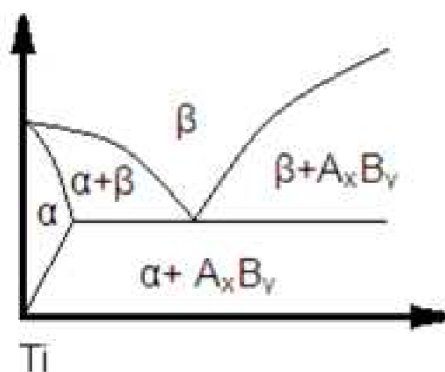
 $\alpha$  stabilizační

(Al,O,N,C)

Obr. 1.3 Diagram slitin alfa [48].

**Slitiny alfa a beta**

Slitiny alfa a beta (viz Obr. 1. 4), mají dobré mechanické vlastnosti, které se mění způsobem tváření a zpracování. Jejich hlavní vlastností je vysoká pevnost za normálních teplot. Pevnost je snižována rostoucí teplotou a nečistotami obsaženými ve slitině [5].



T

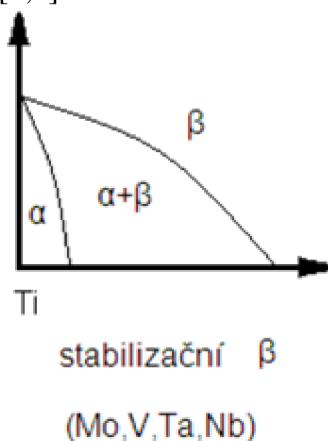
stabilizační  $\alpha + \beta$ 

(Fe,Mn,Cr,Co,Ni,Cu,Si,H)

Obr. 1.4 Diagram slitin alfa a beta [48].

### Slitiny beta

Slitiny skupiny beta (viz Obr. 1. 5), mají vysokou pevnost, houževnatost a jsou odolné proti únavě. Jsou dobře tvářitelné a svařitelné. Vznikají zvyšováním stabilizujících přísadových prvků do stavu, ve kterém se ve slitině nachází jen fáze  $\beta$ , jejich nevýhodou je zvyšování měrné hmotnosti titanu [4,5].



Obr. 1.5 Diagram slitin beta [48].

#### 1.1.4 Mechanické vlastnosti

Kyslík, uhlík a dusík značně ovlivňují mechanické vlastnosti titanu. Ty také závisí na obsahu nečistot a na pracovní teplotě. V porovnání s hliníkovými slitinami nebo ocelmi, vlastnosti titanu více závisejí na rychlostech zatěžování, které můžou zvyšovat pevnost a tvrdost. Faktorem, který naopak snižuje mez pevnosti je teplota, proto by měl být titan zatěžován za nižších teplot [7].

#### Pevnost

Ve srovnání s ostatními kovy patří titan do skupiny střední pevnosti, ale je možné ji zvýšit pomocí tepelného zpracování nebo tvářením za studena., také závisí na obsahu kyslíku, uhlíku, dusíku a železa, které pevnost snižují [2,8,13].

#### Tvrdost

Jedna z nejdůležitějších vlastností, kvůli které je titan vyhledáván, je jeho tvrdost. Na Mohsově stupnici se umísťuje na šestém místě. Tvořením sloučenin, například nitridu titanu, je možné vytvořit jednu z nejpevnějších látek, která dosahuje na Mohsově stupnici tvrdosti hodnoty 9-10 [8].

#### 1.1.5 Technologické vlastnosti titanu

##### Tvárnost

Tváření titanu závisí na jeho složení a způsobu deformace. Obecně je titan dobře tvárný za tepla, za studena je potřeba provádět žíhání, protože dochází k nežádoucímu zpevňování. Při tváření vzniká výrazná textura [3].

##### Obrobitelnost

Obrobitelnost je složitější než u ostatních kovů z důvodu zvýšené pevnosti, schopnosti pohlcovat kyslík a dusík při ohřevu v místě tvořící se třísky – absorpcí těchto látek se zřehčuje povrchová vrstva. Při obrábění titanu dochází k velice rychlému zpevňování povrchu, a to má za následek rychlejší tupení nástrojů. Dalším nežádoucím faktorem je

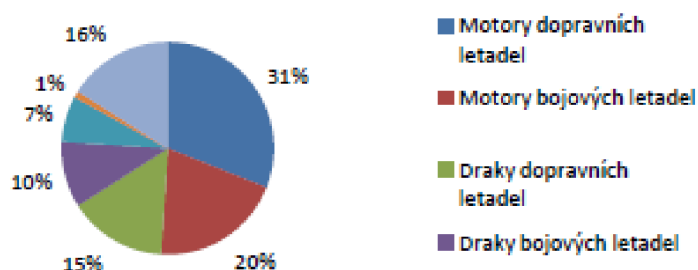
snadná vznětlivost titanového prachu. Při obrábění je potřeba intenzivněji ochlazovat, častěji ostřit nástroje a v ideálním případě používat stroje, které umožňují nižší rychlosti obrábění, aby nedocházelo k navařování třísek k nástroji (tvorbě tzv. nárůstku), způsobené adhezí materiálů a silným přehříváním povrchové vrstvy [2,7].

### Svařitelnost

U svařování titanu se vyskytuje problém s jeho reaktivitou na otevřeném vzduchu, dále také reaktivita s plyny, která znemožňuje svařování plamenem. Dalšími nepříznivými vlastnostmi, které brání dobré svařitelnosti, jsou i jeho některé fyzikální vlastnosti, například nízká tepelná vodivost a vysoká teplota tání. Pokud je v ochranné atmosféře nebo ve vakuu, tak je svařitelnost poměrně dobrá. V leteckém průmyslu se často užívá svařování plasmou, laserem nebo elektronovým paprskem [3,7].

### 1.1.6 Využití titanu a jeho slitin v leteckém průmyslu

Aplikace titanu v leteckém průmyslu je velmi rozšířená (viz Obr. 1.6), jediný kov, který je využívanější než titan je hliník.



Obr. 1.6 Aplikace titanu v průmyslu USA z roku 2005 [3].

### Slitina Ti-6Al-4V (alfa + beta)

Je nejrozšířenější slitinou titanu, která se v leteckém průmyslu využívá, a to až v objemu 80 % ze všech využívaných slitin titanu. Slitina je vhodná jak pro tváření, tak pro obrábění, vyznačuje se vynikající korozní odolností. Slitina Ti-6Al-4V se využívá na skříňe motorů, lopatky kompresorů i při výrobě Boeing 787 [3, 11].

### Slitina Ti-7Al-4Mo (alfa + beta)

Vyznačující se mimořádnou pevností. Její konkrétní využití je na odlitky vyžadující pevnost a stabilitu při vysokých teplotách [3].

### Slitina Ti-13V-11Cr-3Al (beta)

Je slitina s dobrou tažností, tvárností, výbornou korozivzdorností, a především velmi vysokou pevností, získanou pomocí vytvrzení stárnutím. Využívá se na výtuhy u konstrukcí draku [3, 4].

### 1.1.7 Výhody a nevýhody

Výhody a nevýhody titanu jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.2.

Tab. 1.2 Výhody a nevýhody titanových slitin [5, 7].

Výhody	Nevýhody
Nízká měrná hmotnost	Vysoce reaktivní při zvýšených teplotách
Výborná korozivzdornost	Vysoká cena materiálu
Vysoká měrná pevnost	



## 1.2 HLINÍK A JEHO SLITINY

Hliník (Obr. 1.7) je neušlechtilý, nepolymorfní kov krystalizující v soustavě FCC, označuje se značkou Al. Je to prvek, který se nachází na třetím místě v zastoupení na zemském povrchu, kde se nachází většinou ve sloučeninách. Získává se elektrolytickým rozkladem oxidu hlinitého, který je rozpuštěný v roztaveném kryolitu. Tento proces se nazývá Hallův-Héroultův postup. Oxid hlinitý je nejvíce zastoupený v minerálu, který se nazývá bauxit [8,10].



Obr. 1.7 Čistý hliník [1].

### 1.2.1 Fyzikální vlastnosti

Vyznačuje se nízkou měrnou hmotností. Je to měkký a kujný materiál [8].

Tab. 1.3 Fyzikální vlastnosti hliníku [12, 19].

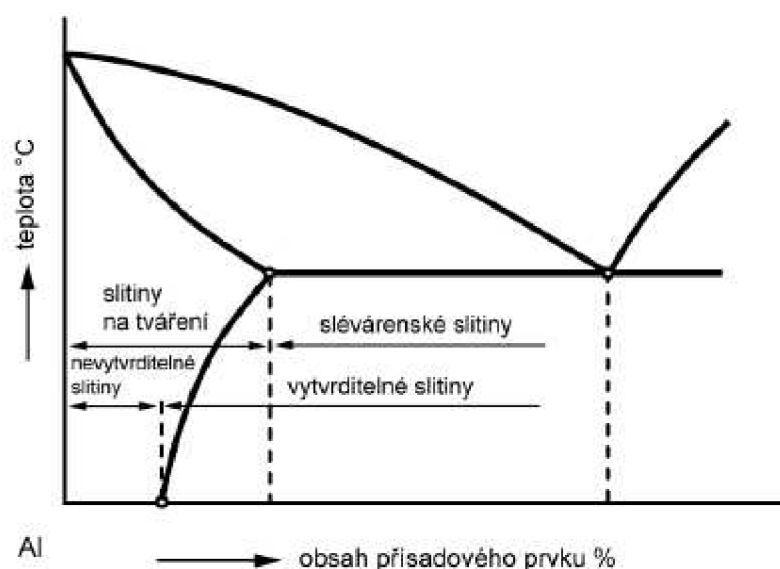
Vlastnost	Hodnota
Hustota	2700 kg/m <sup>3</sup>
Skupenství	Pevné
Tvrdość (Mohsova stupnice tvrdosti)	2,75
Magnetické chování	Paramagnetický
Teplota tání	660,32 °C (933,47 K)
Teplota varu	2 519 °C (2 792,15 K)
Barva	Bělavě šedá

### 1.2.2 Chemické vlastnosti a struktura

Hliník je vysoce reaktivní prvek. Při kontaktu s kyslíkem se na jeho povrchu vytváří vrstva oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) o tloušťce přibližně 10 nm, která zabraňuje další oxidaci hliníku a zajišťuje velmi dobrou odolnost proti vlivu okolního prostředí. Zředěné kyseliny i hydroxidy alkalických kovů kovový hliník rozpouštějí, ale koncentrovaná kyselina dusičná vytvoří pasivační vrstvu oxidu stejně jako kontakt s kyslíkem [8,11].

### 1.2.3 Slitiny hliníku

Hliník má nejdůležitější uplatnění ve formě slitin. Dělí se podle chemického složení dané polohou v rovnovážném diagramu odpovídající soustavy znázorněné na Obr. 1.8 (slitiny na tváření, slévárenské slitiny) nebo podle způsobu zpracování (nevytvrditelné a vytvrditelné slitiny) [9,15].



Obr. 1.8 Rozdělení slitin hliníku [11].

### Slitiny pro tvářeni

Slitiny pro tvářeni se dále dělí na nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi (Al-Mg, Al-Mn) a na slitiny s vyšší pevností a s horší odolností proti korozi v důsledku obsahu mědi (Al-Cu-Mg, Al-Cu-Ni). Nejznámější z této podskupiny jsou tzv. duraly- precipitačně vytvrzené slitiny, které dosahují velice dobrých pevností [9,16].

### Slitiny pro odlitky

Jedná se hlavně o slitiny Al-Si, takzvané siluminy. Tyto slitiny jsou určeny pro výrobu tvarových odlitků. Jejich slévatelnost závisí na mnoha faktorech, jako například na tepelné vodivosti, intervalu teplot tuhnutí nebo zabíhavosti. Aby byly dosaženy co nejlepší výsledky je potřeba do slitin přidávat větší množství legujících prvků. Slitiny pro odlitky většinou nedisponují příliš dobrou pevností (pevnost v tahu bývá 250 MPa) [11, 16].

Dále se dělí podle obsahu Si na podeutektické (4,5-10% Si), eutektické (10-13% Si) a nadeutektické (nad 13% Si) [16].

### Slitiny vytvrditelné (AlCu, AlMgSi, AlMgZn)

Vytvrditelnost je velmi ovlivněna přítomností hořčíku a mědi, prvků, které se podílejí na vzniku vytvrzujících fází. Aby byla slitina vytvrditelná, musí být tyto přísady správně koncentrovány. Samotné vytvrzování spočívá v tepelném zpracování- ohřátí na vyšší teploty (okolo 500°C) a následné rychlé ochlazení. Tento proces výrazně zvyšuje pevnost slitin, ale zároveň snižuje jejich tažnost [11,17].

### Slitiny nevytvrditelné (Al, AlMg, AlMn)

Tepelným zpracováním nelze zvýšit pevnost ani tvrdost. Pro dosažení lepších mechanických vlastností se tyto slitiny tváří za studena. Jejich výhodou je vysoká odolnost vůči korozi (neobsahují měď) [16,18].

#### 1.2.4 Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník má dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak za studena. Jeho hlavními výhodami jsou dobrá elektrická a tepelná vodivost, vysoká měrná tepelná kapacita, dobrá tvárnost za studena i za tepla a dobrá svařitelnost v ochranné atmosféře. Je velmi dobře kujný. Přidáním různých prvků (Mg, Cu, Li, Mn) se výrazně zvyšují jeho mechanické vlastnosti [11].

##### **Pevnost**

Přidáním příměsí se pevnost čistého hliníku může znásobit až 5x. Zvyšování pevnosti bývá na úkor korozivzdornosti (snižuje se přidáním mědi), která je jeho předností. Slitiny hliníku se dělí na nízkopevnostní a vysokopevnostní. Pevnost je tedy různá s různými přidávanými prvky. Nízká pevnost se objevuje u slitin Al-Mg a Al-Mn. Slitiny s vysokou pevností obsahují měď a hořčík. Pevnost se dá zvýšit i tepelným zpracováním, vytvrzováním [11,19].

##### **Tvrдость**

Hliník je měkký a dobře kujný kov. Tyto jeho vlastnosti způsobují obtíže při třiskovém obrábění. Tvrдость je možné zvýšit přidáním mědi, která ale sníží jeho korozivzdornost a tvárnost [20].

#### 1.2.5 Technologické vlastnosti hliníku a jeho slitin

##### **Tvárnost**

Díky tomu, že je hliník poměrně měkký kov, tak je velmi dobře tvářitelný jak za tepla, tak za studena. I ve slitinách je tato jeho vlastnost zachována a je jednou z jejich výhod [19].

##### **Svařitelnost**

Tvorba oxidační vrstvy je při svařování nežádoucí a je nutno ji předem odstranit. Proces odstranění je vzhledem k její odolnosti poměrně náročný. Používají se chemické, fyzikální i mechanické čisticí prostředky [18].

U svařování slitin hraje významnou roli, jedná-li se o slitinu vytvrditelnou, nebo nevytvrditelnou. Slitiny, které obsahují měď, bývají hůře svařitelné a mají sklon ke vzniku trhlin, naopak slitiny obsahující hořčík jsou velmi dobře svařitelné [9].

##### **Obrobitelnost**

Hliníkové slitiny, zejména ze skupiny vytvrditelných, patří mezi dobře obrobitelné materiály. V porovnání se stejně pevnými ocelmi, jsou řezné síly mnohem nižší. U nevytvrditelných slitin se vytváří velmi dlouhá a spojitá tříška, která musí být při obrábění odstraňována. K získání krátké a lámavé tříšky se do slitin přidává měď. Problémem je časté vytváření nárůstku na nástroji v důsledku adheze mezi nástrojem a obráběným materiálem. Nárůstek vzniká nalepováním/nařováním tříšky na nástroj vlivem vysoké teploty a tlaku. Tento jev vede ke snížení kvality obrobeneho materiálu a k rychlejšímu opotřebení [13,14].

Opatření proti tvorbě nárůstku jsou [22]:

- povlakování ke snížení tření,
- využití kladného úhlu čela nástroje,

- vhodná řezná kapalina,
- zvýšení řezné rychlosti,
- zvýšení rychlosti posuvu.

### 1.2.6 Využití hliníku a jeho slitin v leteckém průmyslu

Díky jeho nízké měrné hmotnosti, vysoké elektrické vodivosti a korozivzdornosti je hliník velice hojně využíván v mnoha odvětvích. Nejčastěji se s ním setkáváme v potravinářském, leteckém a automobilovém průmyslu. V leteckém průmyslu dosahují slitiny hliníku 70% konstrukční hmotnosti civilních letadel [15].

Tab. 1.4 Označení skupin slitin hliníku podle legujících prvků [47].

Označení	Popis
1000	Čistý hliník
2000	Nesvařitelné, vytvrditelné za tepla, dobrá pevnost; použití na komponenty; duralové slitiny (Al-Cu-Mg), - Dural
3000	Slitiny Al-Mn
5000	Svařitelné, nevytvrditelné
6000	Svařitelné (musí se ještě ale tepelně upravit), vytvrditelné za tepla. Slitiny Al-Mn-Si
7000	Svařitelné, vytvrditelné za tepla; slitiny Al-Zn-Mg
7075	Nejpevnější hliníková slitina legovaná zinkem

#### Slitina Al-Cu-Mg

Slitiny v této skupině dosahují vysoké pevnosti principem vytvrzování to hlavně pomocí přísad mědi a hořčíku. Nejznámější a nejpoužívanější ze slitin Al-Cu-Mg jsou duraly. Vyrábějí se z nich především dráty, profily, plechy a trubky [16]. Konkrétní příkladem je slitina 2027- slitiny, které obsahují zirkonium, dosahují velmi dobrého poměru pevnosti a houževnatosti. Jejich hlavní využití je na výztuže u konstrukcí křídel letadel [12].

#### Slitina Al-Cu-Li

Přidáním lithia do slitin se dosahuje ještě nižší měrné hmotnosti a zvýšení vyššího modulu pružnosti v tahu. Vyvíjení takového druhu slitin je zejména ve snaze o snížení hmotnosti součástek v leteckém průmyslu [9]. Příkladem slitiny ze skupiny Al-Cu-Li je slitina 2098, která je vyvinuta speciálně pro letecký průmysl, tak aby poskytovala dobrý poměr vysoké pevnosti, nízké hustoty, únavové odolnosti a lomové houževnatosti. Využívá se zejména pro trupy letounů [12].

#### Slitina Al-Mg-Si

Slitina křemíku, hořčíku a hliníku dává materiálu vyšší pevnost, tvárnost a korozivzdornost. Oproti duralům jsou sice stále méně pevné, ale zato jsou vhodné i ke svařování. Tyto slitiny se využívají zejména v letectví a stavebnictví. Například slitina 6156, která se využívá i ke svařování, má dobrou pevnost a vysokou odolnost proti porušení. Její využití je především na plechy na spodní části trupu letounů [5, 9, 21].

#### Slitina Al-Zn-Mg

Slitiny, které vyžadují vysokou odolnost proti korozi. Jedná se o nejpevnější hliníkové slitiny a to díky příměsím hořčíku a zinku. V důsledku jejich vysokých pevností se

využívají na namáhané součásti v leteckém a automobilovém průmyslu. Používají se na odlitky a jsou dobře svařitelné. Například slitina 7475 se využívá pro výrobu desek a plechů, které jsou určeny pro součásti značně ohrožené únavovým lomem u vysoce výkonných letounů. Mohou to být potahy trupu a křidel, vzpěry křidel, přepážky trupu [9, 12].

### 1.2.7 Výhody a nevýhody

Výhody a nevýhody hliníkových slitin jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.5.

Tab. 1.5 Výhody a nevýhody hliníkových slitin [14, 19].

Výhody	Nevýhody
Nízká měrná hmotnost	Nízká tvrdost
Dobrá korozivzdornost proti kyselému prostředí	Špatná korozivzdornost proti alkalickým látkám
Dobrá svařitelnost	Obtížné třískové obrábění
Dobrá tepelná a elektrická vodivost	

## 2 TEORETICKÝ ROZBOR FRÉZOVÁNÍ

Frézování je jedním ze způsobů třískového obrábění vícebřítým nástrojem. Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho fréza, vedlejší pohyb posuvový vykonává nástroj nebo součást. Řezný proces je přerušovaný, protože nástroje tvoří více zubů, které postupně obrábějí materiál a tvoří krátkou drobivou třísku [47].

### 2.1 Stroje

První frézky byly zkonstruovány koncem 18. století. Z jednoduchých konstrukcí s použitím dřevěných stolů se vyvinuly numericky řízené stroje, které jsou schopny pracovat v pěti osách.

#### 2.1.1 Podle konstrukce

Podle konstrukce se frézky dělí na konzolové (viz Obr. 2.1), rovinné, nástrojářské, portálové, odvalovací, na závity a speciální frézky [33].



Obr. 2.1 Konzolová frézka [53].

#### 2.1.2 Podle osy vřetene

Podle osy vřetene se frézky dělí na horizontální, vertikální a univerzální (viz Obr. 2.2). S vývojem a změnami požadavků se toto dělení rozrůstá a vznikají frézovací centra, která jsou funkčně přizpůsobena daným operacím. Parametry, které hrají roli v dalším zdokonalování strojů, jsou snižování strojního času, menší počet zařízení potřebných k dokončení součásti, větší rozměry strojů a to vše při zachování co nejnižších nákladů [33].



Obr. 2. 2 Univerzální frézka [54].

### 2.1.3 Podle řízení

Podle řízení se dělí frézky ještě do tří dalších skupin: ručně řízené, ručně řízené s číselným řízením (NC numeric control) a nejčastěji využívané, počítačem řízené (CNC computer numeric control).

#### CNC obráběcí centra

Jedná se o počítačem řízené stroje (Obr. 2.3), které pracují podle předem připravených CAD/CAM programů. Každý z těchto programů má možnost vytvoření vizuální simulace obrábění, které bude probíhat i na CNC stroji, což umožňuje porovnávání různých strategií obrábění a jejich optimalizace. Programátor vytvoří CAD/CAM program, optimalizuje ho a pomocí postprocesuru vygeneruje program pro daný CNC stroj [50].

Optimalizací programu je možné snížit strojní čas až o 40% při zachování stejných posuvů [47].

Tato centra mohou být tři až pět osá. Osy posuvů jsou X, Y (radiální posuvy), Z (axiální posuv) a osy rotační A-kolem osy X, B-kolem osy Y, C-kolem osy Z. Rotační pohyb vykonává stůl nebo vřeteno stroje. CNC stroje se využívají hlavně pro obrábění tvarově složitějších součástí, kde jsou vysoké požadavky na přesnost. Přesnost dosahovaná CNC stroji je od 0,01 při normálním obrábění po 0,00001mm u CNC strojů pro speciální aplikace [35,50].

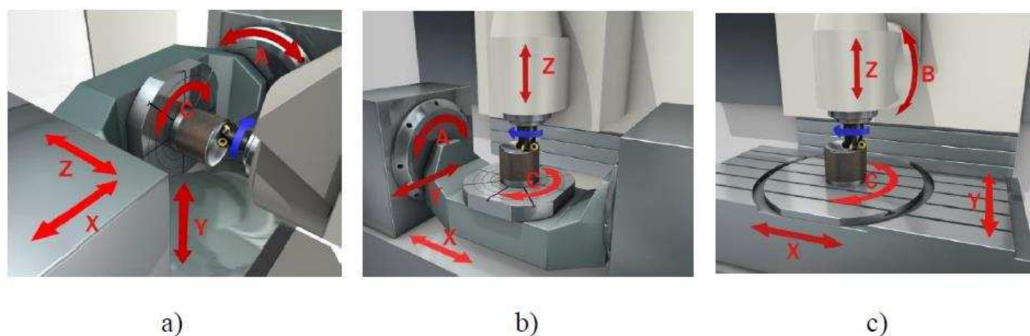


Obr. 2. 3 CNC obráběcí centrum [55].

Výhody a nevýhody obráběcích center jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Výhody a nevýhody CNC obráběcích center [22].

Výhody	Nevýhody
Obrábění komplexních součástí	Vysoká pořizovací cena
Snížení strojního času	Vysoká cena údržby
Větší produktivita	
Vyšší řezné podmínky	



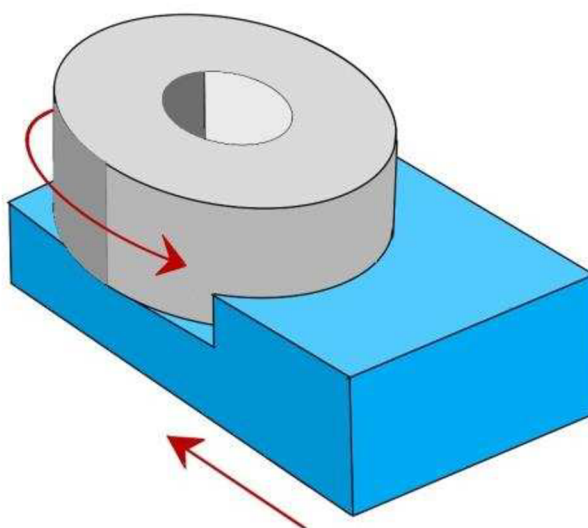
Obr. 2.4 Rozložení pohybů CNC obráběcího centra [22]: a) horizontální obráběcí centrum pětiosé, b) vertikální obráběcí centrum s pátou osou A, c) vertikální obráběcí centrum s pátou osou B.

## 2.2 Základní operace frézování

### 2.2.1 Frézování rovinných ploch

#### Frézování rovinných ploch čelními frézami

Osa frézy je při čelním frézování kolmá k obráběné ploše (Obr. 2.5). Čelní frézování se nejčastěji využívá k rovinnému obrábění. Čelní frézování se dělí na symetrické a nesymetrické. Nástroje používané pro čelní frézování jsou válcové čelní frézy, u kterých dochází k dělení třísky břity na obvodu i částečně na čele frézy, které obráběný povrch vyhlazují. Zatížení stroje je během obrábění stálé a nedochází k vibracím. Tloušťka třísky se postupně zvětšuje od vstupu břitu frézy ke středu odřezávané vrstvy, a naopak zmenšuje od středu k místu výstupu břitu [36, 70].

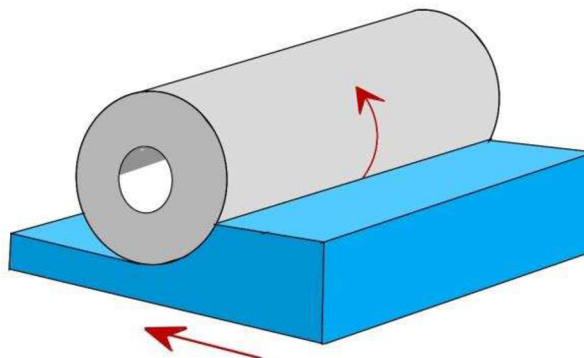


Obr. 2.5 Čelní frézování.



### Frézování rovinných ploch válcovými frézami

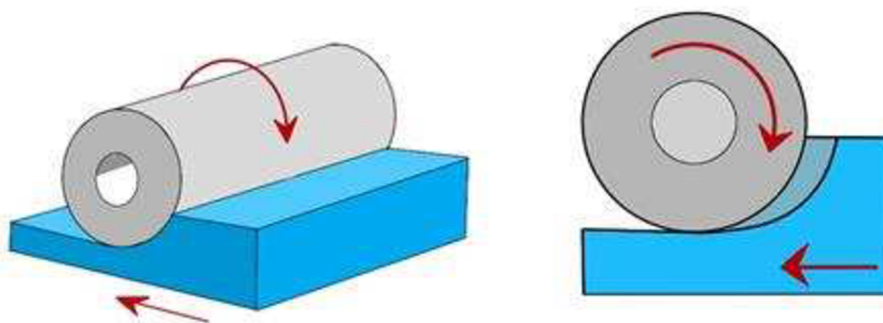
Osa nástroje je při frézování rovinných ploch válcovými frézami rovnoběžná s obráběnou plochou (Obr. 2.6). Materiál je obráběn pouze břity na obvodu nástroje. Zatížení je nerovnoměrné a vznikají vibrace, v důsledku čehož je ovlivněna kvalita povrchu. Průběh vytváření třísky závisí na smyslu otáčení frézy ke směru posuvu obrobku. Rozeznáváme dva způsoby frézování: sousledné a nesousledné frézování [36, 70].



Obr. 2.6 Válcové frézování.

### Sousledné frézování

Obráběcí nástroj se pohybuje souhlasně se směrem otáčení frézy (Obr. 2.7). Při zahájení řezu se zuby frézy zařezávají do obráběné vrstvy a průřez třísky je maximální. Průřez třísky se v průběhu záběru jednoho zubu snižuje až do momentu, kdy je průřez třísky nulový. Je potřeba více zubů v záběru, aby se zabránilo vibracím. Řezné síly přitlačují obrobek ke stolu [24].



Obr. 2.7 Sousledné frézování.

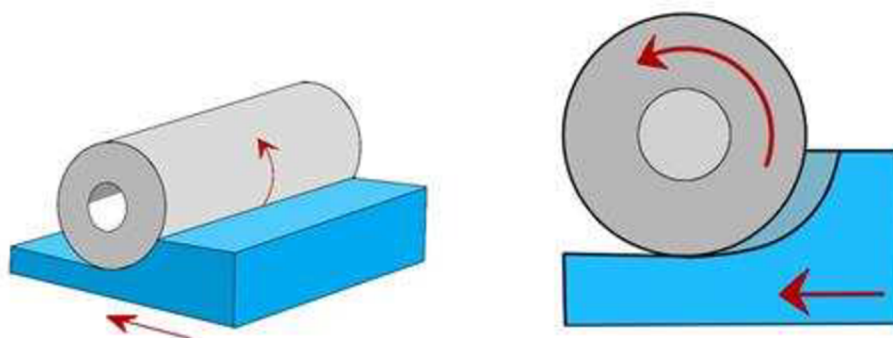
Tab 2. 2 Výhody a nevýhody sousledného frézování [35].

Výhody	Nevýhody
Vyšší kvalita obrobené plochy	Přesné seřízení stroje
Větší životnost nástroje	Rázy
Větší produktivita	

### Nesousledné frézování

Nástroj se při nesousledném frézování pohybuje nesouhlasně se směrem otáčení frézy (Obr. 2.8). Průřez třísky se zvětšuje od nulové hodnoty po maximální hodnotu. Při nesousledném frézování dochází zpočátku, kvůli vlivu pružným deformacím obráběného materiálu, k tření hřbetu po obráběném povrchu vedoucí k zahřívání a otupování nástroje.

Plocha obrobku může být tímto působením zpevňována, avšak může být ovlivněna kvalita obrobené vrstvy. Řezné síly působí proti silám upínacím a zvedají obrobek [24].



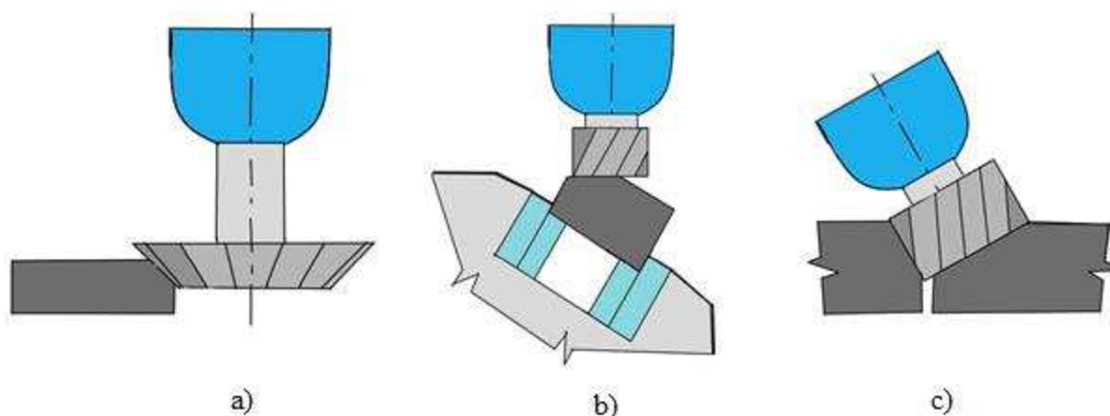
Obr. 2.8 Nesousledné frézování.

Tab 2. 3 Výhody a nevýhody nesousledného frézování [35].

Výhody	Nevýhody
Větší produktivita	Horší kvalita povrchu
Při značné diversitě velikostí požadavků na obrábění	Větší hlučnost
	Větší odpor při zařezávání

### 2.2.2 Frézování šikmých ploch

Frézování šikmých ploch se provádí tvarovou frézou, která má šikmou řeznou plochu hlavy v požadovaném úhlu (Obr. 2.9 a)), dále natočením obrobku (Obr. 2.9 b)) anebo natočením frézovací hlavy (Obr. 2.9 c)).

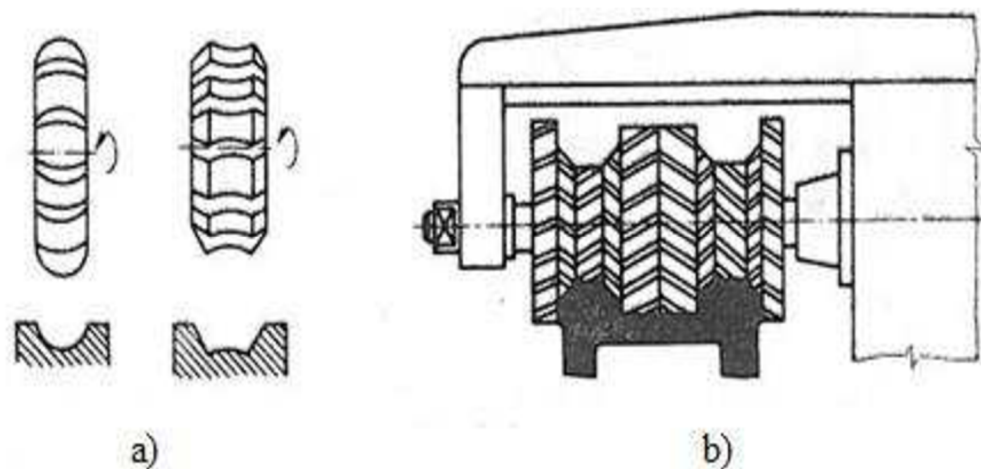


Obr. 2.9 Frézování šikmých ploch pomocí: a) frézy se šikmou řeznou plochou hlavy, b) natočením obrobku, c) natočením frézovací hlavy.

### 2.2.3 Frézování tvarových ploch

Frézování tvarových ploch může být provedeno různými způsoby: podle orýsování, tvarovými frézami, pomocí otočného stolu, kopírováním nebo pomocí NC a CNC techniky. Způsob podle orýsování se používá při kusové výrobě a spočívá v manuálním obrábění pracovníka. Obrábění tvarovými frézami (Obr. 2.10 b)) spočívá v sestavení jednoduchých tvarových fréz tak, aby vytvořily požadovaný profil (nebo jsou jednoduché frézy vytvarované do požadovaného tvaru (Obr. 2.10 a)). Pomocí otočného stolu se frézují tvarové plochy určené středovým úhlem. Kopírováním se získává tvar frézované plochy kopírováním šablony. Na

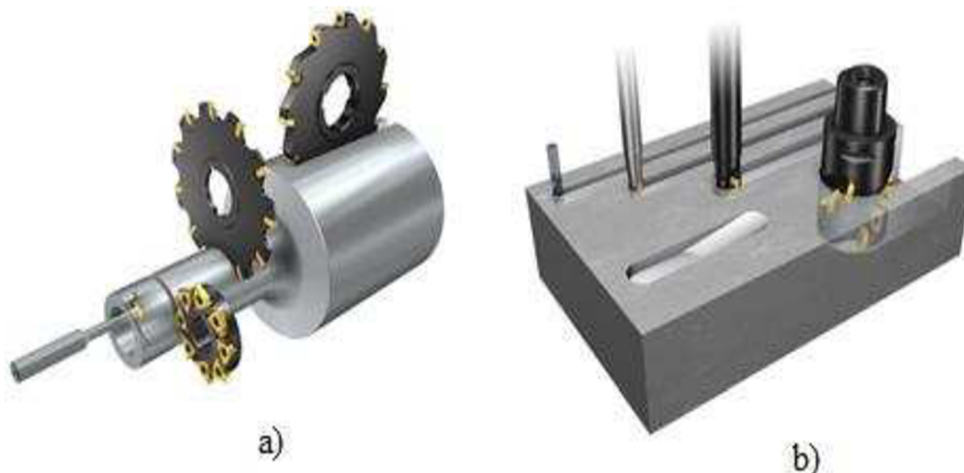
NC a CNC strojích, kde mohou být obráběny ve více osách (závisí na možnostech řídicího systému) [36, 71].



Obr. 2.10 Druhy frézování tvarových ploch: a) jednoduché tvarové frézy, b) frézování tvarové plochy složenými frézami [36].

#### 2.2.4 Frézování drážek

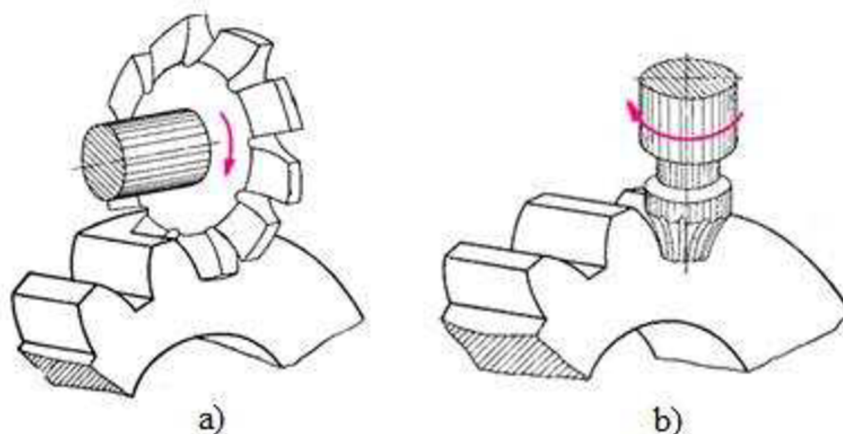
Frézování drážek se může provádět pomocí kotoučových fréz (Obr. 2. 11 a)) nebo pomocí stopkových fréz (Obr. 2. 11 b)) [32].



Obr. 2. 11 Frézování drážek: a) kotoučovými frézami b) stopkovými frézami [32].

### 2.2.5 Frézování ozubených kol

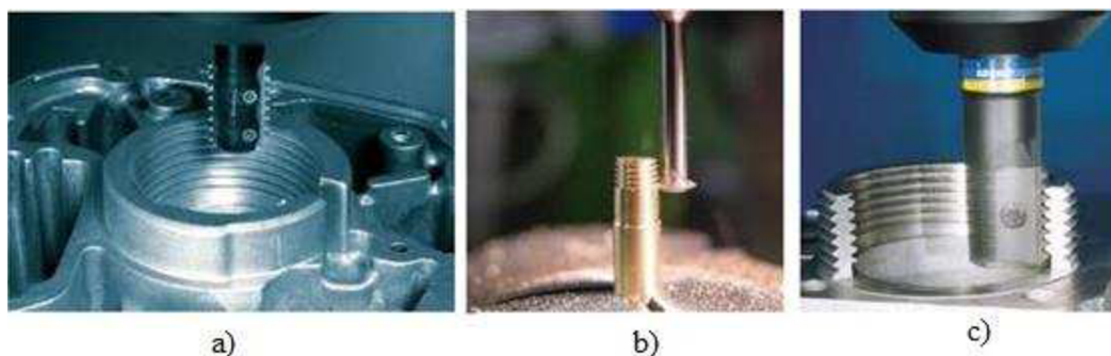
Frézování ozubených kol se dělí na frézování tvarovými nástroji dělicí metodou (profilovými frézami) a to kotoučovými frézami (modulové) viz Obr. 2. 12 a) a stopkovými profilovými frézami (palcové) jak je znázorněno na obrázku 2. 12 b), odvalováním, obrážením nebo hoblováním [56].



Obr. 2. 12 Frézování ozubených kol a) kotoučovými frézami (modulové), b) stopkovými profilovými frézami (palcové) [56].

### 2.2.6 Frézování závitů

Frézování závitů se dělí na frézování pomocí kotoučových fréz nebo pomocí stopkových a hřebenových fréz a to frézování závitovou frézou (Obr. 2. 13 a)), frézování frézou s jedním plátkem ve tvaru profilu závitu (Obr. 2. 13 b)), frézování závitovým hřebínkem (Obr. 2. 13 c)) [57].



Obr. 2. 13 Frézování závitů: a) frézování závitovou frézou, b) frézování frézou s jedním plátkem ve tvaru profilu závitu, c) frézování závitovým hřebínkem [57].

## 2.3 Nástroje

K frézování se používají nástroje zvané frézy. Jedná se vícebřité rotační nástroje, které se dělí podle různých parametrů [22].

### 2.3.1 Třídění nástrojů

Nástroje se dělí podle [23,25,32]:

#### Umístění zubů:

Podle umístění zubů se frézy dělí na válcové, čelní, kombinované, kuželové, úhlové, tvarové, speciální.

#### Materiály břitů:

Břity se vyrábí z rychlořezných ocelí, slinutý karbid, cermety, řezná keramika, polykrystalický kubický nitrid boru, polykrystalický diamant.

#### Výroba břitů:

Břity fréz mohou být frézované, pod soustružené nebo lité.

#### Počet břitů:

Počet zubů by měl být takový, aby byly v záběru nejméně dva zuby, čímž se dosáhne klidného chodu frézy. Existuje dělení na jemnozubé, polo hrubozubé a hrubozubé.

#### Průběh ostří:

Ostří může mít přímé zuby- rovnoběžně s osou nástroje, nebo zuby na šroubovici.

#### Smysl otáčení (obr):

Podle smyslu otáčení se frézy dělí na pravořezné a levořezné.

#### Konstrukční uspořádání:

Nástroje mohou být celistvé (Obr. 2.14 a)), celé těleso i zuby jsou z jednoho materiálu, a to rychlořezné oceli nebo slinutého karbidu, s vloženými noži, s vyměnitelnými břitovými destičkami (Obr. 2.14 b)), které jsou mechanicky upínané a dosahují vysokých řezných rychlostí.



Obr. 2.14 Konstrukční uspořádání: a) celistvé, b) s vyměnitelnými břitovými destičkami [58, 59].

### **2.3.2 Upínání nástrojů**

Upínání nástrojů může být nástrčné, se stopkou, která může být kuželová nebo válcová. Nástroje se upínají mechanicky, hydraulicky nebo tepelně [30].

### **2.3.3 Opotřebení nástroje**

#### **Abraze**

Postupné mechanické narušování tvrdými složkami obráběného materiálu, které obrušují povrch břitu (Obr. 2. 15 a)) [61, 62].

#### **Adheze**

Opotřebení nástroje adhezí probíhá vytvářením nárůstku mezi břitem a třískou. Za vysokých tlaků se vytváří mikrosvary na břitu nástroje, které se při dalším obrábění odtrhávají i s částicemi materiálu nástroje (Obr. 2. 15 c), d)) [32, 60].

#### **Difúze a oxidace**

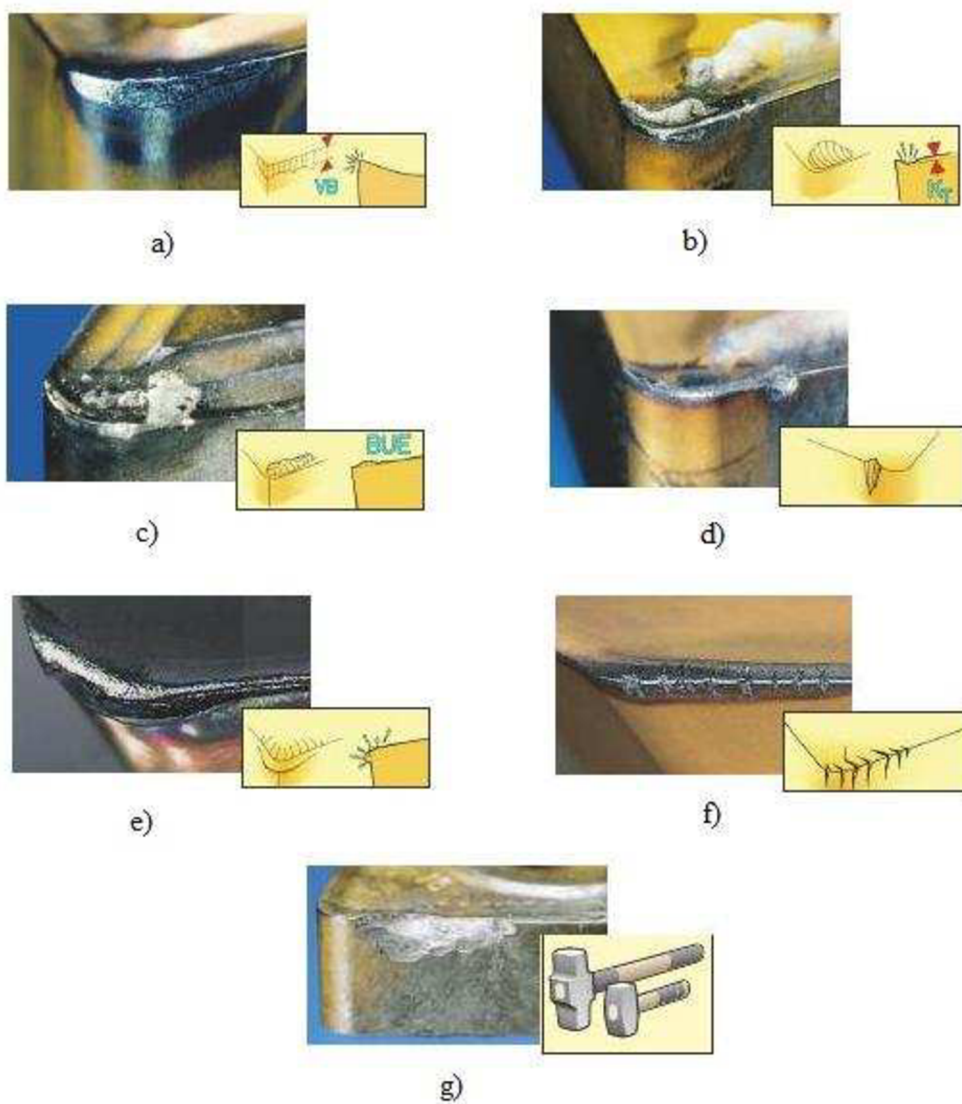
Jedná se o chemický vliv na proces obrábění. Při vysokých rezných teplotách se vytvoří ve styku čela nástroje a třísky tenká tekutá fáze, která je unášena třískou a tím může docházet k vymílání čela nástroje (Obr. 2. 15 b)) [32, 61].

#### **Plastická deformace povrchových vrstev břitu**

Plastická deformace probíhá při vysokých tepelných a mechanických zatíženích, které jsou kumulované v čase (Obr. 2. 15 e)) [32].

#### **Narušení ostří křehkými lomy**

Vzniká vlivem kolísání teplot a vysokým mechanickým zatížením (Obr. 2. 15 g)) [32, 61].

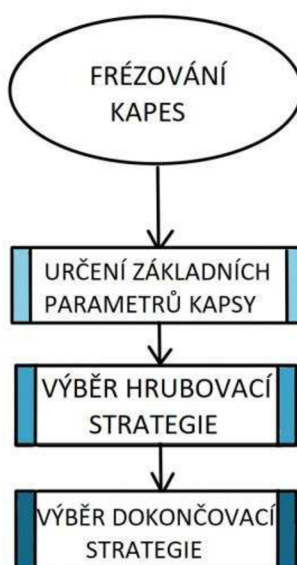


Obr. 2. 15 Opatřebení nástroje: a) abrazi, b) difúzi, c) oxidací d) lom e) adhezi [32].

## 2.4 Frézování kapes

Frézování jednoduchých nebo komplexních kapes je realizováno za účelem odlehčení součástek a je optimalizováno s ohledem na požadované mechanické vlastnosti dané součástky.

V této části práce jsou uvedeny základní možnosti frézování kapes v dostupných CAM systémech. Mezi konvenční technologie frézování kapes jsou strategie řádkování a konturování. Dále však existují speciální strategie frézování uzavřených i otevřených kapes. Výběr optimální strategie na závislí na druhu obráběného materiálu, základní geometrii kapsy a požadované produktivitě obrábění (Obr. 2.16). Základní přehled strategií frézování kapes je uveden níže v této kapitole.



Obr. 2.16 Postup výběru obráběcích strategií.

Některé strategie se výrazně liší až při komplexních tvarech kapes, kde se mohou objevit podstatné rozdíly ve strojním čase, kvalitě obroběného povrchu nebo produktivitě obrábění. Požadavek je kladen na úběr co možná nejvíce materiálu, za co nejkratší čas s co nejvyšší přesností [26].

Mezi základní strategie patří řádkování, kruhová interpolace, trochoidní frézování a ponorné frézování. Každá strategie je charakterizována základními pohyby nástroje, přípravami před zahájením obrábění (předvrtání díry, speciální úhel při zahloubení a další) nebo v produktivitě (produktivní a neproduktivní pohyby nástroje) [47, 51].



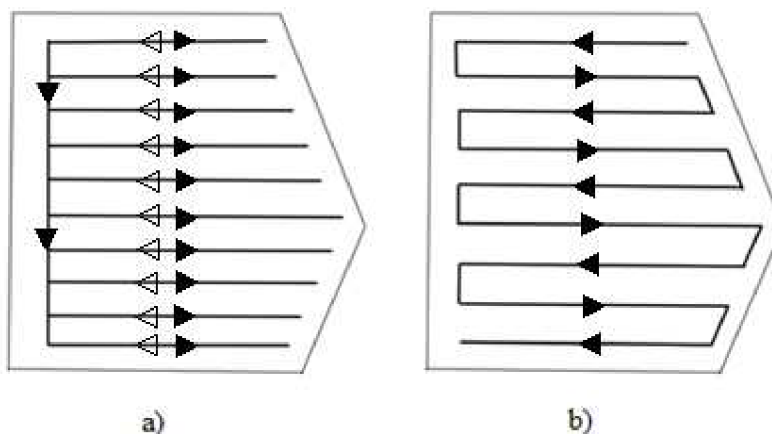
### 2.4.1 Strategie řádkováním

Jednou z nejběžněji využívaných strategií je řádkování neboli zig zag. Jedná se o vytvoření lineárních rovnoběžných drah v dutině obráběné kapsy.

Řádkování může být jednosměrné (Obr.: 2.16 a)), kdy nástroj obrobí řádek a stejnou trajektorií se vrátí zpět, posune se o daný krok a tento pohyb opakuje. Tato metoda se využívá u tvrdých materiálů, kde není vhodné, aby nástroj byl v záběru po celou dobu obrábění, protože vzniká příliš velké zatížení a mohl by se jednodušeji poškodit. Nevýhodou této strategie je vykonávaný neproduktivní pohyb přejíždění nástroje, který prodlužuje strojní čas [27].

Druhou možností je obrábění oboustranně (Obr.: 2.16 b)). Nástroj nevykonává neproduktivní pohyb, ale je stále v záběru. Problematickými body je změna trajektorie nástroje při otáčení, kdy dochází ke zvyšování namáhání nástroje, proto je potřeba co nejlépe optimalizovat dráhu nástroje [27].

Metoda zig-zag je, i přes inovace jiných strategií, stále jednou z nejučinnějších strategií frézování kapes [28].



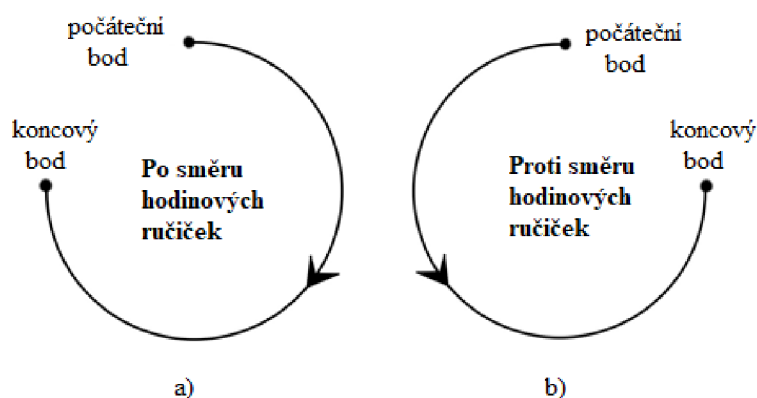
Obr. 2. 17 Strategie řádkování: a) jednosměrné, b) oboustranně.

Tab. 2.4 Výhody a nevýhody strategie zig-zag [27,28].

Výhody	Nevýhody
Produktivita	Potřeba dokončování
Dobrá kvalita obrobeného povrchu	Vyšší řezné síly
Efektivní obrábění	

### 2.4.2 Kruhová interpolace

Kruhová interpolace spočívá v pohybu nástroje po kruhových trajektoriích. Tato metoda se nejčastěji využívá při obrábění kapes s kruhovým tvarem. U ostatních tvarů dochází ke zvyšování počtu neproduktivních posuvů v místech, kdy musí nástroj vyjízďet z materiálu, protože dosáhl okraje dané kapsy. Aby mohl sledovat kruhovou interpolaci, musí část trajektorie kruhu opsat nad obrobkem a následně se znovu zanořit a pokračovat v obrábění, dokud nedosáhne dalšího okraje kapsy. Tato metoda může být rozdělena do dvou kategorií, které definují směr kruhové trajektorie: po směru hodinových ručiček nebo v proti směru. Počáteční bod může být umístěn ve středu kapsy, nebo na jejím okraji [51].



Obr. 2. 18 Kruhová interpolace: a) po směru hodinových ručiček, b) proti směru hodinových ručiček [51].

Tab. 2.5 Výhody a nevýhody kruhové interpolace [51].

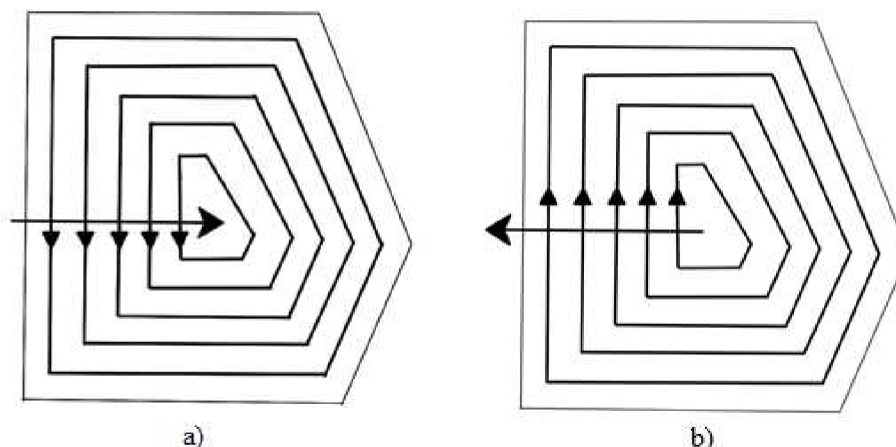
Výhody	Nevýhody
Produktivita	Nevhodné pro komplexnější tvary kapes
Vhodné pro kruhové kapsy	

### 2.4.3 Konturování – spirálová strategie

Jedná se o jednu z nejčastěji využívaných metod, která se objevuje předdefinovaná ve skoro každém CAM programu. Strategie konturování spočívá ve vytvoření paralelních drah, které kopírují formu dané kapsy, proto je vhodná pro komplexní tvar kapes [26].

Tento druh strategie se rozděluje se na spirály s trajektorií dovnitř a ven. Vzdálenost mezi jednotlivými drahami se určuje parametrem kroku. Většinou se volí krok, který se pohybuje v rozmezí 20-75 % průměru nástroje. Krok mezi jednotlivými hladinami se volí tak, aby se lišil a nástroj nebyl ve styku s materiálem stále ve stejném místě [41,42].

Výhody této metody se projeví zejména u komplexnějších kapes a dutin, kde ušetří strojní čas tím, že nástroj nevykonává žádný neproduktivní pohyb, ale sleduje trajektorii danou konturováním tvaru kapsy a je stále v záběru [40].



Obr. 2.19 Konturování: a) po spirále dovnitř, b) po spirále ven [51].

Tab. 2.6 Výhody a nevýhody konturování [1,41].

Výhody	Nevýhody
Přirozeně se zabývá změnou topologie povrchu	Mění se průřez odebírané třísky (s tím souvisí proměnný řezný odpor)
Přesná metoda	Špatný odvod třísek
Kratší doba obrábění	

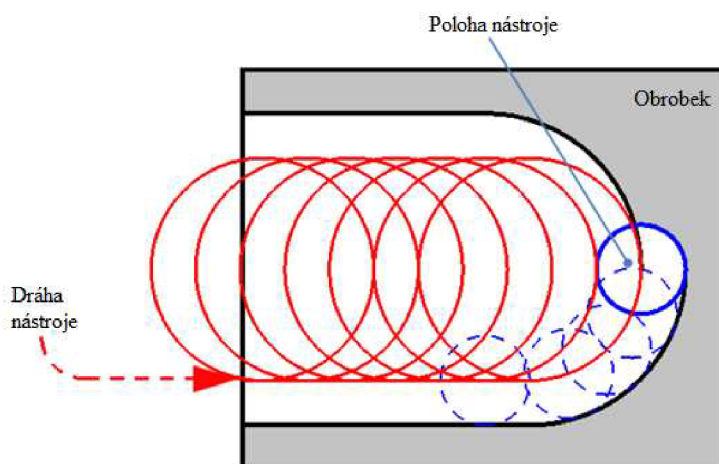
#### 2.4.4 Trochoidní frézování

Trochoidní frézování spočívá v přemísťování nástroje po trochoidní trajektorii. Trochoida je geometrická křivka, která je vytvořena bodem na kruhu, jenž rotuje a jehož střed se zároveň pohybuje [31].

Při trochoidním frézování se využívá minimální úhel záběru nástroje (úhel opásání) a tím se snižuje velikost řezné síly, které dosáhnou jejich maxima během krátkého času, což příznivě působí na zmírnění globálního opotřebení nástroje a na zvýšení účinnosti obrábění. Vzhledem k redukovaným řezným silám může být posuvová rychlost řezného nástroje zvýšena. Často bývá využita celá délka břitu nástroje, a tudíž může trochoidní frézování eliminovat potřebu frézování ve více vrstvách, hloubkách. Zvýšené provozní parametry a snížený počet průchodů výrazně zkracují čas cyklu [30,31,37].

Tato metoda se nejčastěji využívá pro frézování otevřených kapes ve tvrdých materiálech, ve kterých je výhodnější, aby nástroj nebyl po celou dobu v záběru, aby nedocházelo k příliš velkému namáhání, které by ho mohlo poškodit [30].

Trochoidní strategie umožňuje snížit spotřebovaný výkon a díky tomu je možné ji využívat i na strojích, které mají nižší nebo průměrný výkon [37].



Obr. 2.20 Trochoidní frézování [51].

Tab. 2.7 Výhody a nevýhody kruhové strategie [30,31,37].

Výhody	Nevýhody
Nižší řezné síly	Riziko zlomení nástroje
Nižší teplota	
Vyšší přesnost obrábění	
Redukce času kontaktu nástroje a obrobku	
Jeden nástroj pro různé velikosti otvorů	

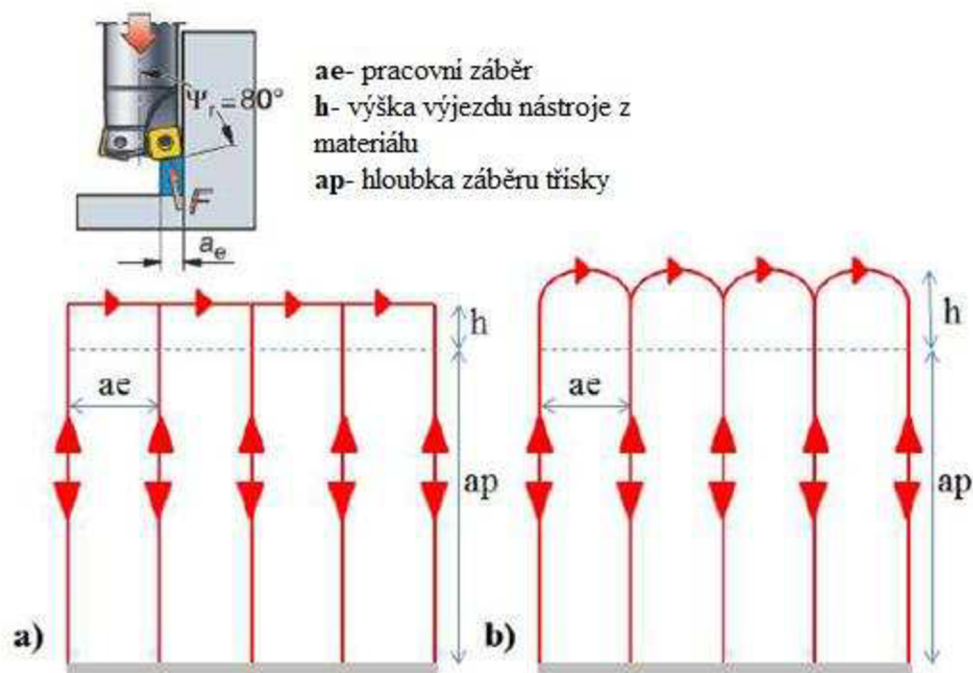
### 2.4.5 Ponorné frézování

Ponorné frézování se nejvíce využívá při obrábění hlubokých kapes nebo drážek. Pohyb nástroje spočívá ve vytváření série ponorných vrtů, jejichž osy jsou dostatečně blízko a jednotlivé vrty se překrývají. Postupným odvrtáváním se získá požadovaná geometrie kapsy [42].

Tento typ obrábění se odlišuje od ostatních strategií tím, že používá čelo nástroje místo jeho obvodu, což umožňuje zredukovat vibrace a ohyb nástroje, ale vyžaduje předvrtání počáteční díry jiným nástrojem, a tudíž zvyšování neproduktivního času výměnou nástrojů [26,43].

Nevýhodou této metody jsou neproduktivní pohyby nástroje mezi obrábění, které je možné upravit správnou optimalizací (Obr. 2.20 a) a b)) [26].

Problémem této metody je odvod třísky z místa řezu, zejména při ponorném frézování hlubokých kapes. Odvod třísky z místa řezu je zajišťován pomocí stlačeného vzduchu, řeznou kapalinou nebo předvrtáním větší počáteční díry [28].



Obr. 2.21 Ponorné frézování a) trajektorie nástroje, b) optimalizovaná trajektorie nástroje [51].

Tab. 2.8 Výhody a nevýhody ponorného frézování [26,28,43].

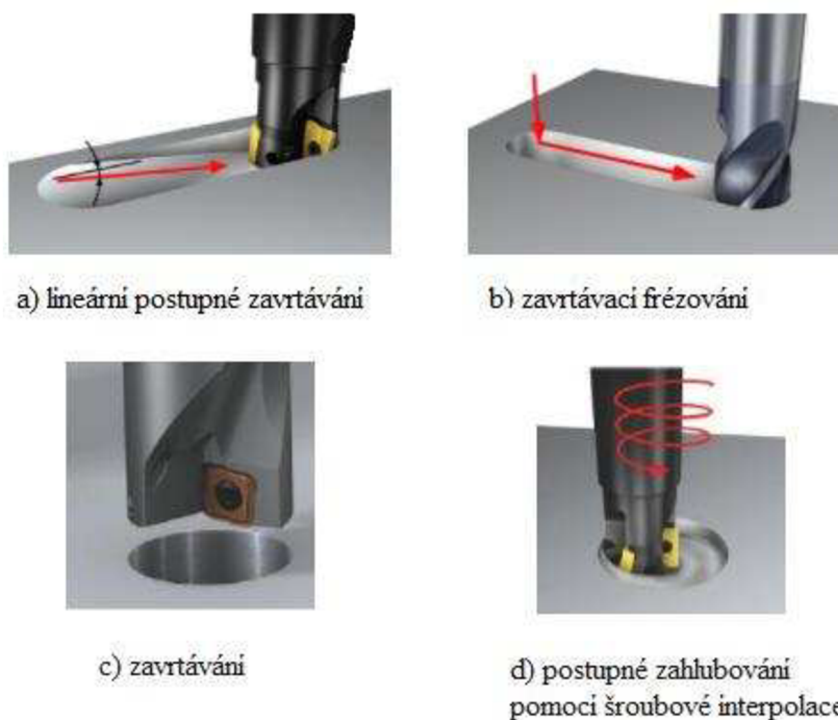
Výhody	Nevýhody
Přesná konfigurace frézování	Nízká rychlost úběru materiálu
Bez vibrací	Neproduktivní pohyby nástroje
Bez ohýbání nástroje	Nutnost dokončování
Lepší drsnost povrchu	

### 2.4.6 Způsoby zanořování nástroje do materiálu

Na Obr. 2.21 c), b) je znázorněn první způsob zanořování nástroje a to zavrtání. Problémem je nulová řezná rychlost v ose nástroje, která se ale dá eliminovat posunutím osy nástroje nebo zavrtáváním po šroubové interpolaci (viz. Obr. 2.21 d)) [46].

Další metodou je „rampování“, lineární postupné zavrtávání (Obr. 4. 2.21 a)). Posuv nástroje je zároveň ve směru axiálním (Z) a jedním radiálním (X nebo Y). Řezné síly jsou tedy radiální i axiální [32].

Odvod třísky je jedním z hlavních problémů u frézování hlubokých kapes. Proto je výhodné využívat stlačený vzduch nebo kapalinu, které usnadní odvod třísky z místa řezu [47].

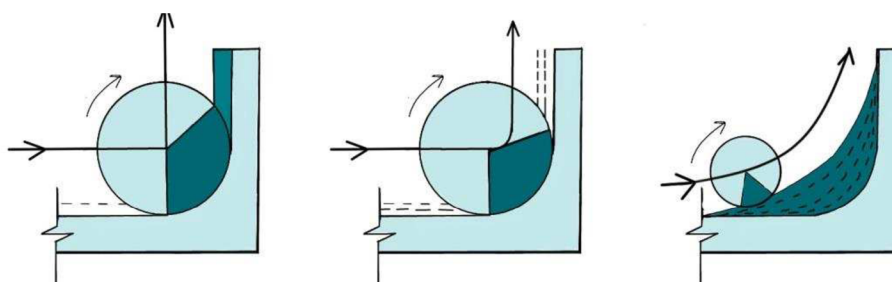


Obr. 2.22 Způsoby vstupování nástroje do materiálu [45].

### 2.4.7 Frézování rohů

Frézování rohů představuje operaci, která výrazně zvyšuje celkový strojní čas. Ve většině případů musí být k obrábění využívány jiné nástroje, aby bylo dosaženo požadovaného rádius. Při obrábění rohů je zvýšené riziko zlomení nástroje v důsledku vyššího namáhání, které je způsobeno výraznou změnou směru trajektorie nástroje. Toto zastavení způsobuje náchylnost k vibracím. Tento problém může mít za následek poškození povrchu, otupení nástroje, nebo úplný zlomení nástroje [31,44].

Při frézování rohů také záleží na hloubce zanoření nástroje v ose Z. Pokud se do hloubky zanořuje s menším krokem, riziko vibrací a poškození nástroje nebo obrobku se snižuje [45].



Obr. 2.23 Způsoby optimalizace obrábění rohů: a) úhel opásání větší než  $90^\circ$ -úběr velkého množství materiálu najednou, b) úhel opásání větší než  $90^\circ$  - opakovaný úběr menšího množství materiálu, c) úhel opásání menší než  $90^\circ$  -více průjezdů nástrojem [45].

#### Úhel opásání větší než $90^\circ$

Při úběru velkého množství materiálu (Obr. 2.22 a)) dochází ke zvýšeným vibracím, které způsobují snížení kvalitu obrobeného povrchu a mohou vést k deformaci nebo zlomení nástroje [45].

Možným řešením je obrábění rohů pomocí ubírání menšího množství materiálu (Obr. 2.22 b)) a více opakovanými průchody. Namáhání nástroje se sníží, ale rizika spojená s vibracemi a zatížením nástroje se stále vyskytují [30,45].

#### Úhel opásání menší než $90^\circ$

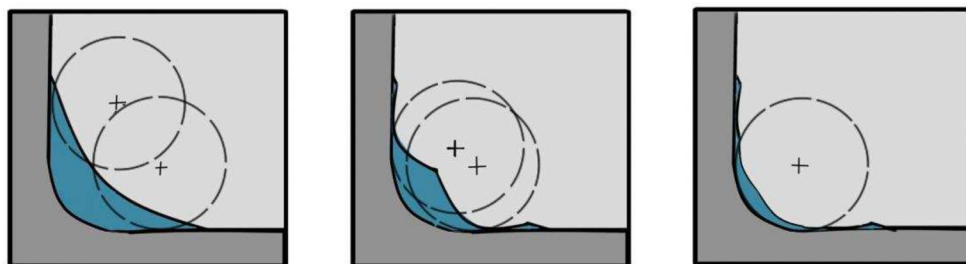
Další možností je využití nástroje, který má menší rádius než obráběný roh (viz Obr. 2.22 c)). Menší průměr nástroje umožňuje řízení úhlu opásání, vyšší rychlost posuvu a lepší kvalitu povrchu. Výhodou je snížení rizik, která nastávají ve „zlomovém bodě“ - místě, kde nástroj mění trajektorii a kde dochází ke vzniku nadměrného třecího tepla a vibrací. Nevýhodou je zvýšení strojního času v důsledku výměny nástroje [30,44].

Dalším způsobem odebrání materiálu z rohů a vytvoření požadovaného rádiusu může být pomocí odvrtávání, které je popsáno v následující podkapitole.

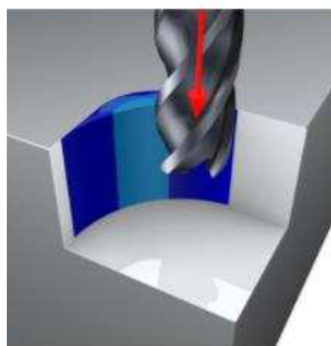
### 2.4.8 Frézování rohů odvrtáváním

Pokud je požadovaný rádius stejný jako poloměr nástroje, obrábění rohů se provádí postupným odvrtáváním materiálu, viz Obr. 2. 23 a Obr. 2. 24.

Jestliže je rádius menší, bude nutné použít jiný nástroj s menším průměrem. Rohy je možné vytvořit odvrtáním nebo využitím metod, které byly zmíněny v předešlém odstavci.



Obr. 2.24 Metoda odvrtávání rohů pro ponorné obrábění [32].

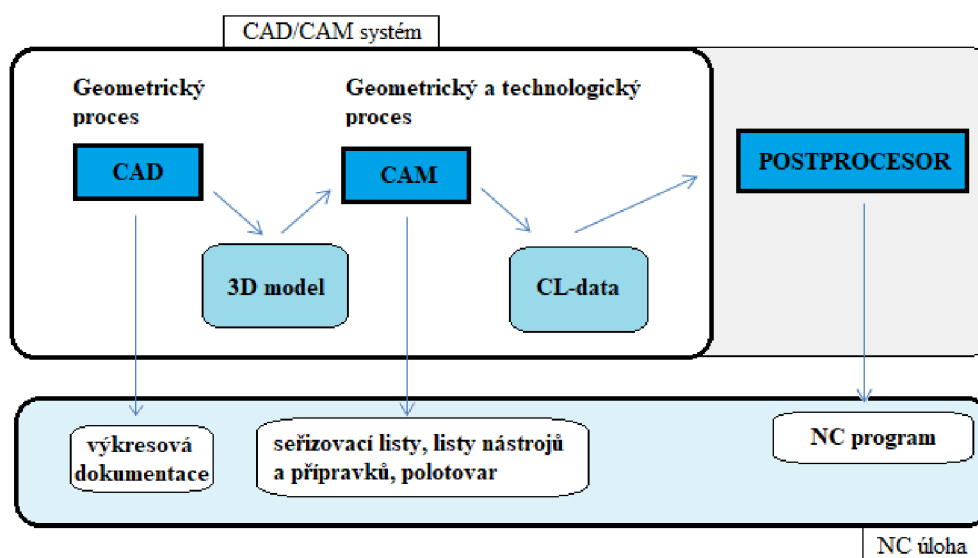


Obr. 2.25 Metoda odvrtávání rohů pro ponorné obrábění ve 3D pohledu [32].

### 3 NÁVRH CNC PROGRAMU PRO FRÉZOVÁNÍ KAPES V LETECKÝCH SLITINÁCH

#### 3.1 Numerický řetězec

Numerický řetězec zobrazuje proces výroby součásti od vytvoření modelu k jeho výrobě. Průběh je znázorněn na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Schéma numerického řetězce [51].

##### 3.1.1 CAD systém

CAD systémy umožňují vytvářet modely ve 2D, tak i ve 3D, které odpovídají reálným požadavkům na výrobek. Příklady CAD systémů využívaných v této práci jsou POWERMILL a MASTERCAM [63].

##### 3.1.2 CAM systém

Systémy typu CAM se využívají k programování obráběcích strojů. Ze 3D CAD modelu vytvoří jeho numerický popis a CAM systém umožňuje naplánovat a popsat obrábění konkrétními nástroji [64].

Automatizovaná příprava výroby může být rozdělena do více dílčích kroků od vytvoření trajektorie nástroje, po vygenerování simulace. V případě, že přesnost CAM systému není dostačující, je možné simulace znázornit jako CNC simulace, která umožňuje poskytnout více detailů. Kombinací těchto simulací se celý proces optimalizuje. Každý systém má vlastní strategie obrábění. CAM systémy mohou být plně automatizované nebo poloautomatizované, kdy vyžadují zásahy uživatele [51].

Z CAM systému jsou generována CL data, což jsou soubory obsahující informace o trajektorii nástroje a jeho dalších funkcích (např.: výměna nástroje) [51, 64].

##### Postprocessor

Jedná se o program, který přepíše CL data z CAM systému na program určený pro konkrétní stroj. Pro každý stroj existuje jiný postprocessor, který zohledňuje kinematiku



stroje a všechny jeho možnosti. Výstupem postprocesoru jsou NC data, které jsou interpretovány obráběcím strojem [64].

Nejběžnějším jazykem pro programování strojů je jazyk ISO, který se dělí na skupinu příkazů „G“ (připravené funkce) a skupinu „M“ (pomocné funkce) [51, 64].

Níže jsou uvedeny základní funkce ISO kódu pro stroj Sinumerik 840D, který je využit v experimentální části práce (pro jiné stroje se může lišit) [51].

#### **Přípravné funkce:**

- G0 - lineární interpolace rychloposuvem.
- G1 - lineární interpolace pracovním posuvem.
- G2 - kruhová interpolace ve směru hodinových ručiček.
- G3 - kruhová interpolace proti směru hodinových ručiček.
- G4 - časově předurčená prodleva.
- G18 - volba pracovní roviny Z/X.
- G25 - dolní omezení pracovního pole.
- G26 - horní omezení pracovního pole.
- G33 - řezání závitů s konstantním stoupáním.
- G54 - 1. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G55 - 2. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G56 - 3. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G57 - 4. nastavitelné posunutí nulového bodu.
- G70 - zadávání dráhy v palcích.
- G71 - zadávání dráhy v mm.
- G74 - nájezd do referenčního bodu.
- G90 - absolutní programování.
- G91 - inkrementální programování.
- G94 - posuv F [ min. ].
- G95 - posuv F [ mm ].
- G96 - zapnutí konstantní řezné rychlosti.
- G97 - vypnutí konstantní řezné rychlosti (konstantní velikost otáček).
- G98 - najetí do referenčního bodu

#### **Pomocné funkce:**

- M0 - programovatelný stop programu.
- M1 - volitelný stop.
- M2 - konec hlavního programu.
- M3 - start vřetena ve směru hodinových ručiček (CW).
- M4 - start vřetena proti směru hodinových ručiček (CCW).
- M5 - zastavení vřetena.
- M6 - výměna nástroje (standardní nastavení při ruční výměně)
- M8 - zapnutí chlazení.
- M9 - vypnutí chlazení.
- M17 - konec podprogramu.
- M30 - konec programu s návratem na začátek programu.
- M41 - převodový stupeň 1 (nižší řada otáček).
- M42 - převodový stupeň 2 (vyšší řada otáček).

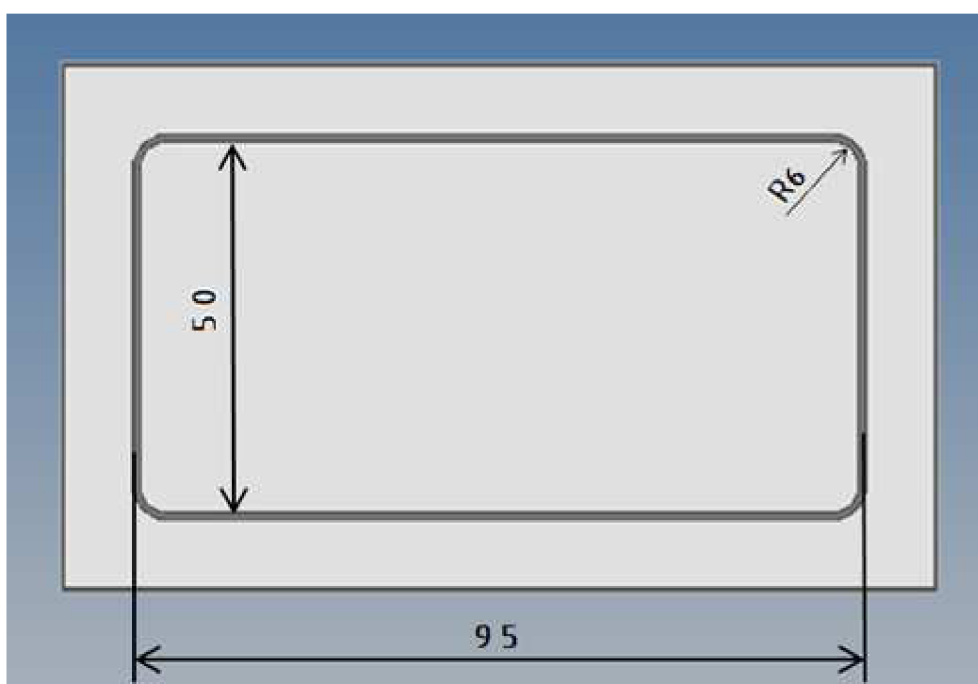
Pomocí těchto kódů je zpracovaný celý příkaz, který je možný upravovat přímo v počítači i stroje.

### 3.2 CNC programy pro jednoduché kapsy

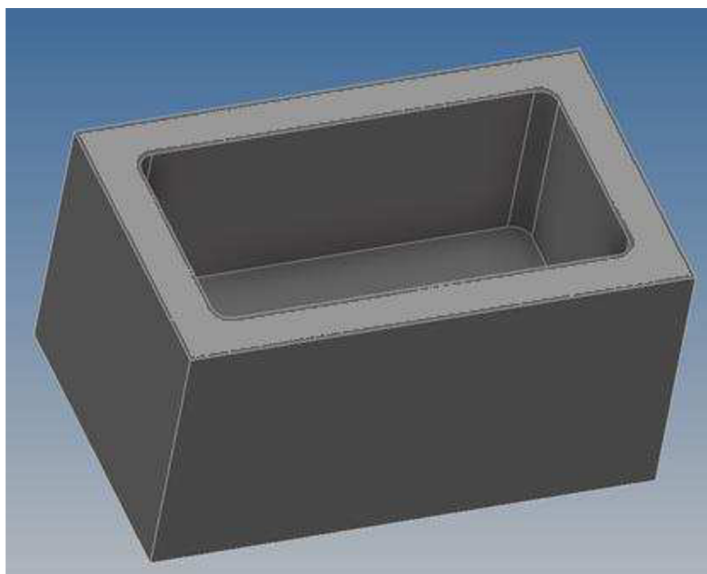
Odlehčení pomocí frézování kapes se využívá například na panelech křídel letadel. V devadesáti procentech případů se jedná o velké množství jednoduchých kapes. Je nutné využít takových strategií, aby všechny kapsy byly obrobny v co nejkratším čase, rozdíly v řádech sekund mohou vypadat nepatrné při obrábění jedné kapsy, ale se zvyšováním jejich počtu, může špatně zvolený postup znamenat hodiny obrábění navíc, a tudíž snížení produktivity a zvýšení ceny výroby (potřeba více nástrojů kvůli opotřebení).

Proto je nutné vytvořit simulace v CAD/CAM programech, porovnat strategie, optimalizovat je a vybrat tu nejvhodnější, která bude splňovat požadavky. Simulace hrubování a dokončování pro obrábění jednoduchých kapes byly vytvořeny v programech MASTERCAM (výsledky prezentované v následující kapitole), CATIA a POWERMILL (výsledky prezentované pro srovnání s ostatními programy v diskuzi práce). Hrubování porovnává tři různé strategie: konturování, řádkování a ponorné frézování.

K frézování byly firmou SECO tools doporučeny nástroje i jejich řezné podmínky, materiál obrobku je hliníková slitina 7475-T7351 a geometrie kapsy (Obr. 3.2 a Obr. 3.3) je jednoduchý obdélník 95x50 mm, hloubce 40 mm s rohovým rádiusem R6 sloužící k odlehčení spodního panelu křídla o rozměrech. Příklad na dokončení na stěnách kapsy je 0,5 mm a na dně 0,2 mm.



Obr. 3.2 Tvar jednoduché kapsy.



Obr. 3.3 Model jednoduché kapsy ve 3D pohledu.

### 3.2.1 Frézování válcovou frézou Aeromaster

Prvním nástrojem pro hrubování navrženým firmou SECO tools je válcová fréza Aeromaster o průměru 25 mm.



Obr. 3.4 Aeromaster [73].

Tab. 3.1 Základní informace o nástroji [73].

Základní informace o nástroji	
Výrobce	SECO tools
Označení nástroje	R217.97-2525.0-X12.2A
Označení destiček	XPkX12T308PDER-E08 H25

Tab. 3.2 Silné a slabé stránky nástroje Aeromaster [73].

Silné stránky	Slabé stránky
velká variabilita délek	není ideální na menší kapsy
různé rohové rádiusy	nutný větší rohový rádius u kapes nebo nutný dokončovací nástroj
ideální na velké a rychlé odebrání materiálu z větších prostor a větších hloubek	

**Řezná data navržená firmou SECO tools**

Tab. 3.3 Řezná data navržená firmou SECO tools [73].

Název	Hodnota
Řezná rychlost	$v_c=400$ m/min
Posuv na zub	$f_z = 0,25$ mm
Hloubka záběru ostří	$a_p= 6$ mm
Maximální úhel zanoření	$\alpha = 10^\circ$

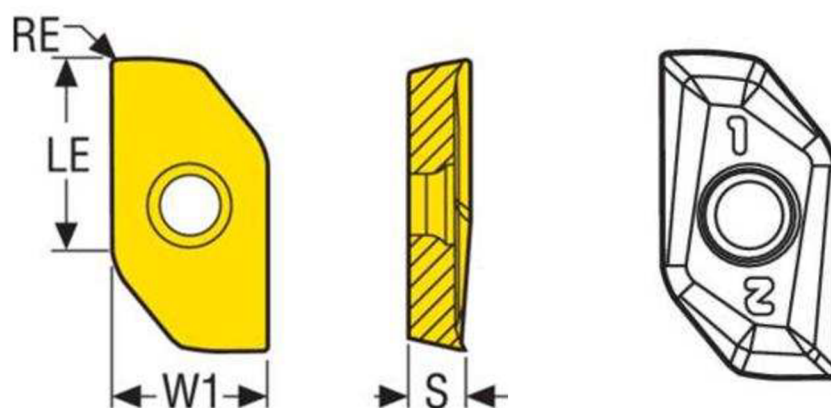
**Dopočítané potřebné hodnoty**

Tab. 3.4 Dopočítané potřebné hodnoty.

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$v_f= 3820$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=5093$ min <sup>-1</sup>

Tab. 3.5 Parametry PVD destičky [73].

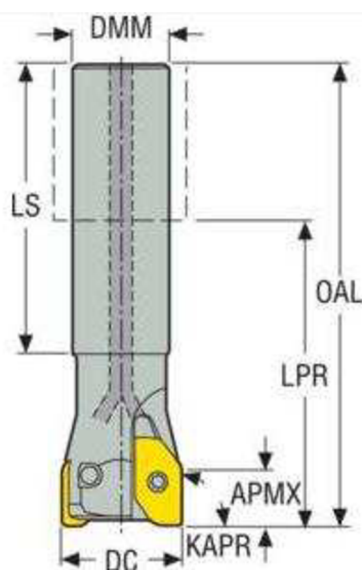
Označení	Popis	Hodnota
Označení destiček	XPkX12T308PDER-E08 H25	
AN	Hlavní úhel hřbetu	11,0 °
CEDC	Počet břitů	2
Třída řezného materiálu	Třída řezného materiálu	H25
Typ třídy	Typ třídy	Karbid bez povlakování
INSL	Délka destičky	18,8 mm
LE	Efektivní délka řezné hrany	12,1 mm
RE	Rohový rádius	0,8 mm
Hmotnost (zaokrouhlena nahoru)	Katalogová hmotnost	0,005 kg
S	Tloušťka destičky	4,0 mm



Obr. 3.5 Geometrie destiček [73].

Tab. 3.6 Parametry nástroje Aeromaster [73].

Označení	Popis	Hodnota
APMX	Max. hloubka řezu	7,5 mm
DC	Obráběcí průměr	25,0 mm
DMM	Průměr stopky / otvoru pro trn	25,0 mm
GAMF	Radiální úhel čela	-5,5°
GAMP	Axiální úhel čela	3,0°
KAPR	Úhel nastavení ostří nástroje	90,0°
LPR	Vysunutá délka	94,0 mm
LS	Délka stopky	95,0 mm
LUX	Využitelná max. délka	54,5 mm
OAL	Celková délka	150,0 mm
RMPX	Max, úhel zafrézování	10,0°
Hmotnost	Katalogová hmotnost	0,500 kg
RPMX	Maximální otáčky	40000 ot/min
Typ upnutí	Typ upnutí	Cylindrický
ZEFP	Počet efektivních obvodových břitů	2
ZNP	Celkový počet funkčních břitů nástroje	2



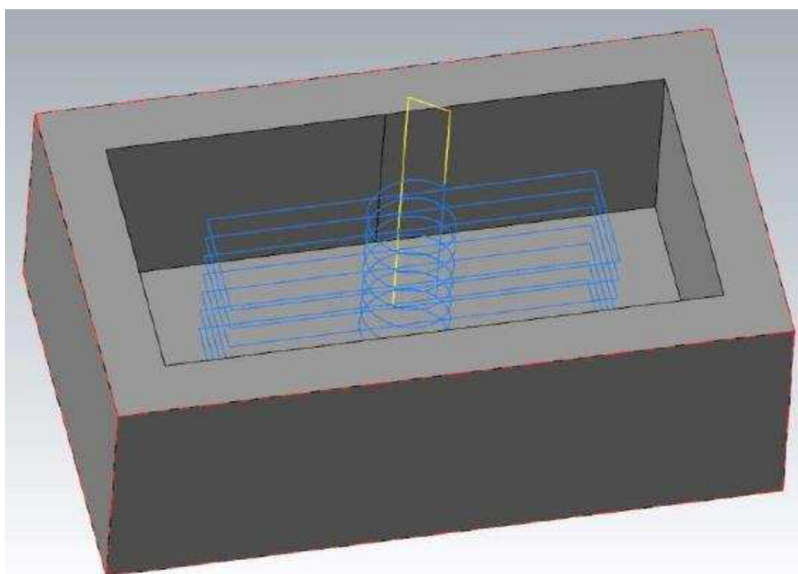
Obr. 3.6 Geometrie nástroje [73].

### Strategie konturování

Nástroj se zanoří ve středu uvažované kapsy pomocí šroubovice, jejíž poloměr je 50% poloměru nástroje (12,5 mm). Následně obrábí po dráze, která byla vytvořena odsazením křivky tvořící model. Krok posuvu v dané hladině odpovídá v procentech 20-75% průměru nástroje, v tomto případě 16,5 mm pro osy X a Y. Po obrobení hladiny se nástroj zanoří do materiálu s krokem velikosti 6 mm v ose Z. Výška jednotlivých hladin zůstává konstantní. Pro obrobení celé kapsy je nutné frézovat kapsu v šesti hladinách.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl nasimulován na 38 sekund.

Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min.



Obr. 3.7 3D model jednoduché kapsy s trajektorií nástroje.

Tab. 3.7 Celkový čas cyklu.

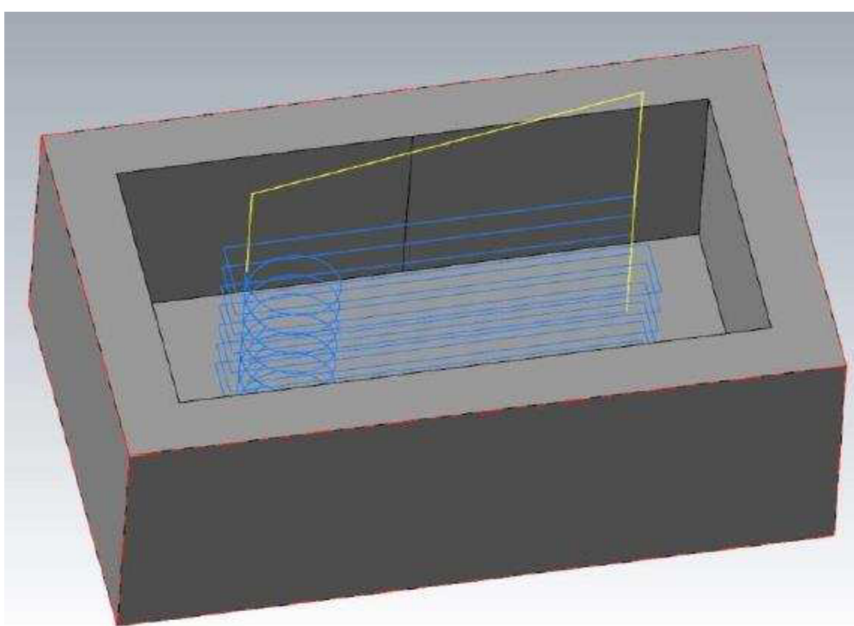
Název	Hodnota
Čas cyklu	38 s

### Strategie řádkování

Nástroj se zanoří do materiálu v jednom z rohů kapsy pomocí trajektorie po šroubovici, která má velikost 50% poloměru nástroje (12,5 mm). V případě této strategie se jedná o oboustranné obrábění, kdy je nástroj neustále v záběru při frézování jedné hladiny. Krok mezi řádky je velikosti 20-70% poloměru nástroje, v tomto případě byl nasimulován na 16,5 mm. Řádky v jedné hladině jsou dva vzhledem k šířce kapsy, která je 50mm. Po obrobení jedné hladiny se nástroj znovu zanoří do materiálu o krok velikosti 6mm v ose Z a pokračuje ve frézování. Počet kroků potřebných k obrobení celé hloubky kapsy je sedm.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl simulován na 45 sekund.

Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min.



Obr. 3.8 3D model jednoduché kapsy s trajektorií nástroje.

Tab. 3.8 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Čas cyklu	45 s

### Vyhodnocení

Obě dvě nasimulované strategie byly optimalizovány tak, aby vytvořené trajektorie byly co nejkratší a strojní čas obrábění co nejnižší. Rozdíly v čase mezi konturováním a řádkováním jsou v řádech sekund. Strategie konturování je nasimulována na 38 sekund a řádkování na 45 sekund. Vyšší strojní čas u strategie řádkování je způsoben fixním počátečním bodem, který se nachází po celou dobu frézování v jednom z rohů kapsy a nástroj musí, po dokončení frézování hladiny přejet zpět do počátečního rohu, kde se zanoří do další hladiny. Tyto neproduktivní posuvy způsobují zvyšování strojního času strategie řádkování.

### 3.2.2 Frézování monolitickou frézou JS453160E2R100.0Z3-HEMI

Dalším nástrojem pro hrubování navrženým firmou SECO tools je válcová fréza Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI o průměru 16 mm.



Obr. 3.9 Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].

Tab. 3.9 Základní informace o nástroji [73].

Základní informace o nástroji	
Výrobce	SECO tools
Označení nástroje	JS453160E2R100.0Z3-HEMI

Tab. 3.10 Silné a slabé stránky nástroje Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].

Silné stránky	Slabé stránky
různé rohové rádiusy	nízký dosah
ideální na úzké prostory	nutné skladové zásoby
použití od rádiusu 2 mm	
možnost přebroušení	

#### Řezná data navržená firmou SECO tools

Tab. 3.11 Řezná data navržená firmou SECO tools [73].

Název	Hodnota
Řezná rychlost	$v_c=500$ m/min
Posuv na zub	$f_z=0,12$ mm
Hloubka záběru třísky	$A_p=16$ mm

#### Dopočítané potřebné hodnoty

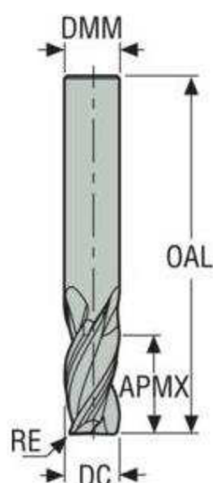
Tab. 3.12 Dopočítané potřebné hodnoty

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$V_f=3580$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=9950$ min <sup>-1</sup>



Tab. 3.13 Parametry nástroje Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].

Označení	Popis	Hodnota
APMXS	Max. hloubka řezu v bočním směru posuvu	32,0 mm
CEDC	Počet břitů	3
DC	Obráběcí průměr	16,0 mm
DMM	Průměr stopky / otvoru pro trn	16,0 mm
DN	Průměr krčku	15,2 mm
FHA	Úhel šroubovice břitů	35,0°
CGT	Typová řada nástroje	JS453
LN	Délka krčku	48,0 mm
OAL	Celková délka	100,0 mm
RE	Rohový rádius	1,0 mm
RMPX	Max. úhel zafrézování	10,0°
Hmotnost (zaokrouhlena nahoru)	Katalogová hmotnost	0,300 kg
Typ upnutí	Typ upnutí	Cylindrický
ZNP	Celkový počet funkčních břitů nástroje	3



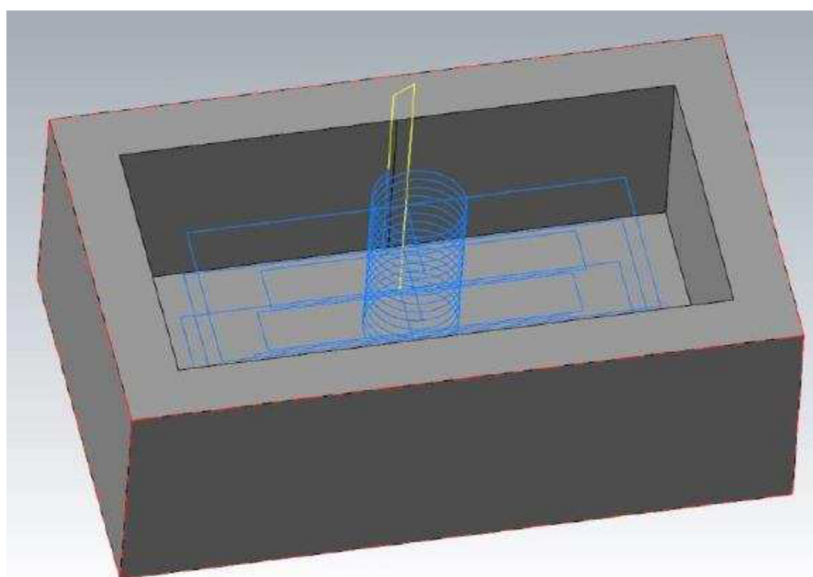
Obr. 3.10 Geometrie nástroje [73].

### Strategie konturování

Strategie konturování pro nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI probíhá stejně jako pro nástroj Aeromaster. Zanoření nástroje do materiálu se nachází ve středu kapsy. Zanoření je pomocí trajektorie po šroubovici, jejíž poloměr je 50 % poloměru nástroje, v tomto případě 8 mm. Nasimulovaná dráha kopíruje tvar kapsy. Nástroj se v jedné hladině posouvá o krok velikosti 10,56 mm v osách X a Y od středu kapsy.

Zanoření do další hladiny je pomocí šroubovice ve středu kapsy s krokem velikosti 16 mm v ose Z. Celkový počet kroků jsou tři.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl spočten na 40 sekund.



Obr. 3.11 3D model jednoduché kapsy s trajektorií nástroje.

Tab. 3.14 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Čas cyklu	40 s

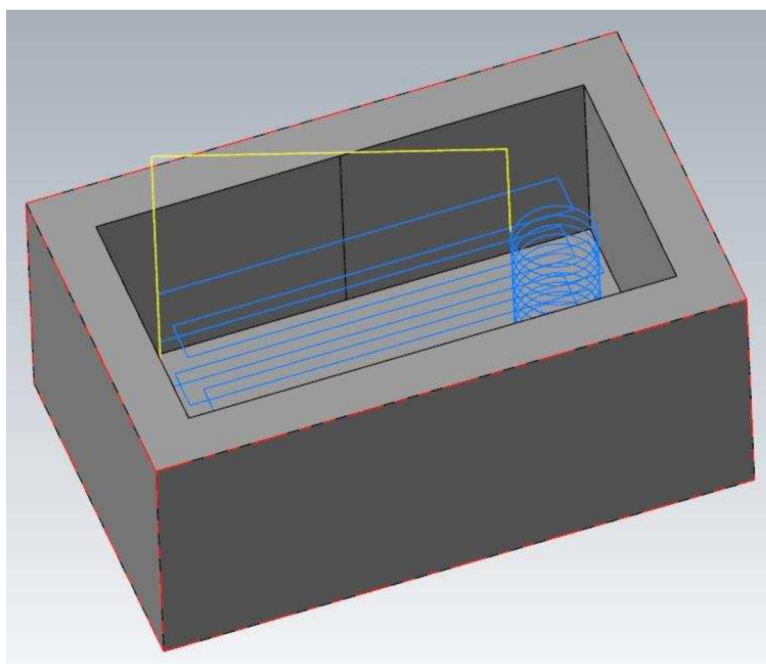
### Strategie řádkování

Pro vygenerovanou trajektorii řádkování se zanoření nástroje do materiálu nachází v jednom z rohů kapsy pomocí šroubovice, jejíž poloměr je 50 % poloměru nástroje a to 8 mm.

V případě této strategie se také jedná o oboustranné obrábění, kdy je nástroj, při frézování jedné hladiny neustále v záběru. Krok mezi řádky je velikosti 20-70% poloměru nástroje, v tomto případě byl nasimulován na 10,56 mm. Počet řádků v jedné hladině jsou tři.

Po obrobení první hladiny se nástroj přesune zpět do počátečního rohu kapsy, zanoří se do materiálu o krok velikosti 16 mm (osa Z) a pokračuje v obrábění. Celkový počet kroků jsou tři.

Celkový strojní čas (produktivní i neproduktivní posuvy) byl nasimulována na 40 sekund.



Obr. 3.12 3D model jednoduché kapsy s trajektorií nástroje Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI.

Tab. 3.15 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Čas cyklu	45 s

### Vyhodnocení

Při porovnání obou dvou strategií prováděných nástrojem Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI, vyšla jako i u nástroje Aeromaster výhodněji strategie konturování se strojním časem 40 sekund. U strategie řádkování vyšel strojní čas na 45 sekund.

### 3.2.3 Frézování ponornou frézou Plunge

Posledním nástrojem pro hrubování navrženým firmou SECO tools je válcová fréza Plunge o průměru 25 mm.



Obr. 3.13 Plunge [73].

Tab. 3.16 Základní informace o nástroji [73].

Základní informace o nástroji	
Výrobce	SECO tools
Označení nástroje	R217.79-2025.0-10-3A
Označení destiček	XOEX10T308FR-E05 H15

Tab. 3. 17 Silné a slabé stránky nástroje Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].

Silné stránky	Slabé stránky
velká variabilita délek	v uzavřených prostorách je nutné vytvořit otvor (prostor)
různé rohové rádiusy	
ideální na úzké a hluboké prostory	
velký dosah při zachování produktivních řezných dat	

### Řezná data navržená firmou SECO tools

Tab. 3.18 Řezná data navržená firmou SECO tools [73].

Název	Hodnota
Řezná rychlost	$v_c=600$ m/min
Posuv na zub	$f_z = 0,11$ mm
Hloubka záběru třísky	$a_p= 4$ mm

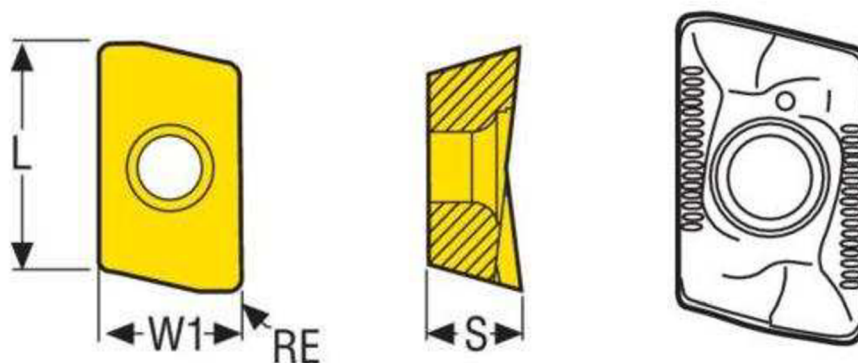
### Dopočítané potřebné hodnoty

Tab. 3.19 Dopočítané potřebné hodnoty

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$v_f= 2521$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=7639$ min <sup>-1</sup>

Tab. 3.20 Parametry PVD destiček [73].

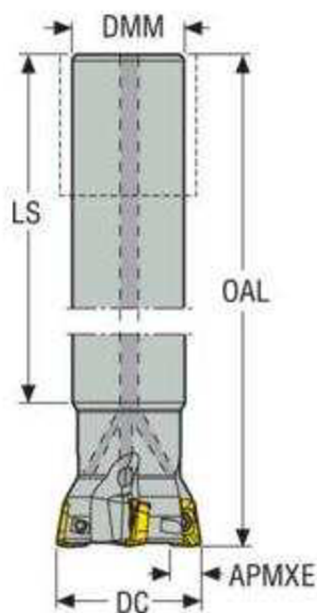
Označení	Popis	Hodnota
Označení destiček	XOEX10T308FR-E05 H15	
AN	Hlavní úhel hřbetu	15,0 °
CEDC	Počet břitů	2
Třída řezného materiálu	Třída řezného materiálu	H15
Typ třídy	Typ třídy	Karbid bez povlakování
L	Délka destičky	10 mm
LE	Efektivní délka řezné hrany	9,7 mm
RE	Rohový rádius	0,8 mm
Hmotnost (zaokrouhlena nahoru)	Katalogová hmotnost	0,001 kg
S	Tloušťka destičky	3,8 mm



Obr. 3.14 Geometrie destiček [73].

Tab. 3.21 Parametry nástroje Plunge [73].

Označení	Popis	Hodnota
APMX	Max. hloubka řezu	6,0 mm
DC	Obráběcí průměr	25,0 mm
DMM	Průměr stopky / otvoru pro trn	20,0 mm
GAMF	Radiální úhel čela	-7,0 °
GAMP	Axiální úhel čela	5,0 °
KAPR	Úhel nastavení ostří nástroje	90,0 °
LPR	Vysunutá délka	150,0 mm
LS	Délka stopky	170,0 mm
OAL	Celková délka	200,0 mm
Hmotnost (zaokrouhlena nahoru)	Katalogová hmotnost	0,600 kg
RPMX	Maximální otáčky	26000 ot/min
Typ upnutí	Typ upnutí	Cylindrical
ZEFP	Počet efektivních obvodových břitů	3
ZNP	Celkový počet funkčních břitů nástroje	3



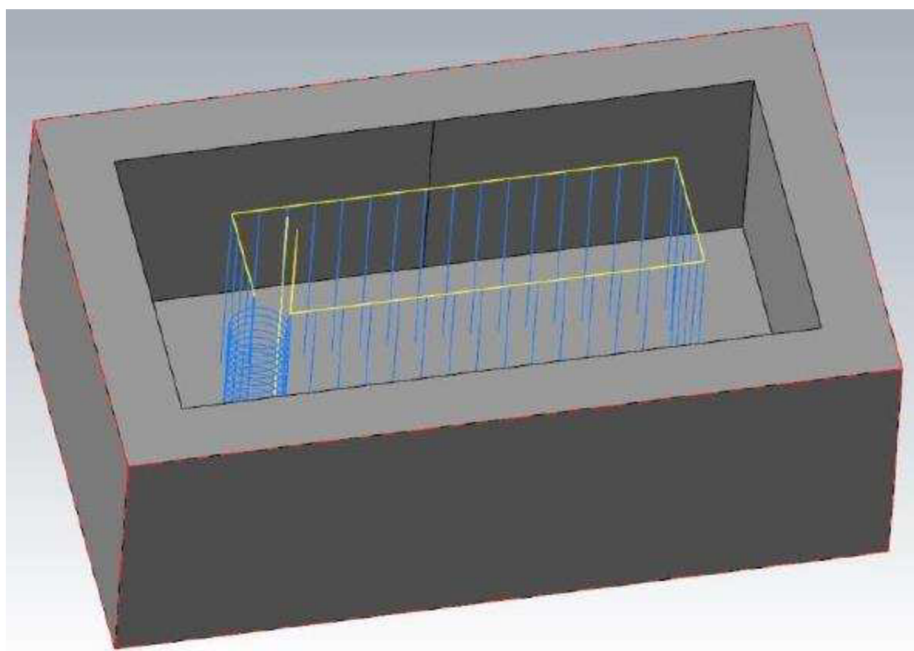
Obr. 3.15 Geometrie nástroje [73].

### Ponorné frézování

Nástroj určený pro tuto strategii vyžaduje předem předvrtaný otvor. Ten je vytvořen zavrtáním nástroje do materiálu pomocí šroubovice, jejíž poloměr je 25 % poloměru nástroje (6,25 mm) a vytvoření otvoru o velikosti 18,75 mm.

Následně nástroj vyjede z materiálu nad obrobek, posune se o krok velikosti 6,25 mm a zavrtá se do materiálu. Tímto způsobem nástroj obrábí celou kapsu. Produktivní posuvy jsou pouze při zavrtávání, neproduktivní jsou při výjezdech z materiálu a posunutí nad novou osu vrtání, čímž se výrazně zvyšuje strojní čas.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl nasimulován na 66 sekund.



Obr. 3.16 3D model jednoduché kapsy s trajektorií nástroje.

Tab. 3.22 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Čas cyklu	66 s

Tato strategie je vhodná k vytváření velmi hlubokých kapes, pro které by jiné nástroje měly potíže s vibracemi a hloubkou. Ponorné frézování je tedy časově náročnější, ale v některých případech jediným možným řešením.

### 3.2.4 Dokončování

Pro dokončování byla použita fréza PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA o průměru 12 mm, fréza s doporučenými řeznými podmínkami pro hliník:



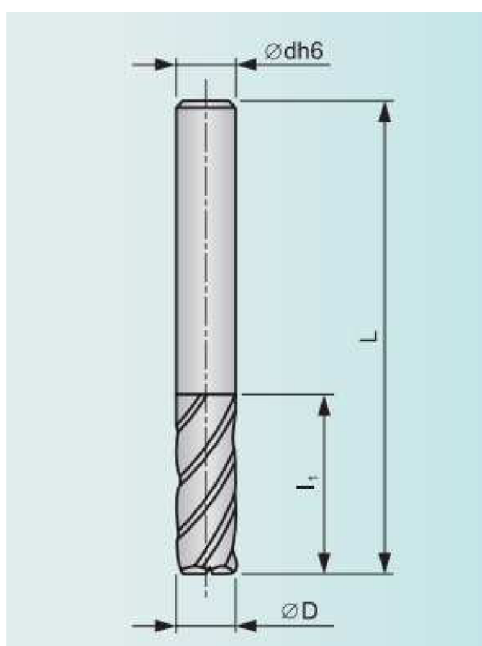
Obr. 3.17 Dokončovací fréza PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA [74].

Tab. 3.23 Základní informace o nástroji.

Základní informace o nástroji	
Označení nástroje	PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA
Počet zubů nástroje	4
Délka ostří	50 mm

Tab. 3.26 Celkový čas cyklu.

Označení	Popis	Hodnota
D	Průměr nástroje	12
Z	Počet břitů	4
dh6	Průměr stopky	12
L	Délka nástroje	100
l <sub>1</sub>	Délka břítu	50



Obr. 3. 18 Dokončovací fréza PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA [74].



Tab. 3.24 Řezná data.

Název	Hodnota
Řezná rychlost	$v_c=200$ m/min
Posuv na zub	$f_z=0,07$ mm
Hloubka záběru třísky	$a_p=3$ mm

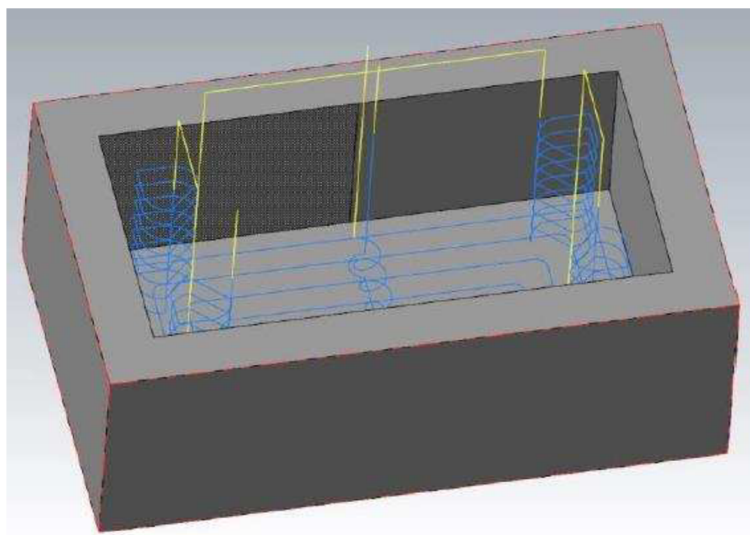
**Dopočítané potřebné hodnoty**

Tab. 3.25 Dopočítané potřebné hodnoty

Název	Hodnota
Velikost posuvu	$v_f=1485$ mm/min
Otáčky vřetene	$n=5305$ min <sup>-1</sup>

Pro dokončování rohů byla vygenerovaná trajektorie, kdy se nástroj zanoří do materiálu v rohu, který bude dokončovat a s krokem 5 mm v ose Z obrábí jednotlivé hladiny na požadovaný rádius 6 mm.

Čas cyklu pro strategie dokončující kapsu po nástroji průměru 25 mm je 99 sekund (1 minuta 39 sekund).

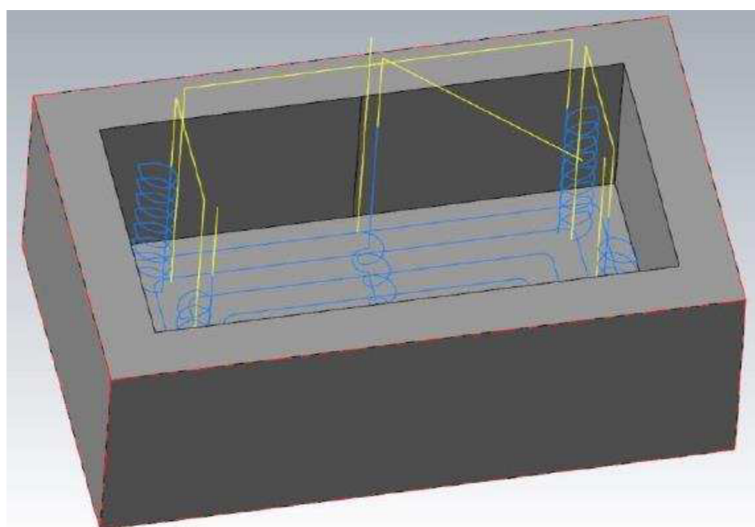


Obr. 3.19 3D model jednoduché kapsy s dokončovací strategií po nástroji pr. 25mm.

Tab. 3.26 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Čas cyklu	99 s

Čas cyklu pro strategie dokončující kapsu po nástroji průměru 16 mm je 83 sekund (1 minuta 23 sekund).



Obr. 3.20 3D model jednoduché kapsy s dokončovací strategií po nástroji pr. 16 mm.

Tab. 3.27 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Čas cyklu	83 s

### 3.2.5 Porovnání všech strategií u jednoduché kapsy

Při porovnání (tab. 3. 26) všech tří nástrojů a různých strategií, nejrychleji byla kapsa obrobena nástrojem Aeromaster. Strojní čas byl 38 sekund pomocí strategie konturování. Rozdíl mezi dvěma nejrychlejšími výsledky jsou dvě sekundy, není tak markantní, ale při obrábění většího počtu kapes by byl znásoben a mohl by znamenat nárůst strojního času až v řádech hodin.

Pro dosažení optimálních výsledků při frézování jednoduché kapsy by tedy bylo vhodné použít nástroj Aeromaster a obráběcí strategii konturování.

Tab. 3.28 Srovnání všech nástrojů pro jednoduchou kapsu [73].

Aeromaster	Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI	Plunge
		
Obr 3.21 Aeromaster [73].	Obr 3.22 Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].	Obr 3.23 Plunge [73].
Nejrychlejší strategie (pro jednotlivé nástroje)		
Konturování	Konturování	-
Nejnižší strojní čas (pro jednotlivé nástroje)		
38s	40s	66s

### 3.3 CNC programy pro komplexní kapsy

Simulace frézování jednoduché kapsy se od sebe odlišují minimálně, jak v trajektorii pro jednotlivé nástroje, tak v celkovém strojním čase.

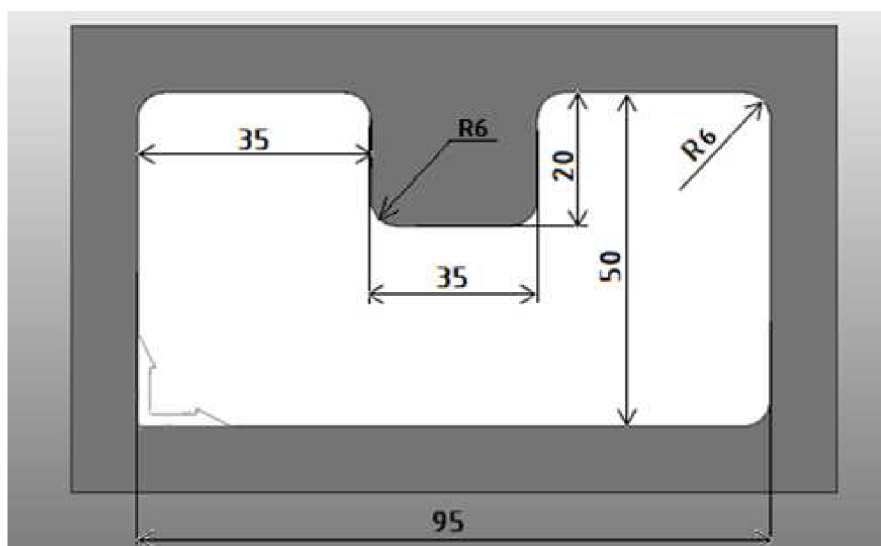
V druhé části práce byly simulovány strategie frézování komplexních kapes (takových se na panelech křídel objevuje okolo deseti procent). Jelikož je geometrie kapsy komplexnější, měly by vyniknout rozdíly mezi jednotlivými strategiemi. Strategie porovnávané u komplexních kapes jsou konturování a řádkování.

Pro obrábění jsou využity stejné nástroje a řezné podmínky, navržené firmou SECO tools, které byly použity při provádění simulací jednoduchých kapes.

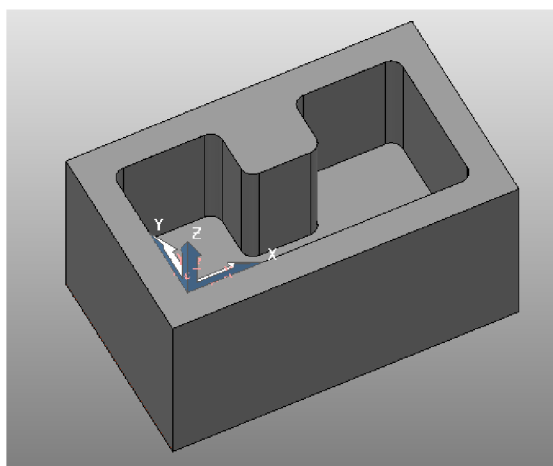
Geometrie kapsy je obdélník o rozměrech 95x50 mm, hloubka 40 mm, rohový rádius R6. Komplexní tvar, který bude v kapse obráběn je „výběžek“ na jedné straně kapsy, o rozměrech 35 x 20 mm, hloubka 40 mm, rádius R6.

Přídavek na stěnách a dně kapsy je 0,1 mm.

Simulace hrubování a dokončování komplexní kapsy byly vytvořeny pouze v programu POWERMILL.



Obr. 3.24 Tvar komplexní kapsy.



Obr. 3.25 3D model komplexní kapsy.

### 3.3.1 Frézování válcovou frézou Aeromaster

#### Strategie konturování

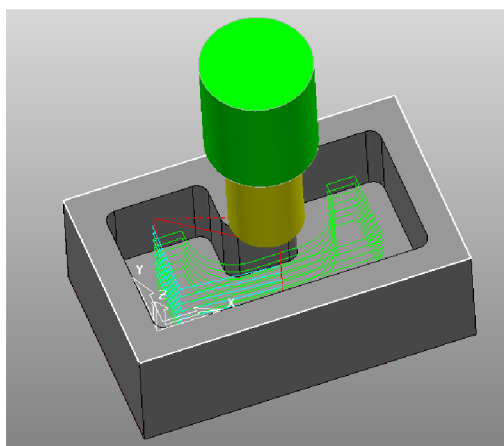
Nástroj se zanořuje v jednom z rohů uvažované kapsy. Zanoření je pomocí rampování pod úhlem  $10^\circ$ . Trajektorie nástroje opisuje konturu tvaru komplexní kapsy. Vzhledem k průměru nástroje stačí v dané hladině vytvořit jednu konturu pro její obrobení. Následuje zanoření nástroje do nižší hladiny o krok 6mm v ose Z. Celkový počet kroků je šest.

Celkový strojní čas, ve kterém se sčítají produktivní i neproduktivní posuvy byl simulován na 197 sekund (3 minuty 17 sekund).

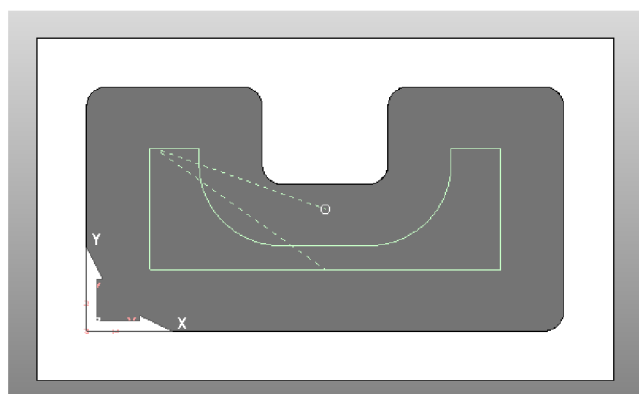
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

Tab. 3.29 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Celkový čas	00:03:17



Obr. 3.26 Konturování komplexní kapsy.



Obr. 3.27 Trajektorie komplexní kapsy pro nástroj Aeromaster.

### Strategie řádkování

Zanoření nástroje do materiálu se nachází v jednom z rohů kapsy, pomocí rampování pod úhlem  $10^\circ$ , tak jako u strategie konturování. Řádkováním o velikosti kroku 10mm mezi řádky, nástroj oboustranně obrábí jednotlivé hladiny kapsy. Pro obrobení jedné hladiny je zapotřebí tři řádků (Obr. 3.28, Obr. 3.29).

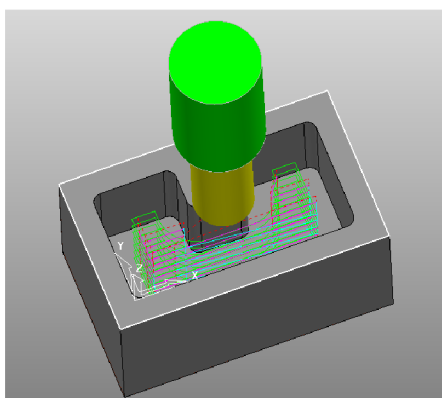
Po obrobení první hladiny se nástroj vrátí do počátečního bodu v rohu kapsy a pomocí rampování se zanoří do materiálu s krokem velikosti 6mm. Pro obrobení celé kapsy je potřebný počet kroků sedm.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl nasimulován na 162 sekund (2 minuty 42 sekund).

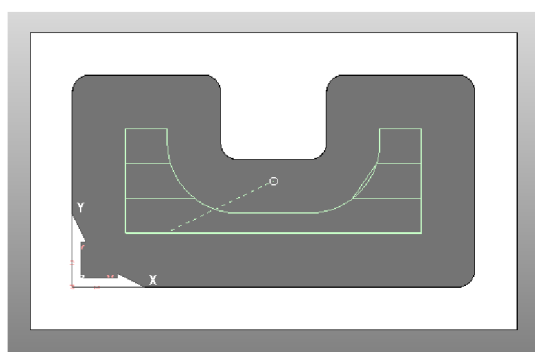
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

Tab. 3.30 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Celkový čas	00:02:42



Obr. 3.28 Řádkování komplexní kapsy nástrojem Aeromaster.



Obr. 3.29 Počet řádků strategie řádkování pro nástroj Aeromaster.

### Vyhodnocení

Při porovnání obou dvou strategií prováděných nástrojem Aeromaster je patrné, že rozdíly mezi strojními časy nasimulovaných strategií (konturování 197 sekund a řádkování 162 sekund) jsou mnohem markantnější než při obrábění kapsy jednoduchého tvaru. Jedná se o nezanedbatelnou hodnotu 35 sekund. Komplexní tvar kapsy umožňuje lépe srovnat rozdíly mezi jednotlivými strategiemi, které vznikají z důvodu změny tvaru kapsy.

### 3.3.2 Frézování monolitickou frézou JS453160E2R100.0Z3-HEMI

#### Strategie konturování

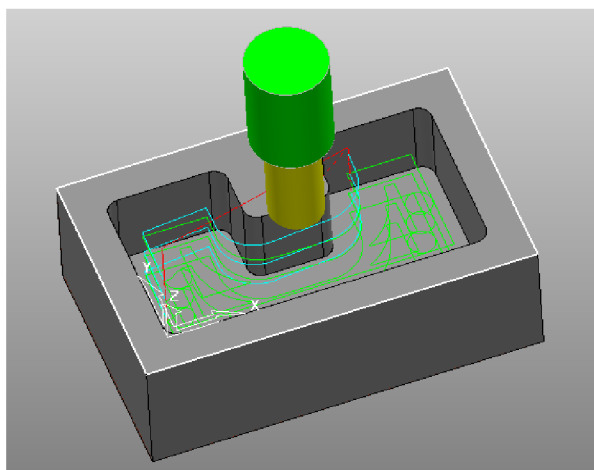
Zanoření nástroje do materiálu je pomocí rampování pod úhlem  $10^\circ$ . Nástroj se pohybuje po trajektorii, která konturuje tvar kapsy. V tomto případě je průměr nástroje nižší a proto jsou v jedné hladině vytvořeny kontury dvě, krok mezi nimi má velikost 16 mm (v osách X a Y). Po obrobení první hladiny se nástroj zanoří do materiálu s krokem 16 mm a konturuje další hladinu. Celkový počet kroků potřebných pro obrobení celé komplexní kapsy je tři.

Celkový strojní čas (produktivní i neproduktivní posuvy) byl nasimulován na 149 sekund (2 minuty 29 sekund).

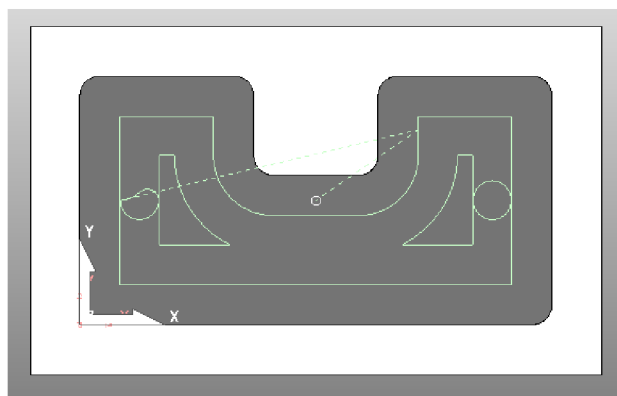
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

Tab. 3.31 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Celkový čas	00:02:29



Obr. 3.30 Konturování komplexní kapsy nástrojem Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI.



Obr. 3.31 Trajektorie konturování vypočítaná programem pro nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI .

### Strategie řádkování

Zanoření nástroje do materiálu je pomocí rampování pod úhlem  $10^\circ$ . Nástroj se pohybuje po trajektorii strategie řádkování, která je tvořena třemi řádky. Při této strategii nástroj obrábí oboustranně. V případě nástroje Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI má krok mezi jednotlivými řádky hodnotu 16 mm (osy X a Y).

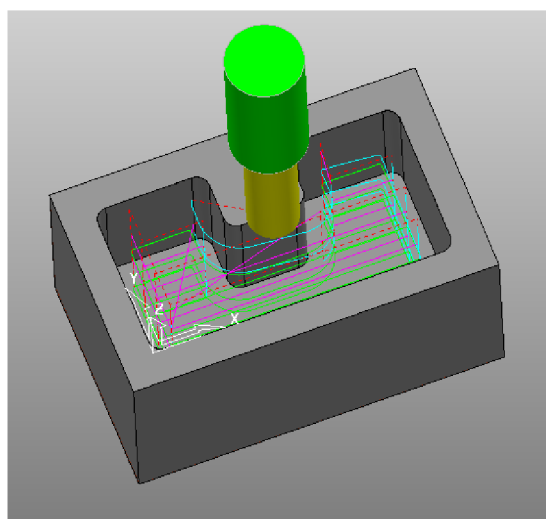
Po obrobení první hladiny kapsy se nástroj přesune do počátečního rohu kapsy, zanoří se do materiálu o krok velikosti 16 mm (v ose Z) a pokračuje v obrábění. Celkový počet obráběných hladin je tři.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl spočten na 196 sekund (3 minuty 16 sekund).

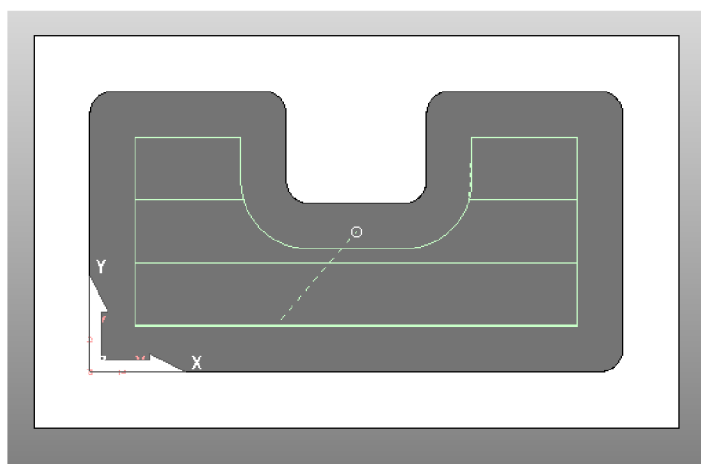
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min. Rychlost sjezdů je 150 m/min.

Tab. 3.32 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Celkový čas	00:03:16



Obr. 3.32 Řádkování komplexní kapsy nástrojem Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI .



Obr. 3.33 Počet řádků strategie řádkování pro nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI .

### Vyhodnocení

U simulace frézování pomocí nástroje Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI vyšla jako produktivnější strategie konturování s časem 149 sekund. Pomocí strategie řádkování vyšla simulace na 196 sekund. Rozdíly jsou větší s porovnání s jednoduchou kapsou. Díky komplexnímu tvaru kapsy je možné lépe studovat rozdíly mezi trajektoriemi jednotlivých strategií, které nebyly tak výrazné u kapes jednoduchého tvaru.

#### 3.3.3 Dokončování

Pro vytvoření simulace dokončování byla v případě obrábění komplexní kapsy zvolena metoda, kdy nástroj konturuje kapsu a sestupuje po hladinách až k jejímu dnu. Krok mezi jednotlivými hladinami má velikost 4 mm. Hodnoty řezných podmínek jsou stejné jako pro dokončování jednoduché kapsy.

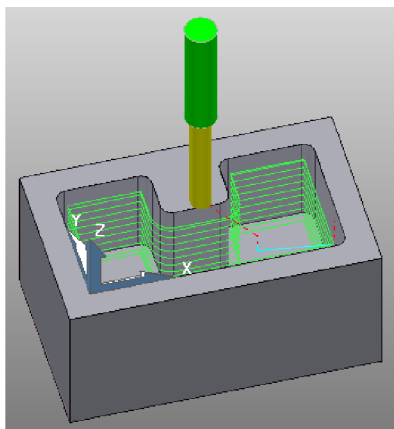
Nájezdy a výjezdy z a do materiálu jsou, stejně jako pro ostatní nástroje, rychloposuvem o velikosti 10 000 m/min.

Celkový strojní čas, ve kterém se počítají jak produktivní, tak neproduktivní posuvy byl simulován na 78 sekund (1 minuta 18 sekund).

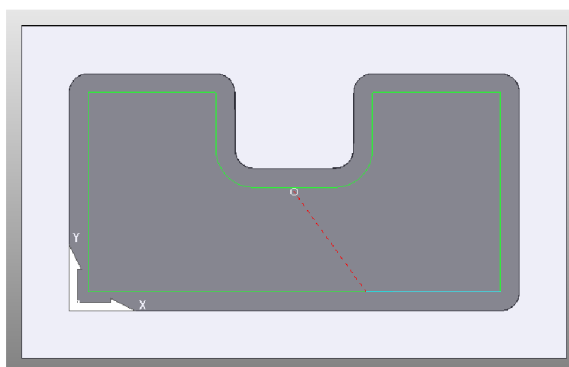
Pro dokončení po nástroji Aeromaster pr. 25 mm i pro nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI pr. 16 mm je využita stejná strategie.

Tab. 3.33 Celkový čas cyklu.

Název	Hodnota
Celkový čas	00:01:18



Obr. 3.34 Trajektorie dokončování komplexní kapsy ve 3D.



Obr. 3.35 Trajektorie dokončování komplexní kapsy.



### 3.3.4 Porovnání všech strategií frézování komplexní kapsy

Při porovnání (tab. 3.32) všech tří nástrojů a různých strategií, nejrychleji kapsu obrobil nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI pomocí strategie konturování. Strojní čas byl 149 sekund. Ve strojním čase byly započítány všechny produktivní i neproduktivní pohyby nástroje. Rozdíl mezi dvěma nejrychlejšími výsledky je 13 sekund. Rozdíl je větší než při simulacích strategií pro jednoduché kapsy.

Pro dosažení optimálních výsledků při frézování komplexní kapsy by tedy bylo vhodné použít nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI a obráběcí strategii konturování.

Tab. 3.34 Srovnání všech nástrojů pro jednoduchou kapsu.

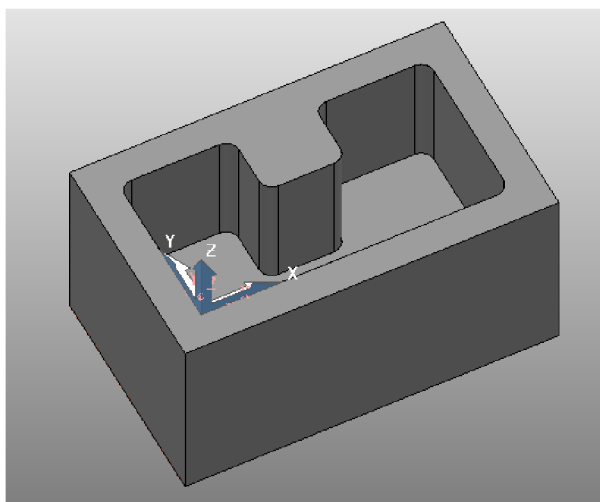
Aeromaster	Monolit JS453160E2R100.0Z3- HEMI	Plunge
		
Obr 3.36 Aeromaster [73].	Obr 3.37 Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].	Obr 3.38 Plunge [73].
<b>Nejrychlejší strategie (pro jednotlivé nástroje)</b>		
Řádkování	Konturování	-
<b>Nejnižší strojní čas (pro jednotlivé nástroje)</b>		
162s	149s	-

## 4 VERIFIKACE CNC PROGRAMU

### 4.1 Geometrie kapsy

Pro verifikaci byla zvolena strategie konturování nástrojem MONOLIT JS453160E2R100.0Z3-HEMI, která v simulacích vyšla jako neoptimálnější pro obrábění komplexního tvaru kapes.

Na obrázku Obr. 4.1 je znovu znázorněna geometrie obráběné kapsy.



Obr. 4.1 Model komplexní kapsy ve 3D zobrazení.

### 4.2 Obráběný materiál

Materiál používaný pro experimentální část bakalářské práce má označení 7475-T7351 a jedná se o hliníkovou slitinu využívanou v leteckém průmyslu vyvíjenou firmou Alcoa. Chemickým zápisem se značí AlZn5.5MgCu. Tato slitina patří do skupiny 7000- slitiny svařitelné, vytvrditelné za tepla; slitiny AlZnMg, většina slitin této skupiny je náchylná na korozní praskání pod napětím. Tento problém se snižuje změnou poměru zinku a magnesia (3:1), přidáním mědi nebo tepelným zpracováním [66,67,51].

Slitiny 7475 byly vyvinuty pro aplikace, které vyžadují vysokou odolnost proti vzniku únavových trhlin, lomovou houževnatost a vysokou pevnost [67].

Označení T7351 znamená, že je tato slitina tepelně zpracovaná a prošla procesem umělého stárnutí, aby bylo dosaženo vyšší korozivzdornosti a lepších mechanických vlastností [3,6].

#### 4.2.1 Mechanické vlastnosti slitiny 7475-T7351

##### Pevnost

Pevnostní vlastnosti slitiny hliníku 7475-T7351 znázorněné v tabulce Tab. 4.1.  
Tab. 4.1 [65, 51].

Název	Hodnota
Mez kluzu v tahu - Re [MPa]	460
Mez pevnosti v tahu- Rm [MPa]	380
Tažnost- A [%]	8

### 4.3 Nástroj

#### 4.3.1 Hrubování

Pro verifikaci strategií byl zvolen nástroj, který vyšel v porovnání simulací nejlépe a to JS453160E2R100.0Z3-HEMI- navržený firmou SECO. Jmenovitý průměr této monolitní frézy je 16 mm. Podrobný popis jeho geometrie i řezných podmínek se nachází v kapitole 3.2.2.



Obr. 4. 2 Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI [73].

#### Upínání nástrojů

Nástroj je tepelně upnut v upínači HSK-A63 D16 A120 CDB-01.



Obr. 4.3 Nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI v upínači HSK-A63 D16 A120 CDB-01.

#### Chlazení při obrábění

Na chlazení při obrábění byla použita procesní kapalina CIMSTAR 597 (CIMCOOL).

### 4.3.2 Dokončování

Pro dokončování byla použita fréza s průměrem 12 mm, fréza PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA s doporučenými řeznými podmínkami pro hliník.



Obr. 4.4 Monolit PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA [74].

### Upínání nástrojů

Upnuto v upínači PRAMET HC 2090 (HSK 63A).



Obr. 4.5 Nástroj PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA v upínači PRAMET HC 2090 (HSK 63A).

### Chlazení při obrábění

I při chlazení při dokončování byla použita procesní kapalina CIMSTAR 597 (CIMCOOL).

#### 4.4 Stroj

Pro provedení verifikace bylo zvoleno portálové obráběcí centrum MCV 1210 (Obr. 4.6) vyrobený firmou TAJMAC-ZPS. Obrábění může probíhat v pěti osách a proto je stroj vhodný k obrábění komplexních prostorových tvarů. Stroj se vyznačuje vysokou dynamikou, vysokou tuhostí a tlumícími vlastnostmi [34].

Pro experiment obrábění kapes bylo využito posuvů pouze ve třech základních osách (osy X, Y, Z), Stroj byl tedy v tomto případě předimenzovaný a stačil by i takový, který obrábí jen ve třech osách. Hlavním důvodem zvolení MCV 1210 byla potřeba vyšších otáček, protože slitiny hliníku, které nejsou tak tvrdé, se obrábí vyššími řeznými rychlostmi (500 m/min).



Obr. 4.6 Portálové obráběcí centrum MCV 1210.

Tab. 4.2 Technické parametry stroje [34].

<b>Pracovní pojedy</b>	
Osa X (křížový suport)	1 000 mm
Osa Y (příčník)	800 mm
Osa Z (smykadlo)	600 mm
<b>Pracovní stůl</b>	
Rozměr pracovního stolu	1 200 x 1 000 mm
Maximální zatížení	3 000 kg
<b>Vřeteno</b>	
Typ	elektrovřeteno Weiss 176 024_800
Rozsah otáček	0 – 18 000 1/min
Upínací kužel	HSK-A 63
Maximální krouticí moment	197 Nm
<b>Přesnost</b>	
Přesnost polohování v ose X, Y, Z	0,008 mm
Opakovací přesnost v ose X, Y Z	0,006 mm
<b>Nástrojový držák</b>	DIN 69 893 – HSK-A 63
<b>Automatický zásobník nástrojů</b>	
Při obsazených sousedních místech v zásobníku	80 mm
Při neobsazených sousedních místech v zásobníku	115 mm
Maximální délka nástroje	250 mm
Maximální hmotnost včetně držáku	6,5 kg
Řídicí systém	SINUMERIC 840D (SIEMENS)
<b>Požadavky na elektrickou energii</b>	
Přípojovací napětí	3 x 400 V/50 Hz
Příkon pracovní	45 kW
Proud při plném zatížení stroje	125 A

#### 4.4.1 NC program pro hrubování

Program pro nástroj Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI strategie konturování:

N10 ; Part Name : 7

N11 ; Program Name : 7\_Hrub\_offset\_fr\_16

N12 ; Program Date :

N13 ; Programmed by:

N14 ; PowerMILL Cb: 1111121

N15 ; DP Version : 1510

N16 ; Option File: S840D

N17 ; Output Workplane : Zákl.souř.system

N18 ;

N19 ; TOOL LIST: 1 tools

N20 ; No. ID Diameter Tip Rad Length

N21 ; 3 Freza prumer 16 mm 16.000 0.0 100.000

N22 ;

N23 ; ESTIMATED CUTTING TIME: 1 TOOLPATHS = 00:02:29

N24 ;

N25 G71 G90  
N26 G40 G55 G17  
N27 ; TOOL NUMBER: 3  
N28 ; TOOL TYPE: ENDMILL  
N29 ; TOOL ID: Freza prumer 16 mm  
N30 ; TOOL DIA. : 16.000  
N31 ; TOOL LENGTH : 100.000  
N32 T="Freza prumer 16 mm"  
N33 M6  
N34 D1  
N35 S9950 M3  
N36 COMPOF  
N37 TRAORI  
N38 G55  
N39 TRANS  
N40 ROT  
N41 TRANS X0.0 Y0.0 Z0.0  
N42 M11 M13  
N43 ORIWKS  
N44 G1 A2=0.0 B2=0.0 C2=0.0 F10000  
N45 ; =====  
N46 ; TOOLPATH : 7  
N47 ; ALLOWANCE : +0.100  
N48 ; WORKPLANE : World  
N49 ; =====  
N50 FFWON  
N51 SOFT  
N52 COMPCAD G642  
N53 ;TOL0.015)  
N54 ;JERK\_ON60)  
N55 M8  
N56 G1 X47.5 Y25.0 C0.0 A0.0 F10000  
N57 Z10.0 H3  
N58 M10 M12  
(viz Příloha 1)

#### 4.4.2 NC program pro dokončování

Program pro nástroj monolit PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA dokončování:

10 ; Part Name : 12  
N11 ; Program Name : 12\_Dok\_konstant\_Z\_fr\_12 mm  
N12 ; Program Date :  
N13 ; Programmed by :  
N14 ; PowerMILL Cb : 1111121  
N15 ; DP Version : 1510  
N16 ; Option File : S840D  
N17 ; Output Workplane : Zákl.souř.system  
N18 ;  
N19 ; TOOL LIST : 1 tools

```
N20 ; No. ID          Diameter Tip Rad Length
N21 ; 4 Freza prumer 12 mm 12.000 0.0 120.000
N22 ;
N23 ; ESTIMATED CUTTING TIME : 1 TOOLPATHS = 00:01:11
N24 ;
N25 G71 G90
N26 G40 G55 G17
N27 ; TOOL NUMBER : 4
N28 ; TOOL TYPE : ENDMILL
N29 ; TOOL ID : Freza prumer 12 mm
N30 ; TOOL DIA. : 12.000
N31 ; TOOL LENGTH : 120.000
;N32 T="Freza prumer 12 mm"
T="FR12_SUMA"
N33 M6
N34 D1
N35 S5305 M3
N36 COMPOF
N37 TRAORI
N38 G55
N39 TRANS
N40 ROT
N41 TRANS X0.0 Y0.0 Z0.0
N42 M11 M13
N43 ORIWKS
N44 G1 A2=0.0 B2=0.0 C2=0.0 F10000
N45 ; =====
N46 ; TOOLPATH : 12
N47 ; ALLOWANCE : +0.0
N48 ; WORKPLANE : World
N49 ; =====
N50 FFWON
N51 SOFT
N52 COMPCAD G642
N53 ;TOL0.015)
N54 ;JERK_ON60)
N55 M8
N56 G1 X47.5 Y25.0 C0.0 A0.0 F10000
N57 Z10.0 H4
N58 M10 M12
(viz Příloha 2)
```



## 4.5 Průběh a vyhodnocení experimentu

### 4.5.1 Verifikace frézovací strategie – polotovar z umělého dřeva

Po vypracování simulací a převedení programů pomocí postprocesoru na ISO program používaného stroje, byl upnut polotovar z umělého dřeva pro vyzkoušení simulace (Obr. 4.7 a Obr. 4.8). Nejprve bylo provedeno kontrolní projetí trajektorie nad obrobkem, aby byly doladěny případné nedokonalosti. Poté následovalo obrobení polotovaru z umělého dřeva.

Verifikace simulace, která v porovnání simulací vyšla nevýhodněji - strategie konturování, proběhla nástrojem Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI, válcovou frézou o průměru 16 mm. Při frézování do umělého dřeva byly použity navržené řezné podmínky. Výsledný strojní čas hrubování byl 2 min 44 s a dokončování 1 min 18 s. Reálné časy odpovídají časům, které byly nasimulované.



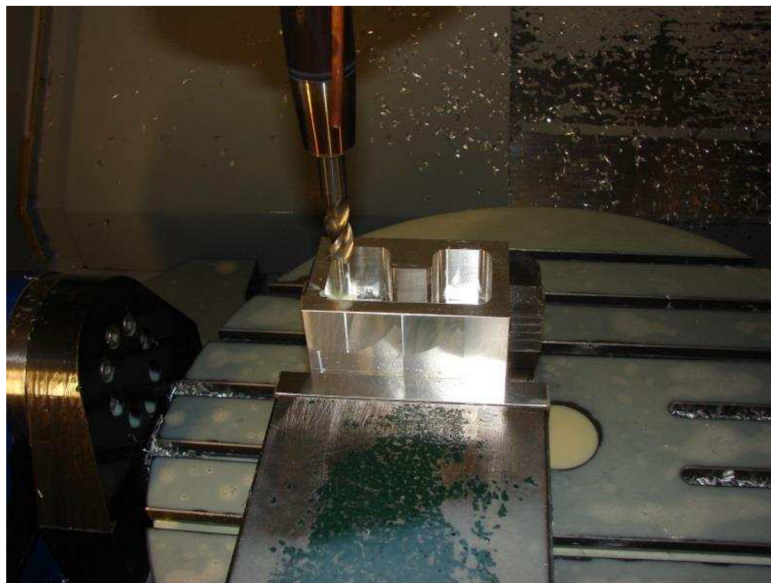
Obr. 4.7 Dokončená, obrobená kapsa v umělém dřevě.



Obr. 4.8 Obrobená kapsa v umělém dřevě po dokončení.

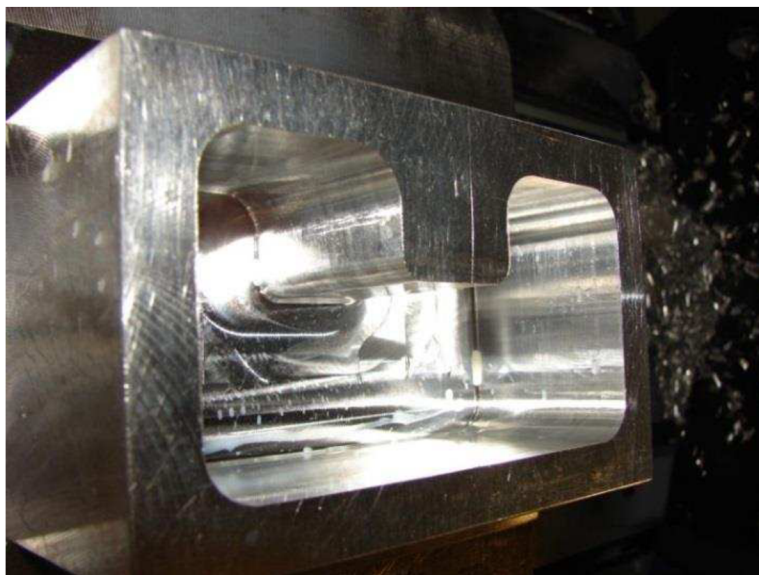
#### 4.5.2 Verifikace frézovací strategie – polotovary ze 7475-T7351

Polotovarem použitým pro reálnou verifikaci strategie frézování komplexní kapsy byl kvádr z hliníkové slitiny 7475-T7351 o rozměrech 110x70x60 mm (délka x šířka x výška), který byl upnutý ve strojním svěráku (Obr. 4.9). Strojní svěrák byl upnut pomocí šroubů k pracovnímu stolu.



Obr. 4.9 Kapsa po hrubování s nástrojem JS453160E2R100.0Z3-HEMI.

Při obrábění hliníku byla posuvová rychlost snížena na poloviční hodnotu ( $v_f=1790$  m/min) kvůli vibracím nástroje a jeho příliš velkému zatížení. Hodnota výsledného strojního času se sníženou posuvovou rychlostí byla 10 minut 56 sekund.



Obr. 4.10 Pohled na stěnu kapsy po hrubování.



Obr. 4. 11 Kapsa po hrubování, pohled shora.

Dokončování probíhalo také se sníženou posuvovou rychlostí o polovinu ( $v_f=742,5$  m/min) a i přes to docházelo k vibracím nástroje, které negativně ovlivnily kvalitu povrchu (Obr. 4. 11) Výsledný strojní čas se sníženou posuvovou rychlostí byl 5 minuty 52 sekund.



Obr. 4. 12 Detail nekvalitního povrchu kapsy v jednom z jejích rohů způsobený vibracemi dokončovacího nástroje.

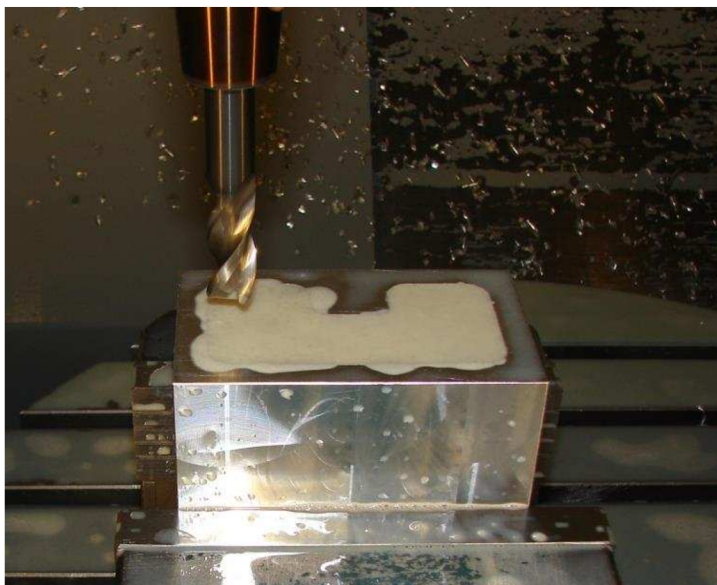
Dokončená kapsa má kvalitně obrobené stěny, ale v rozích je kvalita nižší z důvodu vibrace nástroje.



Obr. 4. 13 Dokončená kapsa s poloměrem R6.

Řešením tohoto nedostatku by bylo využití tužšího upínače s menším vyložení nástroje. Dále by se dalo využít způsob obrábění, kdy by nástroj odebíral materiál v několika průjezdech a několika krocích, aby se snížilo zatížení nástroje, také změna rezných podmínek by mohla ovlivnit výslednou kvalitu povrchu.

V průběhu frézování byla použita směs koncentráту procesní kapaliny CIMSTAR 597 - CIMCOOL (Obr. 4. 14).



Obr. 4. 14 Obrobená kapsa s procesní kapalinou.

Rohy obrobené dokončovacím nástrojem jsou velmi nekvalitní a to z důvodu vibrační nástroje. I přes snížení posuvové rychlosti, byly vibrace příliš podstatné a na kapsách jsou viditelné známky poškození rohů. V důsledku snížení posuvové rychlosti byl zvýšen strojní čas obrábění i při dokončování kapsy.

#### 4.5.3 Vyhodnocení kvality povrchu obrobené kapsy

Měření proběhlo pomocí dotykového drsnoměru TAYLOR HOBSON Surtronic S – 128. Tento přístroj se využívá pro univerzální měření kvality povrchu. Technické parametry viz příloha č. 3.

Měření bylo prováděno na třech místech kapsy obrobené hrubováním i dokončováním (rohy). První měřená plocha je nejdelsí stěna kapsy, na stěně naproti je měřená druhá plocha a třetí je naměřená v jednom z rohů kapsy.

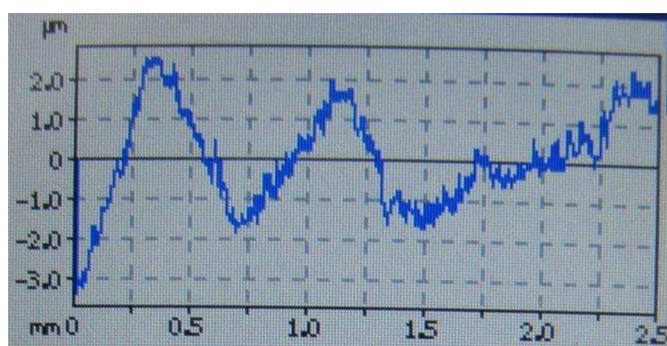
U obrobeného povrchu se posuzuje více parametrů, které udávají hodnotu kvality obrábění. Nejpoužívanější je mezinárodní parametr  $R_a$ - aritmetický průměr absolutních úchylek profilu drsnosti od střední čáry. Dalšími parametry, které byly měřeny v experimentální části jsou  $R_t$  (celková výška profilu v rámci vyhodnocované délky),  $R_v$  (maximální hloubka profilu pod střední čarou v rámci základní délky),  $R_p$  (maximální výška profilu nad střední čarou).

### První měřená stěna

Pro první ze stěn obrobene komplexní kapsy vyšly hodnoty velmi příznivě. Čím nižší číslo parametrů, tím lepší kvalita obrobene plochy. Jak již bylo řečeno, nejčastěji se kvalita drsnosti povrchu srovnává pomocí hodnoty Ra. V případě této stěny je hodnota Ra=0,9 [μm]. Takových hodnot se dosahuje při velmi jemném obrábění nebo broušení.

Kvalita povrchu je velmi vysoká a to také díky snížené posuvové rychlosti a  $a_p$  nástroje.  
Tab. 4.3 Výsledky měření.

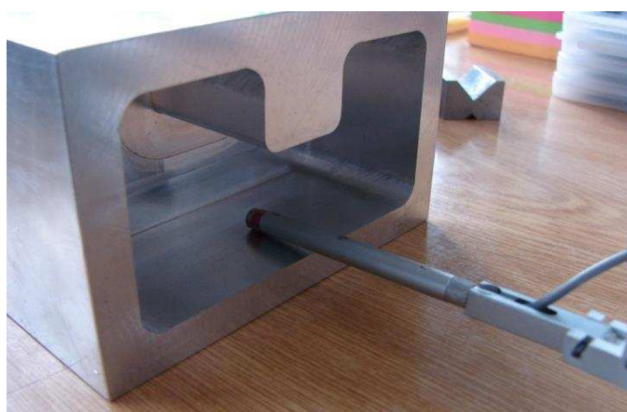
Parametry	Hodnota
Ra	0,9 [μm]
Rt	5,8 [μm]
Rv	3,3 [μm]
Rp	2,5 [μm]



Obr. 4. 15 Křivka profilu povrchu.



Obr. 4. 16 Drsnoměr AYLOR HOBSON Surtronic S – 128 a obrobena kapsa.



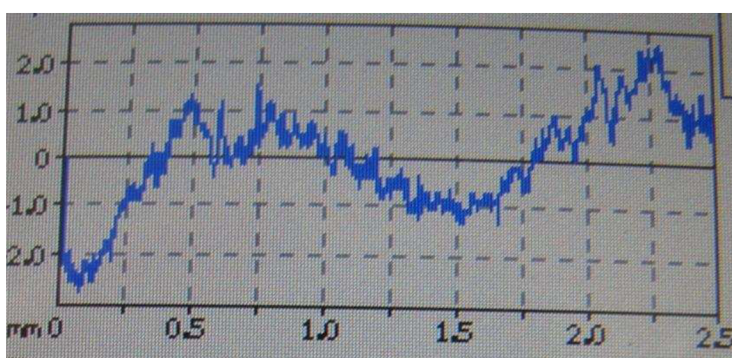
Obr. 4.17 Detail měření drsnosti povrchu na první ploše.

### Druhá měřená stěna

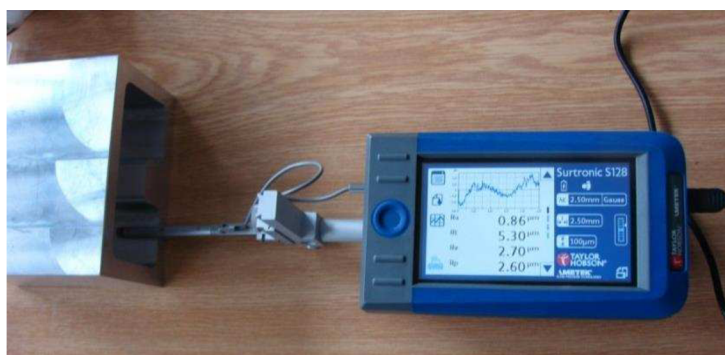
Další stěnou, na které byla zkoumána kvalita povrchu je plocha vedle zakřivení komplexního tvaru kapsy (Obr.): Ra, které nám nejlépe umožňuje sledovat rozdíly mezi různými obroběnými částmi, má hodnotu 0,86 [ $\mu\text{m}$ ]. Jako i u první měřené stěny je kvalita obrobění povrchu kapsy velice vysoká a to díky snížené posuvové rychlosti a  $a_p$  nástroje.

Tab. 4.4 Výsledky měření.

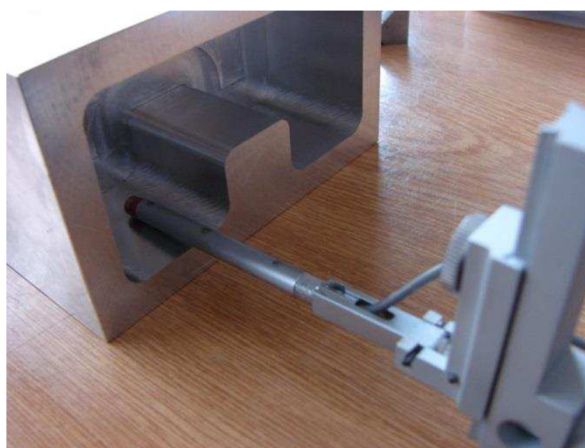
Parametry	Hodnota
Ra	0,86 [ $\mu\text{m}$ ]
Rt	5,3 [ $\mu\text{m}$ ]
Rv	2,7 [ $\mu\text{m}$ ]
Rp	2,6 [ $\mu\text{m}$ ]



Obr. 4.18 Křivka profilu povrchu.



Obr. 4. 19 Drsnoměr AYLOR HOBSON Surtronic S – 128 a měření druhé plochy.



Obr.4.20 Detail měření drsnosti povrchu na druhé ploše.

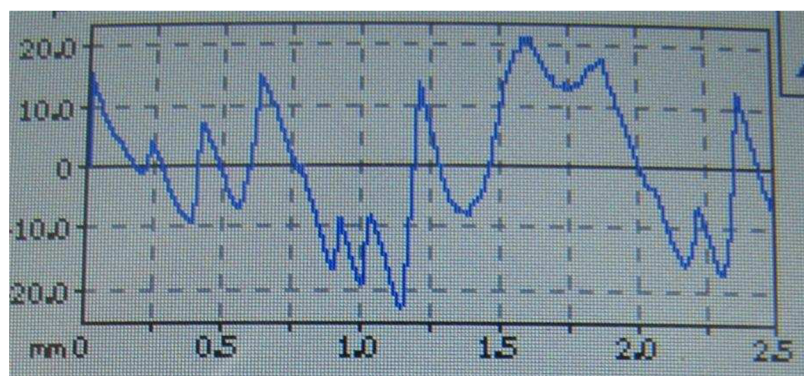
### Třetí měření: roh

Při pozorování rohů je zřejmé již od pohledu, že kvalita povrchu se bude lišit od kvality obrobeneých stěn. Vzhledem k vibracím, které vznikaly při obrábění, jsou tyto stěny viditelně nekvalitně obrobeneé.

Pomocí nástroje TAYLOR HOBSON Surtronic S – 128 byly naměřeny základní parametry a hlavní z nich, Ra, vyšel 8,80 [μm]. Takové kvality povrchu bývá dosaženo pomocí hrubování.

Tab. 4.5 Výsledky měření.

Parametry	Hodnota
Ra	8,80 [μm]
Rt	43,40 [μm]
Rv	22,30 [μm]
Rp	21,10 [μm]



Obr. 4. 21 Křivka profilu povrchu.



Obr. 4. 22 Drsnoměr AYLOR HOBSON Surtronic S – 128 a měření drsnosti v jednom z rohů kapsy.

### Shrnutí

Při porovnání naměřených hodnot na stěnách a v rohu obrobeneé kapsy je zřejmé, že kvalita obrobeneí nástrojem Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI (stěny kapsy) je mnohem vyšší než po dokončení nástrojem PRAMET 12E4S100-50A12 SUMA.

Obrobeneé stěny kapes mají Ra a další parametry s velmi nízkými hodnotami, což značí, že se jedná o velmi kvalitně obrobeneý povrch. Naopak kvalita obrobeneých rohů kapsy po

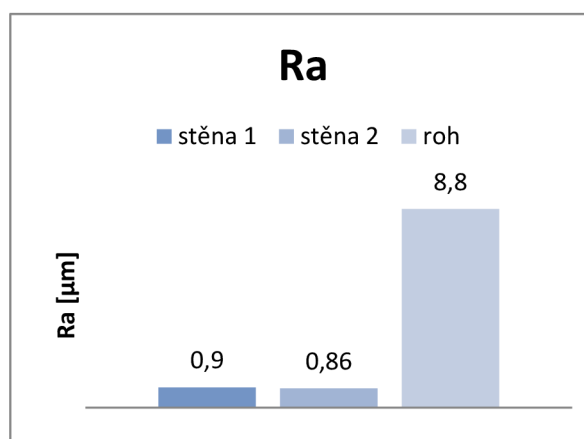
dokončování je viditelně nižší než okolní stěny. Z důvodu vibrační nástroje je povrch poškozený a Ra má hodnotu, která odpovídá spíše hrubování než dokončování, Ra= 8,80 [μm].

Je možné konstatovat, že díky sníženým řezným podmínkám bylo dosaženo lepších kvalitativních požadavků, ale to na úkor produktivity (strojní čas byl čtyřnásobně vyšší než oproti frézování do umělého dřeva).

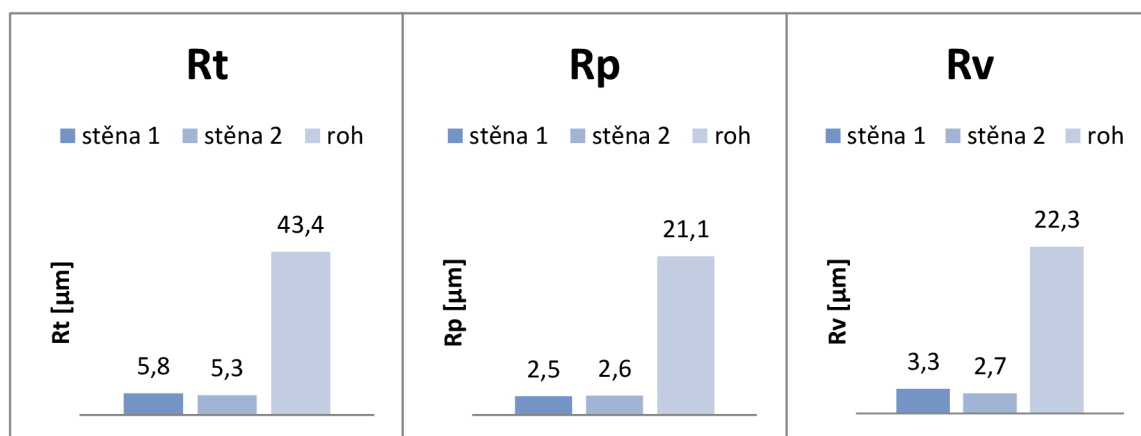
Možným řešením zlepšení kvality rohů by byla změna strategie frézování, výměna nástroje nebo změna řezných podmínek.

Tab. 4.6 Výsledky měření.

	stěna 1	stěna 2	roh
Ra [μm]	0,9	0,86	8,8
Rt [μm]	5,8	5,3	43,4
Rv [μm]	3,3	2,7	22,3
Rp [μm]	2,5	2,6	21,1



Obr. 4.23 Graf porovnání Ra.



Obr. 4.24 Grafy porovnání Rt, Rv, Rp.



## 5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou odlehčování součástí pomocí obrábění kapes jednoduchých i komplexních tvarů ve slitině hliníku. Dále představuje přehled možností strategií obrábění kapes a jejich simulace v NC programech. V experimentální části byla provedena verifikace vybrané simulace.

Při porovnání obrábění pomocí tří strategií odlehčování kapes (řádkováním, konturováním a ponorným obráběním) jsou výsledky nejproduktivnější strategie shodné pro kapsy jednoduchého i komplexního tvaru. Liší se obráběcím nástrojem. Jednoduchá kapsa byla nejrychleji obrobena nástrojem Aeromaster pomocí strategie konturování. Komplexní kapsa byla nejrychleji obrobena nástrojem Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI také pomocí strategie konturování.

Na základě výsledků získaných ze srovnání simulací lze konstatovat, že se pro běžnou výrobu jeví jako nejúčinnější způsob obrábění pomocí strategie konturování. Její výhody (nejnižší strojní čas) mohou být patrné při obrábění velkého množství kapes, kdy je hledisko produktivity jedním ze stěžejních bodů celé výroby.

V reálných aplikacích ve výrobě by měl být kladen důraz na správnou volbu nástrojů a jejich řezných podmínek, které ovlivňují průběh obrábění i kvalitu obrobeného povrchu polotovaru, která se může při různých řezných podmínkách velice lišit.

Závěry vyvozené z experimentální části:

- nástroj, který obrobí jednoduchou kapsu s nejnižším strojním časem (38s) je Aeromaster,
- nástroj, který obrobí komplexní kapsu s nejnižším strojním časem (149s) je Monolit JS453160E2R100.0Z3-HEMI,
- nejvýhodnější frézovací strategií je ve většině případů konturování,
- optimalizací strategie dokončování by se docílilo lepší kvality povrchu,
- optimalizací řezných podmínek a trajektorie nástroje by bylo možné snížit strojní čas obrábění,
- snížením posuvové rychlosti a  $a_p$  na poloviční hodnotu je dosaženo velmi dobré kvality povrchu  $R_a = 0,89 \mu\text{m}$  (na úkor zvýšení strojního času až čtyřikrát).

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] IBRAHIM, L., WASEEM, K., RAHMAN, M., ASMATULU, R. Mitigation of lightning strikes on composite aircraft via micro and nanoscale materials.(2017). *Advances in Nanotechnology*. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-the-outer-skin-of-Boeing-787-4\\_fig1\\_322486854](https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-the-outer-skin-of-Boeing-787-4_fig1_322486854)
- [2] KLAPKOVÁ, A. *Mechanické vlastnosti titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..
- [3] VEČEŘA, J. *Materiály používané v leteckém průmyslu*. Brno, 2011. 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D.
- [4] POULACHON, Gérard, Patric GHIDOSI, José OUTEIRO a David PRAT. *Procedes et moyens de fabrication: Support de cours- TPS*. Cluny, 2013.
- [5] LEYENS, Ch., PETERS, M. *Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications.*, [Online], [cit. 2005-1-28], dostupné na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/3527602119>
- [6] Nikl a jeho slitiny, titan a jeho slitiny [online], [cit 2011-5-15], dostupné na: [https://www.opi.zcu.cz/Nikl\\_titan.pdf](https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf)
- [7] SEDLÁČEK, V.: *Titan a jeho slitiny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. 203 s.
- [8] Prvky, [online], [cit. 2017-30-11]. Dostupné na: <http://www.prvky.com/13.html>
- [9] SLAVÍČEK, J. *Hliník a jeho slitiny v automobilovém průmyslu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..
- [10] *Hliník* [online], [cit. 2017-30-11], dostupné na: <https://www.alinvest.cz/hlinik/vlastnosti-hliniku>
- [11] LAŠTOVICA, Petr. *Použití hliníku a jeho slitin ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s. 45. Vedoucí práce Ing. Markéta Říhová.
- [12] PRZECZEK, J. *Nové slitiny hliníku v konstrukci letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.
- [13] VEČEŘA, J. *Materiály používané v leteckém průmyslu*. Brno, 2011. 51 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Simona Pospíšilová, Ph.D.
- [14] MICHNA, Š., et al. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov: Adin, 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [15] PETERS M., LEYENS C. *Aerospace and space materials* [online]. Institute of Materials Research, DLR, German Aerospace Center, Cologne, Germany. Dostupné na: <https://pdfs.semanticscholar.org/8a88/60c7c8b49f0103f64675a6d2fc10e915e0e6.pdf>

- [16] ROLEČEK, J. *Mechanické vlastnosti a struktura slitiny hliníku po tepelném zpracování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Juliš, Ph.D..
- [17] ROUČKA, J. a kol. *Metallurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [18] VIK, R. *Svařování hliníku a jeho slitin se zaměřením na vypracování vyučovací metodiky, didaktických postupů a učebních textů pro výuku ve svářečské škole EGE, spol. s r.o. v metodě svařování podle ČSN EN ISO 4063: 131 (MIG)*. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, 2016, 107s. Vedoucí práce: PaedDr. Bedřich Veselý, Ph.D.
- [19] *Hliník a slitiny hliník*, [online], [cit 2015-3-12], dostupné na: [https://www.opi.zcu.cz/download/Slitiny09\\_10.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/Slitiny09_10.pdf)
- [20] PÍŠEK, F. *Nauka o materiálu I: Nauka o kovech. 3. svazek. Neželezné kovy*. 2. přepracované vydání. Praha: Academia, 1973. 595 s.
- [21] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. S.r.o. Brno: CERM, 2002. 396 s.
- [22] DVOŘÁK, J. *Produktivní frézování hliníkových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2017. 53 s. 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.
- [23] ROŽEK, P., *Nové typy nástrojů pro frézování, frézovací hlavy, rozdělení frézek podle konstrukce*. Uherský Brod: Střední průmyslová škola Uherský Brod, 2010. 26 s. [Online], [cit 2061-10-11], dostupné na: <http://int.spsou-ub.cz/projekty/ov3000/STROJ/OBRABEC%20KOVU/OKINove%20typy%20nastroju%20pro%20frezovani.pdf>.
- [24] BARLIER, Claude, CAPPETELLI, Luc. *Méthodes en production en usinage*. Paris, 2013. ISBN 978-2-7135-3546-8
- [25] KOS, B. *Nástroje pro frézování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 28 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.
- [26] RAUCH, Matthieu et HASCOET, Jean-Yves, *Génération de trajectoires de tréflage et d'usinage trochoidal pour le vidage de poche*. [Online], [cit. 2008-1-09], dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/mechanics-and-industry/article/generation-de-trajectoires-de-treflage-et-dusinage-trochoidal-pour-le-vidage-de-poche/579082A6B1074037F53FA7FA50C03A6E>
- [27] TANG, K., CHOU, S.-Y., CHEN L.-L. An algorithm for reducing tool retractions in zigzag pocket machining, [online]. *Computer-Aided Design* 30 (1998) 123–129. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001044859700064X>
- [28] SELVARAJ, P & RADHAKRISHNAN, P. (2006). Algorithm for Pocket Milling using Zig-zag Tool Path. *Defence Science Journal*. 56. 10.14429/dsj.56.1876. Dostupné na: [publications.drdo.gov.in](http://publications.drdo.gov.in)
- [29] GUÉRIN, S. *Nouvelles stratégies d'usinage en ébauche: Trouchoide et tréflage*. Centre technique des industries mécaniques (CETIM), 2004. ISBN 2-85400-565-1.
- [30] *Upínání nástrojů*, [online], [cit. 2015-1-19], dostupné na: <http://www.grumant.cz/produkty/nastroje-pro-obrabeni/upinani-nastroju>

- [31] Harveyperformance. Intro to Trochoidal Milling, [Online], [cit. 2017-6-28], dostupné na: <http://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/introduction-trochoidal-milling/#top>
- [32] Sandvik, [Online], [cit. 2017-3-15], dostupné na: [https://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/milling/application\\_overview/holes\\_and\\_cavities/two\\_axes\\_ramping\\_linear](https://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/milling/application_overview/holes_and_cavities/two_axes_ramping_linear)
- [33] *Základy frézování, rozdělení frézek*, [Online], [cit. 2007-1-5]. Dostupné na: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=39628&revision=-1&instance=2>
- [34] *Portálové obráběcí centrum MCV 1210* [online]. [cit. 2017-04-28]. Tajmac-zps, technická data. Dostupné na: [http://www.tajmac-zps.cz/sites/tajmac-zps-2.os.zps/files/mcv1210\\_cz.pdf](http://www.tajmac-zps.cz/sites/tajmac-zps-2.os.zps/files/mcv1210_cz.pdf)
- [35] TaeguTec. *Druhy opotřebení břitů nástroje* [online], [cit. 2017-5-15], dostupné na: [http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka\\_obrabeni\\_321.pdf](http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_321.pdf)
- [36] Zozei, [Online], [cit. 2017-5-15], dostupné na: <http://zozei.sssebrno.cz/frezovani-rovinnych-ploch/>
- [37] OTKUR, M., LAZOGLU, I. Trochoidal milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, 47(9), pp.1324-1332.
- [38] KIM, H.-C. Tool path modification for optimized pocket milling. *International Journal of Production Research*. 2007, 45(24), pp. 5715-5729
- [39] ROMERO, P.E. et al. Influence of Pocket Geometry and Tool Path Strategy in pocket Milling of UNS A96063 Alloy. *Procedia Engineering*. 2003, 63, pp. 523-531.
- [40] DHANIK, S. & XIROUCHAKIS, P. *Int J Adv Manuf Technol* (2010) 50: 1101., dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2580-z>
- [41] ŠIMONEK, Pavel, Michal JELÍNEK a Aleš POLZER. *Aplikace CAD/CAM v technologii: (vzdělávací a tréninkový modul): učební text byl vytvořen v rámci projektu: OPUS - vzdělanostní síť k výrobním technologiím*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [42] JANDA, Jiří. *Analýza možností NC programování uzavřených kapes*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 78 s. 5 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.
- [43] Add strategy: Plunge roughing in HSM Express. Autodesk Community [online]. 2016 [cit. 2017-04-20]. Dostupné na: <https://forums.autodesk.com/t5/hsm-ideas/add-strategy-plunge-roughing-inhsm-express/idi-p/6222842>
- [44] DOTCHEVA, M., MILLWARD, H., The application of tolerance analysis to the theoretical and experimental evaluation of a CNC corner-milling operation, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 170, Issues 1–2, 2005, Pages 284-297, ISSN 0924-0136. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.016>.
- [45] Corner Engagement: How to Machine Corners [online], [cit. 2017-15-3], dostupné na: <http://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/corner-engagement/>

- [46] TOURNIER, C. a kol. *Usinage à grande vitesse*, 1. vydání, Dunod, Paříž, 2010, ISBN 978-2-10-051810-4
- [47] PAZDERA, L. *Vysokorychlostní frézování hliníkových slitin pro letecký průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 47 s., bez příloh., vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc..
- [48] LEKEŠ, Jonáš. *Frézování tenkostěnných součástí pro letecký průmysl: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 44 s., bez příloh., vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
- [49] Garvin Plain Milling Machines, [online], [cit. 2016-10-23], dostupné na: <http://www.lathes.co.uk/garvinmillers/page2.html>
- [50] *CNC stroje: 8 věcí, které jste o nich chtěli vědět a báli se zeptat*. Factoryautomation. [online], [cit. 2014-10-19], dostupné na: <https://factoryautomation.cz/cnc-stroje-8-veci-ktere-jste-o-nich-chteli-vedet-a-bali-se-zeptat/>
- [51] OHNIŠŤOVÁ, Petra. *Technologie frézování tenkostěnných součástí pro letecký průmysl*. Brno 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 152 s. 4 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc, Ing. David Prat, Ph.D.
- [52] *Upínání nástrojů*, Grumat. [online], [cit. 2016-1-3], dostupné na: <http://www.grumant.cz/produkty/nastroje-pro-obrabeni/upinani-nastroju>
- [53] *Obráběcí stroje*, Mikron Moravia, [Online], [cit. 2015-5-15], dostupné na: <http://www.mikronmoravia.cz/obrabeci-stroje-pinnacle/frezky/frezky-konzolove-fv/konzolova-frezka-serie-fv.html>
- [54] *Konzolové frézky*, MachineTech, [Online], [cit. 2017-5-4], dostupné na: <http://www.machinetech.cz/konzolove-frezky/univerzalni-frezka-uwf-110-servo.html>
- [55] 3-osé CNC obráběcí centra, Invoczec, [Online], [cit. 2015-1-9], dostupné na: <https://www.invocz.cz/3ose-cnc-obrabeci-centra>
- [56] NĚMEC, Dobroslav. *Strojírenská technologie 3: Strojní obrábění*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1982. Dostupné z: <https://eluc.krolomoucky.cz/verejne/lekce/1232>
- [57] *Frézování závitů*. Mlgeardesigns, [Online], [cit. 2015-4-15], dostupné na: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1504/frezovani-zavitu>
- [58] *Nářadí a nástroje*, [Online], [cit. 2014-5-26], dostupné na: [http://naradinastrojeuh.cz/nastroje\\_frezovani.php](http://naradinastrojeuh.cz/nastroje_frezovani.php)
- [59] *Nové konstrukce nástrojů s VBD*. MMspektrum [Online], [cit. 2015-5-6], dostupné na: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-konstrukce-nastroju-s-vbd.html>
- [60] *Měření opotřebení nástrojů*, Homel., [Online], [cit. 2017-4-17], Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_05.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf)
- [61] *Opotřebení a trvanlivost nástroje*, Moodle Trebesin. [Online], [cit. 2016-2-12]. Dostupné na: [https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9861/mod\\_resource/content/0/6%2C%20%20OPOT%20%20C5%98EBEN%20%20C3%8D%20A%20TRVANLIVOST%20N%20%20C3%81STROJE.pdf](https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9861/mod_resource/content/0/6%2C%20%20OPOT%20%20C5%98EBEN%20%20C3%8D%20A%20TRVANLIVOST%20N%20%20C3%81STROJE.pdf)

- [62] *Opotřebení břitů nástrojů ze slinitých karbidů*. MMSpektrum, [Online], [cit. 2005-02-02], dostupné na: <https://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html>
- [63] ROCHE, S. *La chaîne CFAO*. [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://marauder77150.free.fr/cfao.htm>
- [64] CHUDOBA, Milan. *Základy programování a obsluha CNC strojů: Učební text*. STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA, JIHLAVA. 2012. Dostupné z: [http://www2.sps-jia.cz/~hill/zakl\\_progr.pdf](http://www2.sps-jia.cz/~hill/zakl_progr.pdf)
- [65] Aluminum Metal suppliers online. 7475. Dostupné na: <http://www.supplieronline.com/propertypages/7475.asp#Spec>
- [66] Alcoa, Alloy 7475 Plate And Sheet. [Online], Dostupné na: [cit. 20014-06-01] <https://www.spacematdb.com/spacemat/manudatasheets/alloy7475techplatesheet>
- [67] HLA VATÝ I., ZMYDLENÝ T., *Hliník a jeho slitiny, Konstrukce z hliníku*. [Online], Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/3-3.pdf>
- [68] MÁDL, J. Optimalizace při obrábění (řezné parametry), [Online], [cit. 1998-02-03], dostupné na: <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/013/013.htm>
- [69] DOSTÁLOVÁ, M. Optimalizace operačních nákladů obráběcího procesu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 120 s., 4 příloh. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
- [70] TEC. *Technologie frézování*, [online], [cit. 2010-02-11]. Šumperk. Dostupné na: [http://www.sszts.cz/stary\\_web/stary\\_web/esf/TEC\\_fr.pdf](http://www.sszts.cz/stary_web/stary_web/esf/TEC_fr.pdf)
- [71] COPTKM. *Frézování tvarových ploch*, [online], [cit. 2008-01-01] Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=24567&revision=-1&instance=2>
- [72] IBRAHIM, L, WASEEM, K, RAHMAN, M., ASMATULU, R. Mitigation of lightning strikes on composite aircraft via micro and nanoscale materials.(2017). *Advances in Nanotechnology*. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-the-outer-skin-of-Boeing-787-4\\_fig1\\_322486854](https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-the-outer-skin-of-Boeing-787-4_fig1_322486854)
- [73] Seco, [online]. Dostupné z: <https://www.secotools.com>
- [74] Pramet, [online]. Dostupné na: [http://www.ilkametal.cz/sortiment/pramet/katalogy/monolitni\\_frezy.pdf](http://www.ilkametal.cz/sortiment/pramet/katalogy/monolitni_frezy.pdf)
- [75] Vlastnosti titanu, Totalmateria, [online], Dostupné na: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=TitaniumProperties&LN=CZ>
- [76] Cotton F.A., Wilkinson J.: *Anorganická chemie, souborné zpracování pro pokročilé*, ACADEMIA, Praha 1973
- [77] JAREŠ, Vojtěch. *Lehké kovy*. 2. vyd. Praha: Česká matice technická, 1944. 163 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer-aided design (počítačem podporované projektování)
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing (počítačová podpora obrábění)
CNC	[-]	Computer Numeric Control (číslicové řízení počítačem)
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
NC	[-]	Numerical control (Číslicové ovládání strojů)
PVD	[-]	Physical Vapour Deposition (nanášení odpařením z pevné fáze)

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
AN	[°]	Hlavní úhel hřbetu
APMX	[mm]	Maximální hloubka řezu
CEDC	[-]	Počet břitů
CGT	[-]	Typová řada nástroje
DC	[mm]	Obráběcí průměr
dh6/D/DMM	[mm]	Průměr stopky / otvoru pro trn
DN	[mm]	Průměr krčku
GAMF	[°]	Radiální úhel čela
GAMP	[°]	Axiální úhel čela
INSL	[mm]	Délka destičky
KAPR	[°]	Úhel nastavení ostří nástroje
L	[mm]	Teoretická délka břitu
LE	[mm]	Efektivní délka řezné hrany
LN	[mm]	Délka krčku
LPR	[mm]	Vysunutá délka
LS	[mm]	Délka stopky
LSCN	[mm]	Minimální upínací délka

LUX	[mm]	Využitelná max. délka
OAL	[mm]	Celková délka
R/RE	[mm]	Rohový rádius
R <sub>a</sub>	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R <sub>e</sub>	[MPa]	Mez kluzu v tahu
R <sub>p</sub>	[μm]	Maximální výška profilu nad střední čarou
R <sub>m</sub>	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R <sub>v</sub>	[MPa]	Maximální hloubka profilu pod střední čarou v rámci základní délky
S	[mm]	Tloušťka destičky
S128	S128	S128
RMPX	[°]	Max. úhel zafrézování
RPMX	[rpm]	Maximální otáčky
Z/ZEFP	[-]	Počet efektivních obvodových břitů
ZNP	[-]	Celkový počet funkčních břitů nástroje
a <sub>p</sub>	[mm]	Hloubka záběru třísky
f <sub>z</sub>	[mm]	Posuv na zub
n	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky vřetene
v <sub>c</sub>	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
v <sub>f</sub>	[mm/min]	Velikost posuvu
α	[°]	Maximální úhel zanoření



**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      NC program pro hrubování  
Příloha 2      NC program pro dokončování  
Příloha 3      Technické specifikace drsnoměru Surtronic S128

## PŘÍLOHA 1

Program pro nástroj monolit strategie konturování

N10 ; Part Name : 7  
N11 ; Program Name : 7\_Hrub\_offset\_fr\_16  
N12 ; Program Date :  
N13 ; Programmed by :  
N14 ; PowerMILL Cb : 1111121  
N15 ; DP Version : 1510  
N16 ; Option File : S840D  
N17 ; Output Workplane : Zákl.souř.system  
N18 ;  
N19 ; TOOL LIST : 1 tools  
N20 ; No. ID Diameter Tip Rad  
Length  
N21 ; 3 Freza prumer 16 mm 16.000 0.0  
100.000  
N22 ;  
N23 ; ESTIMATED CUTTING TIME : 1  
TOOLPATHS = 00:02:29  
N24 ;  
N25 G71 G90  
N26 G40 G55 G17  
N27 ; TOOL NUMBER : 3  
N28 ; TOOL TYPE : ENDMILL  
N29 ; TOOL ID : Freza prumer 16 mm  
N30 ; TOOL DIA. : 16.000  
N31 ; TOOL LENGTH : 100.000  
N32 T="Freza prumer 16 mm"  
N33 M6  
N34 D1  
N35 S9950 M3  
N36 COMPOF  
N37 TRAORI  
N38 G55  
N39 TRANS  
N40 ROT  
N41 TRANS X0.0 Y0.0 Z0.0  
N42 M11 M13  
N43 ORIWKS  
N44 G1 A2=0.0 B2=0.0 C2=0.0 F10000  
N45 ; =====  
N46 ; TOOLPATH : 7  
N47 ; ALLOWANCE : +0.100  
N48 ; WORKPLANE : World  
N49 ; =====  
N50 FFWON  
N51 SOFT  
N52 COMPCAD G642  
N53 ;TOL0.015)  
N54 ;JERK\_ON60)

N55 M8  
N56 G1 X47.5 Y25.0 C0.0 A0.0 F10000  
N57 Z10.0 H3  
N58 M10 M12  
N59 X68.1 Y39.183 F40000.0  
N60 Z5.0  
N61 Y34.048 Z4.095 F150.0  
N62 X68.089 Y33.483 Z3.995  
N63 X68.051 Y32.917 Z3.895  
N64 X67.987 Y32.352 Z3.795  
N65 X67.895 Y31.786 Z3.694  
N66 X67.776 Y31.221 Z3.592  
N67 X67.628 Y30.655 Z3.489  
N68 X67.45 Y30.09 Z3.384  
N69 X67.293 Y29.657 Z3.303  
N70 X67.0 Y28.959 Z3.17  
N71 X66.727 Y28.402 Z3.06  
N72 X66.407 Y27.828 Z2.944  
N73 X66.049 Y27.262 Z2.826  
N74 X65.647 Y26.697 Z2.704  
N75 X65.192 Y26.131 Z2.576  
N76 X64.675 Y25.566 Z2.441  
N77 X64.465 Y25.355 Z2.389  
N78 X64.087 Y25.0 Z2.297  
N79 X63.9 Y24.835 Z2.253  
N80 X63.41 Y24.434 Z2.142  
N81 X62.769 Y23.971 Z2.002  
N82 X62.203 Y23.611 Z1.884  
N83 X61.656 Y23.303 Z1.773  
N84 X61.072 Y23.014 Z1.659  
N85 X60.507 Y22.771 Z1.55  
N86 X59.941 Y22.561 Z1.444  
N87 X59.376 Y22.381 Z1.339  
N88 X58.81 Y22.231 Z1.236  
N89 X58.245 Y22.11 Z1.134  
N90 X57.679 Y22.017 Z1.033  
N91 X57.114 Y21.951 Z0.933  
N92 X56.548 Y21.912 Z0.833  
N93 X55.983 Y21.9 Z0.733  
N94 X39.017 Z-2.258  
N95 X38.452 Y21.912 Z-2.358  
N96 X37.886 Y21.951 Z-2.458  
N97 X37.321 Y22.017 Z-2.558  
N98 X36.755 Y22.11 Z-2.659  
N99 X36.19 Y22.231 Z-2.761  
N100 X35.624 Y22.381 Z-2.864  
N101 X35.059 Y22.561 Z-2.969  
N102 X34.578 Y22.738 Z-3.059  
N103 X33.928 Y23.014 Z-3.184  
N104 X33.362 Y23.294 Z-3.295  
N105 X32.797 Y23.611 Z-3.409  
N106 X32.385 Y23.869 Z-3.495  
N107 X31.666 Y24.376 Z-3.65

N108 X31.1 Y24.835 Z-3.778  
N109 X30.913 Y25.0 Z-3.822  
N110 X30.535 Y25.355 Z-3.914  
N111 X30.325 Y25.566 Z-3.966  
N112 X29.808 Y26.131 Z-4.101  
N113 X29.404 Y26.629 Z-4.214  
N114 X28.951 Y27.262 Z-4.352  
N115 X28.593 Y27.828 Z-4.469  
N116 X28.278 Y28.393 Z-4.584  
N117 X28.0 Y28.959 Z-4.695  
N118 X27.759 Y29.524 Z-4.803  
N119 X27.55 Y30.09 Z-4.909  
N120 X27.372 Y30.655 Z-5.014  
N121 X27.224 Y31.221 Z-5.117  
N122 X27.142 Y31.597 Z-5.185  
N123 X27.013 Y32.352 Z-5.32  
N124 X26.949 Y32.917 Z-5.42  
N125 X26.911 Y33.483 Z-5.52  
N126 X26.9 Y34.048 Z-5.62  
N127 Y41.899 Z-7.004  
N128 X8.1 Y41.9 Z-10.318  
N129 Y25.0 Z-13.297  
N130 Y8.101 F3580.0  
N131 X86.9 Y8.1  
N132 Y8.6  
N133 Y25.0  
N134 G3 X82.98 Y28.92 I-3.92 J0.0  
N135 X79.06 Y25.0 I0.0 J-3.92  
N136 G1 Y16.1  
N137 X79.04 Y16.022  
N138 X78.978 Y15.961  
N139 X78.9 Y15.94  
N140 X65.137  
N141 X65.067 Y15.956  
N142 X65.0 Y16.017  
N143 X64.978 Y16.114  
N144 X65.011 Y16.198  
N145 X65.066 Y16.244  
N146 X65.134 Y16.277  
N147 X65.32 Y16.372  
N148 X65.503 Y16.472  
N149 X66.05 Y16.78  
N150 X66.232 Y16.886  
N151 X66.411 Y16.997  
N152 X66.977 Y17.356  
N153 X67.17 Y17.483  
N154 X67.359 Y17.615  
N155 X68.0 Y18.079  
N156 X68.188 Y18.219  
N157 X68.372 Y18.364  
N158 X68.861 Y18.764  
N159 X68.973 Y18.858  
N160 X69.084 Y18.953

N161 X69.271 Y19.119  
N162 X69.362 Y19.2  
N163 X69.451 Y19.282  
N164 X69.829 Y19.637  
N165 X69.927 Y19.73  
N166 X70.024 Y19.826  
N167 X70.233 Y20.037  
N168 X70.349 Y20.155  
N169 X70.462 Y20.277  
N170 X70.979 Y20.842  
N171 X71.142 Y21.026  
N172 X71.299 Y21.214  
N173 X71.754 Y21.78  
N174 X71.898 Y21.964  
N175 X72.036 Y22.153  
N176 X72.438 Y22.718  
N177 X72.56 Y22.894  
N178 X72.676 Y23.072  
N179 X73.033 Y23.638  
N180 X73.146 Y23.822  
N181 X73.254 Y24.009  
N182 X73.574 Y24.583  
N183 X73.674 Y24.768  
N184 X73.769 Y24.955  
N185 X74.041 Y25.512  
N186 X74.138 Y25.716  
N187 X74.228 Y25.923  
N188 X74.521 Y26.621  
N189 X74.593 Y26.799  
N190 X74.661 Y26.978  
N191 X74.818 Y27.411  
N192 X74.876 Y27.576  
N193 X74.93 Y27.741  
N194 X75.108 Y28.306  
N195 X75.16 Y28.482  
N196 X75.209 Y28.659  
N197 X75.358 Y29.225  
N198 X75.406 Y29.415  
N199 X75.448 Y29.605  
N200 X75.567 Y30.171  
N201 X75.603 Y30.351  
N202 X75.635 Y30.532  
N203 X75.726 Y31.097  
N204 X75.754 Y31.281  
N205 X75.777 Y31.465  
N206 X75.841 Y32.031  
N207 X75.86 Y32.214  
N208 X75.874 Y32.398  
N209 X75.912 Y32.964  
N210 X75.922 Y33.146  
N211 X75.927 Y33.329  
N212 X75.938 Y33.895  
N213 X75.939 Y33.903

N214 X75.96 Y33.98  
N215 X76.021 Y34.04  
N216 X76.099 Y34.06  
N217 X78.9  
N218 X78.978 Y34.039  
N219 X79.04 Y33.978  
N220 X79.06 Y33.9  
N221 Y25.0  
N222 G3 X82.98 Y21.08 I3.92 J0.0  
N223 X86.9 Y25.0 I0.0 J3.92  
N224 G1 Y41.899  
N225 X68.1 Y41.9  
N226 Y34.048  
N227 X68.089 Y33.483  
N228 X68.051 Y32.917  
N229 X67.987 Y32.352  
N230 X67.895 Y31.786  
N231 X67.776 Y31.221  
N232 X67.628 Y30.655  
N233 X67.45 Y30.09  
N234 X67.293 Y29.657  
N235 X67.0 Y28.959  
N236 X66.727 Y28.402  
N237 X66.407 Y27.828  
N238 X66.049 Y27.262  
N239 X65.647 Y26.697  
N240 X65.192 Y26.131  
N241 X64.675 Y25.566  
N242 X64.465 Y25.355  
N243 X64.087 Y25.0  
N244 X63.9 Y24.835  
N245 X63.41 Y24.434  
N246 X62.769 Y23.971  
N247 X62.203 Y23.611  
N248 X61.656 Y23.303  
N249 X61.072 Y23.014  
N250 X60.507 Y22.771  
N251 X59.941 Y22.561  
N252 X59.376 Y22.381  
N253 X58.81 Y22.231  
N254 X58.245 Y22.11  
N255 X57.679 Y22.017  
N256 X57.114 Y21.951  
N257 X56.548 Y21.912  
N258 X55.983 Y21.9  
N259 X39.017  
N260 X38.452 Y21.912  
N261 X37.886 Y21.951  
N262 X37.321 Y22.017  
N263 X36.755 Y22.11  
N264 X36.19 Y22.231  
N265 X35.624 Y22.381  
N266 X35.059 Y22.561  
N267 X34.578 Y22.738  
N268 X33.928 Y23.014  
N269 X33.362 Y23.294  
N270 X32.797 Y23.611  
N271 X32.385 Y23.869  
N272 X31.666 Y24.376  
N273 X31.1 Y24.835  
N274 X30.913 Y25.0  
N275 X30.535 Y25.355  
N276 X30.325 Y25.566  
N277 X29.808 Y26.131  
N278 X29.404 Y26.629  
N279 X28.951 Y27.262  
N280 X28.593 Y27.828  
N281 X28.278 Y28.393  
N282 X28.0 Y28.959  
N283 X27.759 Y29.524  
N284 X27.55 Y30.09  
N285 X27.372 Y30.655  
N286 X27.224 Y31.221  
N287 X27.142 Y31.597  
N288 X27.013 Y32.352  
N289 X26.949 Y32.917  
N290 X26.911 Y33.483  
N291 X26.9 Y34.048  
N292 Y41.899  
N293 X8.1 Y41.9  
N294 Y25.0  
N295 G3 X12.02 Y21.08 I3.92 J0.0  
N296 X15.94 Y25.0 I0.0 J3.92  
N297 G1 Y33.9  
N298 X15.961 Y33.978  
N299 X16.022 Y34.039  
N300 X16.1 Y34.06  
N301 X18.901  
N302 X18.979 Y34.04  
N303 X19.04 Y33.98  
N304 X19.061 Y33.903  
N305 X19.062 Y33.894  
N306 X19.073 Y33.329  
N307 X19.078 Y33.146  
N308 X19.088 Y32.964  
N309 X19.126 Y32.398  
N310 X19.14 Y32.214  
N311 X19.159 Y32.031  
N312 X19.223 Y31.465  
N313 X19.251 Y31.247  
N314 X19.285 Y31.031  
N315 X19.414 Y30.276  
N316 X19.445 Y30.105  
N317 X19.48 Y29.934  
N318 X19.562 Y29.558  
N319 X19.6 Y29.391

N320 X19.642 Y29.225  
N321 X19.791 Y28.66  
N322 X19.84 Y28.482  
N323 X19.893 Y28.306  
N324 X20.07 Y27.741  
N325 X20.131 Y27.556  
N326 X20.196 Y27.373  
N327 X20.405 Y26.807  
N328 X20.475 Y26.625  
N329 X20.549 Y26.445  
N330 X20.79 Y25.879  
N331 X20.873 Y25.693  
N332 X20.96 Y25.509  
N333 X21.237 Y24.943  
N334 X21.332 Y24.756  
N335 X21.432 Y24.571  
N336 X21.748 Y24.006  
N337 X21.855 Y23.82  
N338 X21.967 Y23.638  
N339 X22.324 Y23.072  
N340 X22.448 Y22.883  
N341 X22.577 Y22.697  
N342 X23.03 Y22.064  
N343 X23.17 Y21.875  
N344 X23.315 Y21.69  
N345 X23.72 Y21.192  
N346 X23.868 Y21.015  
N347 X24.021 Y20.842  
N348 X24.538 Y20.277  
N349 X24.651 Y20.155  
N350 X24.766 Y20.037  
N351 X24.976 Y19.826  
N352 X25.073 Y19.731  
N353 X25.171 Y19.637  
N354 X25.548 Y19.282  
N355 X25.638 Y19.2  
N356 X25.729 Y19.119  
N357 X25.916 Y18.953  
N358 X26.038 Y18.848  
N359 X26.163 Y18.745  
N360 X26.728 Y18.286  
N361 X26.934 Y18.125  
N362 X27.146 Y17.97  
N363 X27.865 Y17.463  
N364 X28.046 Y17.339  
N365 X28.231 Y17.22  
N366 X28.644 Y16.962  
N367 X28.799 Y16.868  
N368 X28.956 Y16.777  
N369 X29.521 Y16.459  
N370 X29.705 Y16.359  
N371 X29.891 Y16.264  
N372 X29.932 Y16.244

N373 X29.987 Y16.198  
N374 X30.02 Y16.114  
N375 X29.998 Y16.018  
N376 X29.931 Y15.957  
N377 X29.861 Y15.94  
N378 X16.1 Y15.941  
N379 X16.022 Y15.961  
N380 X15.96 Y16.022  
N381 X15.94 Y16.101  
N382 Y25.0  
N383 G3 X12.02 Y26.624 I-2.296 J0.0  
N384 G2 X8.1 Y25.0 I-3.92 J3.92  
N385 G1 Z10.0 F40000.0  
N386 X68.1 Y39.183  
N387 Z-8.297  
N388 Y34.048 Z-9.203 F150.0  
N389 X68.089 Y33.483 Z-9.302  
N390 X68.051 Y32.917 Z-9.402  
N391 X67.987 Y32.352 Z-9.503  
N392 X67.895 Y31.786 Z-9.604  
N393 X67.776 Y31.221 Z-9.706  
N394 X67.628 Y30.655 Z-9.809  
N395 X67.45 Y30.09 Z-9.913  
N396 X67.293 Y29.657 Z-9.994  
N397 X67.0 Y28.959 Z-10.128  
N398 X66.727 Y28.402 Z-10.237  
N399 X66.407 Y27.828 Z-10.353  
N400 X66.049 Y27.262 Z-10.471  
N401 X65.647 Y26.697 Z-10.593  
N402 X65.192 Y26.131 Z-10.721  
N403 X64.675 Y25.566 Z-10.856  
N404 X64.465 Y25.355 Z-10.909  
N405 X64.087 Y25.0 Z-11.0  
N406 X63.9 Y24.835 Z-11.044  
N407 X63.41 Y24.434 Z-11.156  
N408 X62.769 Y23.971 Z-11.295  
N409 X62.203 Y23.611 Z-11.413  
N410 X61.656 Y23.303 Z-11.524  
N411 X61.072 Y23.014 Z-11.639  
N412 X60.507 Y22.771 Z-11.748  
N413 X59.941 Y22.561 Z-11.854  
N414 X59.376 Y22.381 Z-11.958  
N415 X58.81 Y22.231 Z-12.062  
N416 X58.245 Y22.11 Z-12.164  
N417 X57.679 Y22.017 Z-12.265  
N418 X57.114 Y21.951 Z-12.365  
N419 X56.548 Y21.912 Z-12.465  
N420 X55.983 Y21.9 Z-12.565  
N421 X39.017 Z-15.555  
N422 X38.452 Y21.912 Z-15.655  
N423 X37.886 Y21.951 Z-15.755  
N424 X37.321 Y22.017 Z-15.855  
N425 X36.755 Y22.11 Z-15.956

N426 X36.19 Y22.231 Z-16.058  
N427 X35.624 Y22.381 Z-16.162  
N428 X35.059 Y22.561 Z-16.266  
N429 X34.578 Y22.738 Z-16.357  
N430 X33.928 Y23.014 Z-16.481  
N431 X33.362 Y23.294 Z-16.592  
N432 X32.797 Y23.611 Z-16.707  
N433 X32.385 Y23.869 Z-16.792  
N434 X31.666 Y24.376 Z-16.947  
N435 X31.1 Y24.835 Z-17.076  
N436 X30.913 Y25.0 Z-17.12  
N437 X30.535 Y25.355 Z-17.211  
N438 X30.325 Y25.566 Z-17.264  
N439 X29.808 Y26.131 Z-17.399  
N440 X29.404 Y26.629 Z-17.512  
N441 X28.951 Y27.262 Z-17.649  
N442 X28.593 Y27.828 Z-17.767  
N443 X28.278 Y28.393 Z-17.881  
N444 X28.0 Y28.959 Z-17.992  
N445 X27.759 Y29.524 Z-18.101  
N446 X27.55 Y30.09 Z-18.207  
N447 X27.372 Y30.655 Z-18.311  
N448 X27.224 Y31.221 Z-18.414  
N449 X27.142 Y31.597 Z-18.482  
N450 X27.013 Y32.352 Z-18.617  
N451 X26.949 Y32.917 Z-18.718  
N452 X26.911 Y33.483 Z-18.818  
N453 X26.9 Y34.048 Z-18.917  
N454 Y41.899 Z-20.301  
N455 X8.1 Y41.9 Z-23.616  
N456 Y25.0 Z-26.595  
N457 Y8.101 F3580.0  
N458 X86.9 Y8.1  
N459 Y8.6  
N460 Y25.0  
N461 G3 X82.98 Y28.92 I-3.92 J0.0  
N462 X79.06 Y25.0 I0.0 J-3.92  
N463 G1 Y16.1  
N464 X79.04 Y16.022  
N465 X78.978 Y15.961  
N466 X78.9 Y15.94  
N467 X65.137  
N468 X65.067 Y15.956  
N469 X65.0 Y16.017  
N470 X64.978 Y16.114  
N471 X65.011 Y16.198  
N472 X65.066 Y16.244  
N473 X65.134 Y16.277  
N474 X65.32 Y16.372  
N475 X65.503 Y16.472  
N476 X66.05 Y16.78  
N477 X66.232 Y16.886  
N478 X66.411 Y16.997  
N479 X66.977 Y17.356  
N480 X67.17 Y17.483  
N481 X67.359 Y17.615  
N482 X68.0 Y18.079  
N483 X68.188 Y18.219  
N484 X68.372 Y18.364  
N485 X68.861 Y18.764  
N486 X68.974 Y18.858  
N487 X69.084 Y18.953  
N488 X69.272 Y19.119  
N489 X69.362 Y19.2  
N490 X69.451 Y19.282  
N491 X69.829 Y19.637  
N492 X69.927 Y19.73  
N493 X70.024 Y19.826  
N494 X70.233 Y20.037  
N495 X70.349 Y20.155  
N496 X70.462 Y20.277  
N497 X70.979 Y20.842  
N498 X71.142 Y21.026  
N499 X71.299 Y21.214  
N500 X71.754 Y21.78  
N501 X71.898 Y21.964  
N502 X72.036 Y22.153  
N503 X72.438 Y22.718  
N504 X72.56 Y22.894  
N505 X72.676 Y23.072  
N506 X73.033 Y23.638  
N507 X73.146 Y23.822  
N508 X73.254 Y24.009  
N509 X73.574 Y24.583  
N510 X73.674 Y24.768  
N511 X73.769 Y24.955  
N512 X74.041 Y25.512  
N513 X74.138 Y25.716  
N514 X74.228 Y25.923  
N515 X74.521 Y26.621  
N516 X74.593 Y26.799  
N517 X74.661 Y26.978  
N518 X74.818 Y27.411  
N519 X74.876 Y27.576  
N520 X74.93 Y27.741  
N521 X75.108 Y28.306  
N522 X75.16 Y28.482  
N523 X75.209 Y28.659  
N524 X75.358 Y29.225  
N525 X75.406 Y29.415  
N526 X75.448 Y29.606  
N527 X75.567 Y30.171  
N528 X75.603 Y30.351  
N529 X75.634 Y30.532  
N530 X75.726 Y31.097  
N531 X75.754 Y31.281

N532 X75.777 Y31.465  
N533 X75.841 Y32.031  
N534 X75.86 Y32.214  
N535 X75.874 Y32.398  
N536 X75.912 Y32.964  
N537 X75.922 Y33.146  
N538 X75.927 Y33.329  
N539 X75.939 Y33.895  
N540 Y33.903  
N541 X75.96 Y33.98  
N542 X76.021 Y34.04  
N543 X76.099 Y34.06  
N544 X78.9  
N545 X78.978 Y34.039  
N546 X79.04 Y33.978  
N547 X79.06 Y33.9  
N548 Y25.0  
N549 G3 X82.98 Y21.08 I3.92 J0.0  
N550 X86.9 Y25.0 I0.0 J3.92  
N551 G1 Y41.899  
N552 X68.1 Y41.9  
N553 Y34.048  
N554 X68.089 Y33.483  
N555 X68.051 Y32.917  
N556 X67.987 Y32.352  
N557 X67.895 Y31.786  
N558 X67.776 Y31.221  
N559 X67.628 Y30.655  
N560 X67.45 Y30.09  
N561 X67.293 Y29.657  
N562 X67.0 Y28.959  
N563 X66.727 Y28.402  
N564 X66.407 Y27.828  
N565 X66.049 Y27.262  
N566 X65.647 Y26.697  
N567 X65.192 Y26.131  
N568 X64.675 Y25.566  
N569 X64.465 Y25.355  
N570 X64.087 Y25.0  
N571 X63.9 Y24.835  
N572 X63.41 Y24.434  
N573 X62.769 Y23.971  
N574 X62.203 Y23.611  
N575 X61.656 Y23.303  
N576 X61.072 Y23.014  
N577 X60.507 Y22.771  
N578 X59.941 Y22.561  
N579 X59.376 Y22.381  
N580 X58.81 Y22.231  
N581 X58.245 Y22.11  
N582 X57.679 Y22.017  
N583 X57.114 Y21.951  
N584 X56.548 Y21.912  
N585 X55.983 Y21.9  
N586 X39.017  
N587 X38.452 Y21.912  
N588 X37.886 Y21.951  
N589 X37.321 Y22.017  
N590 X36.755 Y22.11  
N591 X36.19 Y22.231  
N592 X35.624 Y22.381  
N593 X35.059 Y22.561  
N594 X34.578 Y22.738  
N595 X33.928 Y23.014  
N596 X33.362 Y23.294  
N597 X32.797 Y23.611  
N598 X32.385 Y23.869  
N599 X31.666 Y24.376  
N600 X31.1 Y24.835  
N601 X30.913 Y25.0  
N602 X30.535 Y25.355  
N603 X30.325 Y25.566  
N604 X29.808 Y26.131  
N605 X29.404 Y26.629  
N606 X28.951 Y27.262  
N607 X28.593 Y27.828  
N608 X28.278 Y28.393  
N609 X28.0 Y28.959  
N610 X27.759 Y29.524  
N611 X27.55 Y30.09  
N612 X27.372 Y30.655  
N613 X27.224 Y31.221  
N614 X27.142 Y31.597  
N615 X27.013 Y32.352  
N616 X26.949 Y32.917  
N617 X26.911 Y33.483  
N618 X26.9 Y34.048  
N619 Y41.899  
N620 X8.1 Y41.9  
N621 Y25.0  
N622 G3 X12.02 Y21.08 I3.92 J0.0  
N623 X15.94 Y25.0 I0.0 J3.92  
N624 G1 Y33.9  
N625 X15.961 Y33.978  
N626 X16.022 Y34.039  
N627 X16.1 Y34.06  
N628 X18.901  
N629 X18.979 Y34.04  
N630 X19.04 Y33.98  
N631 X19.061 Y33.903  
N632 X19.062 Y33.894  
N633 X19.073 Y33.329  
N634 X19.078 Y33.146  
N635 X19.088 Y32.964  
N636 X19.126 Y32.398  
N637 X19.14 Y32.214

N638 X19.159 Y32.031  
N639 X19.223 Y31.465  
N640 X19.251 Y31.247  
N641 X19.285 Y31.031  
N642 X19.414 Y30.276  
N643 X19.445 Y30.105  
N644 X19.48 Y29.934  
N645 X19.562 Y29.558  
N646 X19.6 Y29.391  
N647 X19.642 Y29.225  
N648 X19.791 Y28.659  
N649 X19.84 Y28.482  
N650 X19.893 Y28.306  
N651 X20.07 Y27.741  
N652 X20.131 Y27.556  
N653 X20.196 Y27.373  
N654 X20.405 Y26.807  
N655 X20.475 Y26.625  
N656 X20.549 Y26.445  
N657 X20.79 Y25.879  
N658 X20.873 Y25.693  
N659 X20.96 Y25.509  
N660 X21.237 Y24.943  
N661 X21.332 Y24.756  
N662 X21.432 Y24.571  
N663 X21.748 Y24.006  
N664 X21.855 Y23.82  
N665 X21.967 Y23.638  
N666 X22.324 Y23.072  
N667 X22.448 Y22.883  
N668 X22.577 Y22.697  
N669 X23.03 Y22.064  
N670 X23.17 Y21.875  
N671 X23.315 Y21.69  
N672 X23.72 Y21.192  
N673 X23.868 Y21.015  
N674 X24.021 Y20.842  
N675 X24.538 Y20.277  
N676 X24.651 Y20.155  
N677 X24.766 Y20.037  
N678 X24.976 Y19.826  
N679 X25.073 Y19.731  
N680 X25.171 Y19.637  
N681 X25.548 Y19.283  
N682 X25.638 Y19.2  
N683 X25.729 Y19.119  
N684 X25.916 Y18.953  
N685 X26.038 Y18.848  
N686 X26.163 Y18.745  
N687 X26.728 Y18.286  
N688 X26.935 Y18.125  
N689 X27.146 Y17.97  
N690 X27.865 Y17.463

N691 X28.046 Y17.339  
N692 X28.231 Y17.22  
N693 X28.643 Y16.962  
N694 X28.799 Y16.868  
N695 X28.956 Y16.777  
N696 X29.521 Y16.459  
N697 X29.705 Y16.359  
N698 X29.891 Y16.264  
N699 X29.932 Y16.244  
N700 X29.987 Y16.198  
N701 X30.02 Y16.114  
N702 X29.998 Y16.018  
N703 X29.931 Y15.957  
N704 X29.861 Y15.94  
N705 X16.1 Y15.941  
N706 X16.022 Y15.961  
N707 X15.96 Y16.022  
N708 X15.94 Y16.101  
N709 Y25.0  
N710 G3 X12.02 Y26.624 I-2.296 J0.0  
N711 G2 X8.1 Y25.0 I-3.92 J3.92  
N712 G1 Z10.0 F40000.0  
N713 X68.1 Y39.183  
N714 Z-21.595  
N715 Y34.048 Z-22.5 F150.0  
N716 X68.089 Y33.483 Z-22.6  
N717 X68.051 Y32.917 Z-22.7  
N718 X67.987 Y32.352 Z-22.8  
N719 X67.895 Y31.786 Z-22.901  
N720 X67.776 Y31.221 Z-23.003  
N721 X67.628 Y30.655 Z-23.106  
N722 X67.45 Y30.09 Z-23.211  
N723 X67.293 Y29.656 Z-23.292  
N724 X67.0 Y28.959 Z-23.425  
N725 X66.727 Y28.402 Z-23.535  
N726 X66.407 Y27.828 Z-23.651  
N727 X66.049 Y27.262 Z-23.769  
N728 X65.647 Y26.697 Z-23.891  
N729 X65.192 Y26.131 Z-24.019  
N730 X64.675 Y25.566 Z-24.154  
N731 X64.465 Y25.354 Z-24.206  
N732 X64.087 Y25.0 Z-24.298  
N733 X63.9 Y24.835 Z-24.342  
N734 X63.41 Y24.434 Z-24.453  
N735 X62.769 Y23.971 Z-24.593  
N736 X62.203 Y23.611 Z-24.711  
N737 X61.656 Y23.303 Z-24.822  
N738 X61.072 Y23.014 Z-24.936  
N739 X60.507 Y22.771 Z-25.045  
N740 X59.941 Y22.561 Z-25.151  
N741 X59.376 Y22.381 Z-25.256  
N742 X58.81 Y22.231 Z-25.359  
N743 X58.245 Y22.11 Z-25.461



N744 X57.679 Y22.017 Z-25.562  
N745 X57.114 Y21.951 Z-25.662  
N746 X56.548 Y21.912 Z-25.762  
N747 X55.983 Y21.9 Z-25.862  
N748 X39.017 Z-28.853  
N749 X38.452 Y21.912 Z-28.953  
N750 X37.886 Y21.951 Z-29.053  
N751 X37.321 Y22.017 Z-29.153  
N752 X36.755 Y22.11 Z-29.254  
N753 X36.19 Y22.231 Z-29.356  
N754 X35.624 Y22.381 Z-29.459  
N755 X35.059 Y22.561 Z-29.564  
N756 X34.578 Y22.738 Z-29.654  
N757 X33.928 Y23.014 Z-29.779  
N758 X33.362 Y23.294 Z-29.89  
N759 X32.797 Y23.611 Z-30.004  
N760 X32.385 Y23.869 Z-30.09  
N761 X31.666 Y24.376 Z-30.245  
N762 X31.1 Y24.835 Z-30.373  
N763 X30.913 Y25.0 Z-30.417  
N764 X30.535 Y25.354 Z-30.509  
N765 X30.325 Y25.566 Z-30.561  
N766 X29.808 Y26.131 Z-30.696  
N767 X29.404 Y26.629 Z-30.809  
N768 X28.951 Y27.262 Z-30.947  
N769 X28.593 Y27.828 Z-31.064  
N770 X28.278 Y28.393 Z-31.179  
N771 X28.0 Y28.959 Z-31.29  
N772 X27.759 Y29.524 Z-31.398  
N773 X27.55 Y30.09 Z-31.504  
N774 X27.372 Y30.655 Z-31.609  
N775 X27.224 Y31.221 Z-31.712  
N776 X27.142 Y31.597 Z-31.78  
N777 X27.013 Y32.352 Z-31.915  
N778 X26.949 Y32.917 Z-32.015  
N779 X26.911 Y33.483 Z-32.115  
N780 X26.9 Y34.048 Z-32.215  
N781 Y41.899 Z-33.599  
N782 X8.1 Y41.9 Z-36.913  
N783 Y25.0 Z-39.893  
N784 Y8.101 F3580.0  
N785 X86.9 Y8.1  
N786 Y8.6  
N787 Y25.0  
N788 G3 X82.98 Y28.92 I-3.92 J0.0  
N789 X79.06 Y25.0 I0.0 J-3.92  
N790 G1 Y16.1  
N791 X79.04 Y16.022  
N792 X78.978 Y15.961  
N793 X78.9 Y15.94  
N794 X65.137  
N795 X65.067 Y15.956  
N796 X65.0 Y16.017

N797 X64.978 Y16.114  
N798 X65.011 Y16.198  
N799 X65.066 Y16.244  
N800 X65.134 Y16.277  
N801 X65.32 Y16.372  
N802 X65.503 Y16.472  
N803 X66.049 Y16.78  
N804 X66.232 Y16.886  
N805 X66.411 Y16.997  
N806 X66.977 Y17.356  
N807 X67.17 Y17.483  
N808 X67.359 Y17.615  
N809 X68.0 Y18.079  
N810 X68.188 Y18.219  
N811 X68.372 Y18.364  
N812 X68.861 Y18.764  
N813 X68.974 Y18.858  
N814 X69.084 Y18.953  
N815 X69.272 Y19.119  
N816 X69.362 Y19.2  
N817 X69.451 Y19.282  
N818 X69.829 Y19.637  
N819 X69.927 Y19.73  
N820 X70.024 Y19.826  
N821 X70.234 Y20.037  
N822 X70.349 Y20.155  
N823 X70.462 Y20.277  
N824 X70.979 Y20.842  
N825 X71.142 Y21.026  
N826 X71.299 Y21.214  
N827 X71.754 Y21.78  
N828 X71.898 Y21.964  
N829 X72.036 Y22.153  
N830 X72.438 Y22.718  
N831 X72.56 Y22.894  
N832 X72.676 Y23.072  
N833 X73.033 Y23.638  
N834 X73.146 Y23.822  
N835 X73.254 Y24.009  
N836 X73.574 Y24.583  
N837 X73.674 Y24.768  
N838 X73.769 Y24.955  
N839 X74.041 Y25.512  
N840 X74.138 Y25.716  
N841 X74.228 Y25.924  
N842 X74.521 Y26.622  
N843 X74.593 Y26.799  
N844 X74.661 Y26.978  
N845 X74.818 Y27.411  
N846 X74.876 Y27.575  
N847 X74.93 Y27.741  
N848 X75.108 Y28.306  
N849 X75.16 Y28.482

N850 X75.209 Y28.659  
N851 X75.358 Y29.225  
N852 X75.406 Y29.415  
N853 X75.448 Y29.605  
N854 X75.567 Y30.171  
N855 X75.603 Y30.351  
N856 X75.635 Y30.532  
N857 X75.726 Y31.097  
N858 X75.754 Y31.281  
N859 X75.777 Y31.465  
N860 X75.841 Y32.031  
N861 X75.86 Y32.214  
N862 X75.874 Y32.398  
N863 X75.912 Y32.964  
N864 X75.922 Y33.146  
N865 X75.927 Y33.329  
N866 X75.939 Y33.895  
N867 Y33.903  
N868 X75.96 Y33.98  
N869 X76.021 Y34.04  
N870 X76.099 Y34.06  
N871 X78.9  
N872 X78.978 Y34.039  
N873 X79.04 Y33.978  
N874 X79.06 Y33.9  
N875 Y25.0  
N876 G3 X82.98 Y21.08 I3.92 J0.0  
N877 X86.9 Y25.0 I0.0 J3.92  
N878 G1 Y41.899  
N879 X68.1 Y41.9  
N880 Y34.048  
N881 X68.089 Y33.483  
N882 X68.051 Y32.917  
N883 X67.987 Y32.352  
N884 X67.895 Y31.786  
N885 X67.776 Y31.221  
N886 X67.628 Y30.655  
N887 X67.45 Y30.09  
N888 X67.293 Y29.656  
N889 X67.0 Y28.959  
N890 X66.727 Y28.402  
N891 X66.407 Y27.828  
N892 X66.049 Y27.262  
N893 X65.647 Y26.697  
N894 X65.192 Y26.131  
N895 X64.675 Y25.566  
N896 X64.465 Y25.354  
N897 X64.087 Y25.0  
N898 X63.9 Y24.835  
N899 X63.41 Y24.434  
N900 X62.769 Y23.971  
N901 X62.203 Y23.611  
N902 X61.656 Y23.303  
N903 X61.072 Y23.014  
N904 X60.507 Y22.771  
N905 X59.941 Y22.561  
N906 X59.376 Y22.381  
N907 X58.81 Y22.231  
N908 X58.245 Y22.11  
N909 X57.679 Y22.017  
N910 X57.114 Y21.951  
N911 X56.548 Y21.912  
N912 X55.983 Y21.9  
N913 X39.017  
N914 X38.452 Y21.912  
N915 X37.886 Y21.951  
N916 X37.321 Y22.017  
N917 X36.755 Y22.11  
N918 X36.19 Y22.231  
N919 X35.624 Y22.381  
N920 X35.059 Y22.561  
N921 X34.578 Y22.738  
N922 X33.928 Y23.014  
N923 X33.362 Y23.294  
N924 X32.797 Y23.611  
N925 X32.385 Y23.869  
N926 X31.666 Y24.376  
N927 X31.1 Y24.835  
N928 X30.913 Y25.0  
N929 X30.535 Y25.354  
N930 X30.325 Y25.566  
N931 X29.808 Y26.131  
N932 X29.404 Y26.629  
N933 X28.951 Y27.262  
N934 X28.593 Y27.828  
N935 X28.278 Y28.393  
N936 X28.0 Y28.959  
N937 X27.759 Y29.524  
N938 X27.55 Y30.09  
N939 X27.372 Y30.655  
N940 X27.224 Y31.221  
N941 X27.142 Y31.597  
N942 X27.013 Y32.352  
N943 X26.949 Y32.917  
N944 X26.911 Y33.483  
N945 X26.9 Y34.048  
N946 Y41.899  
N947 X8.1 Y41.9  
N948 Y25.0  
N949 G3 X12.02 Y21.08 I3.92 J0.0  
N950 X15.94 Y25.0 I0.0 J3.92  
N951 G1 Y33.9  
N952 X15.961 Y33.978  
N953 X16.022 Y34.039  
N954 X16.1 Y34.06  
N955 X18.901

N956 X18.979 Y34.04  
N957 X19.04 Y33.98  
N958 X19.061 Y33.903  
N959 Y33.894  
N960 X19.073 Y33.329  
N961 X19.078 Y33.146  
N962 X19.088 Y32.964  
N963 X19.126 Y32.398  
N964 X19.14 Y32.214  
N965 X19.159 Y32.031  
N966 X19.223 Y31.465  
N967 X19.251 Y31.247  
N968 X19.285 Y31.031  
N969 X19.414 Y30.276  
N970 X19.445 Y30.105  
N971 X19.48 Y29.934  
N972 X19.562 Y29.558  
N973 X19.6 Y29.391  
N974 X19.642 Y29.225  
N975 X19.791 Y28.66  
N976 X19.84 Y28.482  
N977 X19.893 Y28.306  
N978 X20.07 Y27.741  
N979 X20.131 Y27.556  
N980 X20.196 Y27.373  
N981 X20.405 Y26.807  
N982 X20.475 Y26.625  
N983 X20.549 Y26.445  
N984 X20.79 Y25.879  
N985 X20.873 Y25.693  
N986 X20.96 Y25.509  
N987 X21.237 Y24.943  
N988 X21.332 Y24.756  
N989 X21.432 Y24.571  
N990 X21.748 Y24.006  
N991 X21.855 Y23.82  
N992 X21.967 Y23.638  
N993 X22.324 Y23.072  
N994 X22.448 Y22.883  
N995 X22.577 Y22.697  
N996 X23.03 Y22.064  
N997 X23.17 Y21.875  
N998 X23.315 Y21.691  
N999 X23.72 Y21.192  
N1000 X23.868 Y21.015  
N1001 X24.021 Y20.842  
N1002 X24.538 Y20.277  
N1003 X24.651 Y20.155  
N1004 X24.766 Y20.037  
N1005 X24.976 Y19.826  
N1006 X25.073 Y19.73  
N1007 X25.171 Y19.637  
N1008 X25.548 Y19.283  
N1009 X25.638 Y19.2  
N1010 X25.729 Y19.119  
N1011 X25.916 Y18.953  
N1012 X26.038 Y18.848  
N1013 X26.163 Y18.745  
N1014 X26.728 Y18.286  
N1015 X26.935 Y18.125  
N1016 X27.146 Y17.97  
N1017 X27.865 Y17.463  
N1018 X28.046 Y17.339  
N1019 X28.231 Y17.22  
N1020 X28.643 Y16.962  
N1021 X28.799 Y16.868  
N1022 X28.956 Y16.777  
N1023 X29.521 Y16.459  
N1024 X29.705 Y16.359  
N1025 X29.891 Y16.264  
N1026 X29.932 Y16.244  
N1027 X29.987 Y16.198  
N1028 X30.02 Y16.114  
N1029 X29.998 Y16.018  
N1030 X29.931 Y15.957  
N1031 X29.861 Y15.94  
N1032 X16.1 Y15.941  
N1033 X16.022 Y15.961  
N1034 X15.96 Y16.022  
N1035 X15.94 Y16.101  
N1036 Y25.0  
N1037 G3 X12.02 Y26.624 I-2.296 J0.0  
N1038 G2 X8.1 Y25.0 I-3.92 J3.92  
N1039 G1 Z10.0 F40000.0  
N1040 FWOFF  
N1041 COMPOF  
N1042 TRAFOOF  
N1043 T="Freza prumer 16 mm  
N1044 M6  
N1045 M30

## PŘÍLOHA 2

Program pro nástroj monolit PRAMET  
12E4S100-50A12 SUMA dokončování

10 ; Part Name : 12  
N11 ; Program Name :  
12\_Dok\_konstant\_Z\_fr\_12 mm  
N12 ; Program Date :  
N13 ; Programmed by :  
N14 ; PowerMILL Cb : 1111121  
N15 ; DP Version : 1510  
N16 ; Option File : S840D  
N17 ; Output Workplane : Zákl.souř.system  
N18 ;  
N19 ; TOOL LIST : 1 tools  
N20 ; No. ID Diameter Tip Rad  
Length  
N21 ; 4 Freza prumer 12 mm 12.000 0.0  
120.000  
N22 ;  
N23 ; ESTIMATED CUTTING TIME : 1  
TOOLPATHS = 00:01:11  
N24 ;  
N25 G71 G90  
N26 G40 G55 G17  
N27 ; TOOL NUMBER : 4  
N28 ; TOOL TYPE : ENDMILL  
N29 ; TOOL ID : Freza prumer 12 mm  
N30 ; TOOL DIA. : 12.000  
N31 ; TOOL LENGTH : 120.000  
;N32 T="Freza prumer 12 mm"  
T="FR12\_SUMA"  
N33 M6  
N34 D1  
N35 S5305 M3  
N36 COMPOF  
N37 TRAORI  
N38 G55  
N39 TRANS  
N40 ROT  
N41 TRANS X0.0 Y0.0 Z0.0  
N42 M11 M13  
N43 ORIWKS  
N44 G1 A2=0.0 B2=0.0 C2=0.0 F10000  
N45 ; =====  
N46 ; TOOLPATH : 12  
N47 ; ALLOWANCE : +0.0  
N48 ; WORKPLANE : World  
N49 ; =====  
N50 FFWON  
N51 SOFT

N52 COMPCAD G642  
N53 ;TOL0.015)  
N54 ;JERK\_ON60)  
N55 M8  
N56 G1 X47.5 Y25.0 C0.0 A0.0 F10000  
N57 Z10.0 H4  
N58 M10 M12  
N59 X61.035 Y6.0 F40000.0  
N60 Z5.0  
N61 Z-5.0 F150.0  
N62 X89.0 Z-9.931  
N63 Y6.392 Z-10.0  
N64 Y44.0 F1485.0  
N65 X66.0  
N66 X65.997 Y33.814  
N67 X65.976 Y33.325  
N68 X65.931 Y32.835  
N69 X65.862 Y32.345  
N70 X65.767 Y31.856  
N71 X65.618 Y31.267  
N72 X65.499 Y30.876  
N73 X65.323 Y30.387  
N74 X65.119 Y29.897  
N75 X64.883 Y29.407  
N76 X64.612 Y28.918  
N77 X64.304 Y28.428  
N78 X63.953 Y27.938  
N79 X63.554 Y27.448  
N80 X63.101 Y26.959  
N81 X62.578 Y26.469  
N82 X62.191 Y26.147  
N83 X61.701 Y25.784  
N84 X61.25 Y25.49  
N85 X60.722 Y25.185  
N86 X60.232 Y24.94  
N87 X59.742 Y24.727  
N88 X59.151 Y24.51  
N89 X58.763 Y24.39  
N90 X58.273 Y24.262  
N91 X57.783 Y24.16  
N92 X57.294 Y24.084  
N93 X56.627 Y24.021  
N94 X56.314 Y24.005  
N95 X55.825 Y24.0  
N96 X39.175  
N97 X38.686 Y24.005  
N98 X38.196 Y24.033  
N99 X37.706 Y24.084  
N100 X37.217 Y24.16  
N101 X36.727 Y24.262  
N102 X36.237 Y24.39  
N103 X35.747 Y24.545  
N104 X35.258 Y24.727

N105 X34.643 Y25.0  
N106 X34.278 Y25.185  
N107 X33.75 Y25.49  
N108 X33.299 Y25.784  
N109 X32.809 Y26.147  
N110 X32.32 Y26.559  
N111 X31.83 Y27.03  
N112 X31.34 Y27.571  
N113 X31.047 Y27.938  
N114 X30.696 Y28.428  
N115 X30.361 Y28.964  
N116 X30.117 Y29.407  
N117 X29.871 Y29.92  
N118 X29.677 Y30.387  
N119 X29.501 Y30.876  
N120 X29.353 Y31.366  
N121 X29.233 Y31.856  
N122 X29.138 Y32.345  
N123 X29.069 Y32.835  
N124 X29.024 Y33.325  
N125 X29.003 Y33.814  
N126 X29.0 Y44.0  
N127 X6.0  
N128 Y6.0  
N129 X89.0  
N130 Y6.392  
N131 Y44.0 Z-11.376  
N132 X66.0 Z-12.217  
N133 X65.997 Y33.814 Z-12.589  
N134 X65.976 Y33.325 Z-12.607  
N135 X65.931 Y32.835 Z-12.625  
N136 X65.862 Y32.345 Z-12.643  
N137 X65.767 Y31.856 Z-12.662  
N138 X65.647 Y31.366 Z-12.68  
N139 X65.499 Y30.876 Z-12.699  
N140 X65.323 Y30.387 Z-12.718  
N141 X65.119 Y29.897 Z-12.737  
N142 X64.883 Y29.407 Z-12.757  
N143 X64.639 Y28.964 Z-12.776  
N144 X64.304 Y28.428 Z-12.799  
N145 X63.953 Y27.938 Z-12.821  
N146 X63.66 Y27.571 Z-12.838  
N147 X63.365 Y27.236 Z-12.854  
N148 X62.998 Y26.857 Z-12.873  
N149 X62.578 Y26.469 Z-12.894  
N150 X62.191 Y26.147 Z-12.913  
N151 X61.701 Y25.784 Z-12.935  
N152 X61.25 Y25.49 Z-12.955  
N153 X60.722 Y25.185 Z-12.977  
N154 X60.232 Y24.94 Z-12.997  
N155 X59.742 Y24.727 Z-13.017  
N156 X59.253 Y24.545 Z-13.036  
N157 X58.763 Y24.39 Z-13.055  
N158 X58.273 Y24.262 Z-13.073  
N159 X57.783 Y24.16 Z-13.091  
N160 X57.294 Y24.084 Z-13.109  
N161 X56.804 Y24.033 Z-13.127  
N162 X56.314 Y24.005 Z-13.145  
N163 X38.93 Y24.0 Z-13.781  
N164 X38.529 Y24.011 Z-13.796  
N165 X37.951 Y24.055 Z-13.817  
N166 X37.461 Y24.12 Z-13.835  
N167 X36.971 Y24.208 Z-13.853  
N168 X36.481 Y24.323 Z-13.872  
N169 X36.042 Y24.448 Z-13.889  
N170 X35.501 Y24.632 Z-13.909  
N171 X35.012 Y24.831 Z-13.929  
N172 X34.768 Y24.94 Z-13.939  
N173 X34.278 Y25.185 Z-13.959  
N174 X33.75 Y25.49 Z-13.981  
N175 X33.299 Y25.784 Z-14.001  
N176 X32.809 Y26.147 Z-14.023  
N177 X32.422 Y26.469 Z-14.041  
N178 X32.107 Y26.757 Z-14.057  
N179 X31.732 Y27.133 Z-14.076  
N180 X31.34 Y27.571 Z-14.098  
N181 X31.047 Y27.938 Z-14.115  
N182 X30.696 Y28.428 Z-14.137  
N183 X30.361 Y28.964 Z-14.16  
N184 X30.117 Y29.407 Z-14.179  
N185 X29.871 Y29.92 Z-14.199  
N186 X29.677 Y30.387 Z-14.218  
N187 X29.501 Y30.876 Z-14.237  
N188 X29.353 Y31.366 Z-14.256  
N189 X29.233 Y31.856 Z-14.274  
N190 X29.138 Y32.345 Z-14.292  
N191 X29.069 Y32.835 Z-14.31  
N192 X29.024 Y33.325 Z-14.328  
N193 X29.003 Y33.814 Z-14.346  
N194 X29.0 Y44.0 Z-14.719  
N195 X21.89 Z-14.972  
N196 X6.0 Z-15.56  
N197 Y33.032 Z-15.948  
N198 Y6.0 Z-16.95  
N199 X82.538 Z-19.75  
N200 X83.673 Y6.085 Z-19.788  
N201 X89.0 Y6.03 Z-19.917  
N202 Y6.0 Z-19.986  
N203 Y6.392 Z-20.0  
N204 Y44.0 Z-21.376  
N205 X66.0 Z-22.217  
N206 X65.997 Y33.814 Z-22.589  
N207 X65.976 Y33.325 Z-22.607  
N208 X65.931 Y32.835 Z-22.625  
N209 X65.862 Y32.345 Z-22.643  
N210 X65.767 Y31.856 Z-22.662

N211 X65.647 Y31.366 Z-22.68  
N212 X65.499 Y30.876 Z-22.699  
N213 X65.323 Y30.387 Z-22.718  
N214 X65.119 Y29.897 Z-22.737  
N215 X64.883 Y29.407 Z-22.757  
N216 X64.639 Y28.964 Z-22.776  
N217 X64.304 Y28.428 Z-22.799  
N218 X63.953 Y27.938 Z-22.821  
N219 X63.66 Y27.571 Z-22.838  
N220 X63.365 Y27.236 Z-22.854  
N221 X62.998 Y26.857 Z-22.873  
N222 X62.578 Y26.469 Z-22.894  
N223 X62.191 Y26.147 Z-22.913  
N224 X61.701 Y25.784 Z-22.935  
N225 X61.25 Y25.49 Z-22.955  
N226 X60.722 Y25.185 Z-22.977  
N227 X60.232 Y24.94 Z-22.997  
N228 X59.742 Y24.727 Z-23.017  
N229 X59.253 Y24.545 Z-23.036  
N230 X58.763 Y24.39 Z-23.055  
N231 X58.273 Y24.262 Z-23.073  
N232 X57.783 Y24.16 Z-23.091  
N233 X57.294 Y24.084 Z-23.109  
N234 X56.804 Y24.033 Z-23.127  
N235 X56.314 Y24.005 Z-23.145  
N236 X38.93 Y24.0 Z-23.781  
N237 X38.529 Y24.011 Z-23.796  
N238 X37.951 Y24.055 Z-23.817  
N239 X37.461 Y24.12 Z-23.835  
N240 X36.971 Y24.208 Z-23.853  
N241 X36.481 Y24.323 Z-23.872  
N242 X36.042 Y24.448 Z-23.889  
N243 X35.501 Y24.632 Z-23.909  
N244 X35.012 Y24.831 Z-23.929  
N245 X34.768 Y24.94 Z-23.938  
N246 X34.278 Y25.185 Z-23.959  
N247 X33.75 Y25.49 Z-23.981  
N248 X33.299 Y25.784 Z-24.001  
N249 X32.809 Y26.147 Z-24.023  
N250 X32.422 Y26.469 Z-24.041  
N251 X32.107 Y26.757 Z-24.057  
N252 X31.732 Y27.133 Z-24.076  
N253 X31.34 Y27.571 Z-24.098  
N254 X31.047 Y27.938 Z-24.115  
N255 X30.696 Y28.428 Z-24.137  
N256 X30.361 Y28.964 Z-24.16  
N257 X30.117 Y29.407 Z-24.179  
N258 X29.871 Y29.92 Z-24.199  
N259 X29.677 Y30.387 Z-24.218  
N260 X29.501 Y30.876 Z-24.237  
N261 X29.353 Y31.366 Z-24.256  
N262 X29.233 Y31.856 Z-24.274  
N263 X29.138 Y32.345 Z-24.292

N264 X29.069 Y32.835 Z-24.31  
N265 X29.024 Y33.325 Z-24.328  
N266 X29.003 Y33.814 Z-24.346  
N267 X29.0 Y44.0 Z-24.719  
N268 X21.89 Z-24.972  
N269 X6.0 Z-25.56  
N270 Y33.032 Z-25.948  
N271 Y6.0 Z-26.95  
N272 X30.051 Z-27.808  
N273 X66.861 Z-29.158  
N274 X89.0 Z-29.986  
N275 Y6.392 Z-30.0  
N276 Y44.0 Z-31.375  
N277 X66.0 Z-32.217  
N278 X65.997 Y33.814 Z-32.589  
N279 X65.976 Y33.325 Z-32.607  
N280 X65.931 Y32.835 Z-32.625  
N281 X65.862 Y32.345 Z-32.643  
N282 X65.767 Y31.856 Z-32.661  
N283 X65.647 Y31.366 Z-32.68  
N284 X65.499 Y30.876 Z-32.698  
N285 X65.323 Y30.387 Z-32.717  
N286 X65.119 Y29.897 Z-32.737  
N287 X64.883 Y29.407 Z-32.757  
N288 X64.639 Y28.964 Z-32.775  
N289 X64.304 Y28.428 Z-32.798  
N290 X63.953 Y27.938 Z-32.82  
N291 X63.66 Y27.571 Z-32.838  
N292 X63.365 Y27.236 Z-32.854  
N293 X62.998 Y26.857 Z-32.873  
N294 X62.578 Y26.469 Z-32.894  
N295 X62.191 Y26.147 Z-32.912  
N296 X61.701 Y25.784 Z-32.935  
N297 X61.25 Y25.49 Z-32.954  
N298 X60.722 Y25.185 Z-32.977  
N299 X60.232 Y24.94 Z-32.997  
N300 X59.742 Y24.727 Z-33.016  
N301 X59.253 Y24.545 Z-33.035  
N302 X58.763 Y24.39 Z-33.054  
N303 X58.273 Y24.262 Z-33.073  
N304 X57.783 Y24.16 Z-33.091  
N305 X57.294 Y24.084 Z-33.109  
N306 X56.804 Y24.033 Z-33.127  
N307 X56.314 Y24.005 Z-33.145  
N308 X38.93 Y24.0 Z-33.781  
N309 X38.529 Y24.011 Z-33.796  
N310 X37.951 Y24.055 Z-33.817  
N311 X37.461 Y24.12 Z-33.835  
N312 X36.971 Y24.208 Z-33.853  
N313 X36.481 Y24.323 Z-33.871  
N314 X36.042 Y24.448 Z-33.888  
N315 X35.501 Y24.632 Z-33.909  
N316 X35.012 Y24.831 Z-33.928

N317 X34.768 Y24.94 Z-33.938  
N318 X34.278 Y25.185 Z-33.958  
N319 X33.75 Y25.49 Z-33.98  
N320 X33.299 Y25.784 Z-34.0  
N321 X32.809 Y26.147 Z-34.022  
N322 X32.422 Y26.469 Z-34.041  
N323 X32.107 Y26.757 Z-34.056  
N324 X31.732 Y27.133 Z-34.076  
N325 X31.34 Y27.571 Z-34.097  
N326 X31.047 Y27.938 Z-34.115  
N327 X30.696 Y28.428 Z-34.137  
N328 X30.361 Y28.964 Z-34.16  
N329 X30.117 Y29.407 Z-34.178  
N330 X29.871 Y29.92 Z-34.199  
N331 X29.677 Y30.387 Z-34.218  
N332 X29.501 Y30.876 Z-34.237  
N333 X29.353 Y31.366 Z-34.255  
N334 X29.233 Y31.856 Z-34.274  
N335 X29.138 Y32.345 Z-34.292  
N336 X29.069 Y32.835 Z-34.31  
N337 X29.024 Y33.325 Z-34.328  
N338 X29.003 Y33.814 Z-34.346  
N339 X29.0 Y44.0 Z-34.718  
N340 X21.889 Z-34.971  
N341 X6.0 Z-35.56  
N342 Y33.031 Z-35.947  
N343 Y6.0 Z-36.949  
N344 X30.053 Z-37.807  
N345 X66.866 Z-39.158  
N346 X89.0 Z-39.985  
N347 Y6.392 Z-39.999  
N348 Y44.0  
N349 X66.0  
N350 X65.997 Y33.814  
N351 X65.976 Y33.325  
N352 X65.931 Y32.835  
N353 X65.862 Y32.345  
N354 X65.767 Y31.856  
N355 X65.618 Y31.267  
N356 X65.499 Y30.876  
N357 X65.323 Y30.387  
N358 X65.119 Y29.897  
N359 X64.883 Y29.407  
N360 X64.612 Y28.918  
N361 X64.304 Y28.428  
N362 X63.953 Y27.938  
N363 X63.554 Y27.448  
N364 X63.101 Y26.959  
N365 X62.578 Y26.469  
N366 X62.191 Y26.147  
N367 X61.701 Y25.784  
N368 X61.25 Y25.49  
N369 X60.722 Y25.185  
N370 X60.232 Y24.94  
N371 X59.742 Y24.727  
N372 X59.151 Y24.51  
N373 X58.763 Y24.39  
N374 X58.273 Y24.262  
N375 X57.783 Y24.16  
N376 X57.294 Y24.084  
N377 X56.627 Y24.021  
N378 X56.314 Y24.005  
N379 X55.825 Y24.0  
N380 X39.175  
N381 X38.686 Y24.005  
N382 X38.196 Y24.033  
N383 X37.706 Y24.084  
N384 X37.217 Y24.16  
N385 X36.727 Y24.262  
N386 X36.237 Y24.39  
N387 X35.747 Y24.545  
N388 X35.258 Y24.727  
N389 X34.643 Y25.0  
N390 X34.278 Y25.185  
N391 X33.75 Y25.49  
N392 X33.299 Y25.784  
N393 X32.809 Y26.147  
N394 X32.32 Y26.559  
N395 X31.83 Y27.03  
N396 X31.34 Y27.571  
N397 X31.047 Y27.938  
N398 X30.696 Y28.428  
N399 X30.361 Y28.964  
N400 X30.117 Y29.407  
N401 X29.871 Y29.92  
N402 X29.677 Y30.387  
N403 X29.501 Y30.876  
N404 X29.353 Y31.366  
N405 X29.233 Y31.856  
N406 X29.138 Y32.345  
N407 X29.069 Y32.835  
N408 X29.024 Y33.325  
N409 X29.003 Y33.814  
N410 X29.0 Y44.0  
N411 X6.0  
N412 Y6.0  
N413 X89.0  
N414 Y6.392  
N415 Z10.0 F40000.0  
;N416 FWOFF  
N417 COMPOF  
N418 TRAFOOF  
;N419 T="Freza prumer 12 mm  
;N420 M6  
N421 M30

## PŘÍLOHA 3

Technické specifikace drsnoměru Surtronic S128

<b>Typ snímače</b>	indukční	
<b>Hmotnost</b>	0,5 kg	
<b>Zdroj napětí</b>	Li Poly dobíjecí baterie	
<b>Nabíječka</b>	USB 5V 1A 110 – 240 VAC 50/60 Hz	
<b>Rozsah měření</b>	400/100/10 $\mu\text{m}$	
<b>Rozlišení</b>	50/10/5 nm	
<b>Systémový šum Ra</b>	150/100/50 nm	
<b>Opakovatelnost Ra</b>	0,5 % z hodnoty + systémový šum	
<b>Měřicí síla</b>	150–300 mg	
<b>Snímací hrot</b>	diamantový 5 $\mu\text{m}$ není-li specifikováno jinak	
<b>Cut off</b>	0,25; 0,8; 2,5 mm	
<b>Filtr</b>	2CR nebo Gauss	
<b>Vyhodnocovaná délka</b>	0,25 – 25 mm	
<b>Kapacita baterie na jedno nabití</b>	2 000 měření	
<b>Pracovní podmínky</b>	Teplota	0 až 40 °C
	Vlhkost	0 až 80 % bez kondenzace
<b>Max. rozsah osy X</b>	25,5 mm	
<b>Rychlost snímání</b>	1 mm/s	